

Het Zonnestelselmodel Gebruikshandleiding

Achtergrondinformatie en tips
voor het gebruik van het Planetenpad



INHOUD	
Inleiding	2
Opzet van het Zonnestelselmodel	3
Opbouw en vorming van het Zonnestelsel	5
Planet Nine - een negende planeet?	8
Zelf een 3D model maken	9
Verklaring van sterrenkundige begrippen	10
Het Planetenpad in de praktijk	12
Index	15

Inleiding

Hulp

Bij de totstandkoming van de beide sets van het Zonnestelselmodel heb ik gelukkig veel hulp gehad van mensen die de teksten kritisch lazen en mijn wezen op foutjes, fouten en onduidelijkheden. Het gaat om (in alfabetische volgorde): Gerco Blok, Berend van den Brink, Luc Burlage, Fred Hahn, Luc Hendriks, em. prof. Huib Henrichs, Frank Kosterman, Simone Severs, Letty Spieker, Fred Steinmetz, Hans Walrecht en vooral ook mijn Marja. Mede dankzij hen is dit een mooi en leerzaam product geworden.

Tips bij het lezen

In deze handleiding gebruik ik het systeem van verwijzen dat ik ook in mijn boeken gebruik. Het idee is om niet steeds iets uit te leggen, maar dat op één plaats te doen. Op die plaats staat het begrip **vet** gedrukt. Als hetzelfde begrip ergens anders wordt genoemd staat het daar **cursief**. Je weet dan dat het ergens anders wordt uitgelegd en waar dat is vind je in de index achterin. Er zijn echter ook woorden die cursief staan maar niet vanwege het bovenstaande. Het gaat dan om zaken die met taal te maken hebben, zoals bij de uitleg van perihelium en aphelium op pagina 11. Verder staan verwijzingen cursief gedrukt.

Copyright

© Rob Walrecht 2021, alle rechten voorbehouden. Voor toestemming voor gebruik in niet-commerciële presentaties (zoals op scholen) stuur je een e-mail naar: info@walrecht.nl.

Rechts: voor de voorbladen van de beide sets maakten we foto's in het Park Schothorst Noord, in Amersfoort. Voor dat doel had ik een goedkope manier bedacht om de kaartjes op te stellen: stokken waarop knijpers zijn gelijmd. Foto Rene van Melzen (www.renes-productions.nl).

Je eigen Planetenpad

Afstanden in het zonnestelsel begrijpen

Het zonnestelsel is reusachtig groot, met afstanden die je aangeeft in miljoenen en miljarden km. Die getallen, hoe belangrijk ook, zeggen ons eigenlijk niet zoveel. Geen mens kan zich de 4,5 miljard km naar Neptunus echt voorstellen. Je kunt een overzicht geven van de afstanden en afmetingen met behulp van illustraties, zoals ik in mijn boek *Genieten van het zonnestelsel* heb gedaan (zie kader), maar je kunt dan óf de afmetingen van de 'leden' van het zonnestelsel, of **zonnestelselobjecten**, goed met elkaar vergelijken, óf een beeld geven van de verhoudingen van de afstanden. Nooit beide, want in een plaatje in een boek met de afstanden op schaal zijn de zon en de planeten te klein om te kunnen zien! Om een echt goed begrip te krijgen heb je een schaalmodel nodig. En de ruimte om dat schaalmodel op te stellen. Als je dat doet krijg je een *Planetenpad*!

Het is erg leuk om het Planetenpad op te stellen en het vervolgens te bestuderen, zeker met kinderen, op school of thuis. Als je de kinderen de kaartjes op de juiste afstand laat zetten of hangen (zie Opstellen, pag. 13) zijn ze ook nog eens bezig met meten!

Dit is de Gebruikshandleiding voor het Zonnestelselmodel. Het bevat achtergrondinformatie en tips. Mocht je in deze handleiding antwoorden missen of andere op- of aanmerkingen hebben stuur dat dan naar info@walrecht.nl. Ik kan dan de handleiding eventueel verbeteren of aanvullen.

Schaal 1:100 miljard

In een schaalmodel op schaal 1:100 miljard zijn alle objecten én hun afstanden tot de zon 100 miljard maal verkleind: 1 cm stelt dus een

miljoen km in het echt voor! Reken maar uit:

1 cm in het schaalmodel = 100 miljard cm in werkelijkheid, of een miljard meter = een miljoen km. Dat betekent dat de afstand van de zon tot Neptunus (de achtste en verste planeet) in dit model 45 m is. *Dwergplaneet* Pluto staat nu op ruim 50 m van de zon.

Waar ik in deze gebruikshandleiding zeg 'op schaal' bedoel ik die schaal 1:100 miljard!

Een planetenpad wordt normaal gesproken in één rechte lijn opgesteld. Dat is het gemakkelijkst en geeft het beste de verschillen in afstand weer. In werkelijkheid zal de situatie dat alle planeten op één lijn staan niet voorkomen, laat staan dat ook alle kleinere objecten in die lijn liggen. Alle leden van het zonnestelsel hebben hun eigen baan om de zon, en kunnen daarbij in alle richtingen van de zon staan.

Omrekenen

Het voordeel van een **metrische schaal**, zoals 1:100 miljard, is dat je afstanden en afmetingen gemakkelijk kunt omrekenen. De aarde staat op bijna 150 miljoen km: 150 cm in het model. Neptunus staat op 4500 miljoen km van de zon: 45 m in het model.

De afstanden tot nieuwe objecten of objecten die niet in het Zonnestelselmodel zijn opgenomen kun je zo snel terugrekenen naar hun plek in het model. Stel dat er een nieuwe, grote KBO (zie *Tips bij het lezen*, in het kader) wordt ontdekt op 8 miljard km van de zon. Je kunt dat dan omrekenen op basis van die '1 cm voor 1 miljoen km', maar je kunt ook uitgaan van de afstand tot Neptunus: 45 m voor 4,5 miljard km betekent 80 m voor 8 miljard km! Hoe beter je de afstanden op schaal hebt opgenomen hoe sneller je dergelijke berekeningen kunt maken.



een uniek planetenpad

Opzet

Oude schaalmodel

Ons eerste Zonnestelselmodel, dat in 2003 uitkwam, bevatte kaartjes voor de zon, de (toen nog) negen planeten, de maan, de Voyager ruimtesondes, kometen en een 'En verder...' kaartje. Dat laatste kaartje geeft informatie over sterren in de buurt, met afmetingen en afstanden op dezelfde schaal. Verder was er een kaartje voor Quaoar, een toen net ontdekte KBO (zie *Tips bij het lezen* in het kader). Het was het eerste grote *Kuiper Belt Object* dat werd ontdekt sinds de ontdekking van Pluto, in 1930.

Sinds 2003 zijn er echter veel meer van dat soort grote ijsdweren ontdekt, onder anderen door de astronoom Mike Brown en zijn team. Brown is een expert op het gebied van de buitenste delen van het zonnestelsel en ik ben voor wat betreft de afmetingen en afstanden van ijsdweren uitgegaan van zijn lijst (<http://web.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html>).

Verder is men het zonnestelsel voorbij Neptunus gaan indelen naar de banen van de ijsdweren. Zo werd de *Kuipergordel* verder ingedeeld en hebben we gebieden aangeduid met objecten die nog verder van de zon verblijven.

De nieuwe opzet

Door al die nieuwe ontwikkelingen was het oude Zonnestelselmodel niet alleen verouderd, maar was één set van zestien kaartjes ook te weinig geworden om een goed beeld te krijgen van wat we nu weten over 'onze buurt'. Het

werden daarom twee sets: een **basisset** met de belangrijkste zonnestelselobjecten en een **aanvulset** met zestien andere interessante objecten en gebieden in het zonnestelsel. In 2020 kwam daar een 'extra aanvulset' van 24 kaartjes bij.

Kiezen

Bij de samenstelling van de aanvulset was veel denkwerk nodig: welke objecten voegen werkelijk iets toe? Zelf had ik al jaren extra kaartjes voor het Planetenpad dat ik bij lessen en lezingen gebruik. Deze waren ook gratis te downloaden. Voor de nieuwe versie zijn ze er ook al (zo nodig komen er nieuwe bij).

De extra kaartjes gebruikte ik bijvoorbeeld om de Planetoïdengordel goed af te bakenen (Vesta zit aan de binnenkant van die gordel, Hermione aan de buitenkant). Ook gebruikte ik één *centaur*, Chariklo, om die groep van weggejaagde ijsdweren te kunnen beschrijven. Kometen zijn uiteraard erg belangrijk (de afstanden zijn voor de komeet van Halley) en de beide Voyagers laten mooi zien waartoe de mens in staat is: Voyager 1 heeft het zonnestelsel al verlaten!

Daarnaast wilde ik vooral kaartjes voor de te onderscheiden gebieden in het zonnestelsel in de aanvulset hebben. Naast de eerder genoemde *Planetoïdengordel* en *Kuipergordel* zijn dat de *Oortwolk* en de *Scattered Disc* (we beschrijven dat allemaal hierna).

Genieten van het zonnestelsel

De illustraties in deze brochure zijn voornamelijk afkomstig uit mijn boek *Genieten van het zonnestelsel*. Dat boek bevat heel veel informatie, foto's en illustraties over de zon, de planeten en alle andere zonnestelselobjecten. Het vertelt over het ontstaan en de evolutie, over processen die de werelden maakten tot wat ze nu zijn en veel meer.

Het is een aanrader als je het Zonnestelselmodel optimaal wilt kunnen gebruiken, want zoveel informatie kon ik op de kaartjes en in deze brochure nooit brengen.

Extra aanvulset

De beide sets bevatten 32 kaartjes maar er zijn natuurlijk veel meer interessante objecten en er worden er ook steeds weer ontdekt. In 2020 kwam er daarom een extra set bij, MDL-ZS3, van 24 kaartjes. Daarmee kun je het Planetenpad nog completer maken.

Mochten er nog weer nieuwe objecten worden ontdekt waarvan ik denk dat die echt iets toevoegen, dan plaats ik een extra, gratis te downloaden kaartje op onze website:

www.walrecht.nl/nl/

Onze producten en folders Over het zonnestelselmodel Nieuwe informatie en aanvullingen

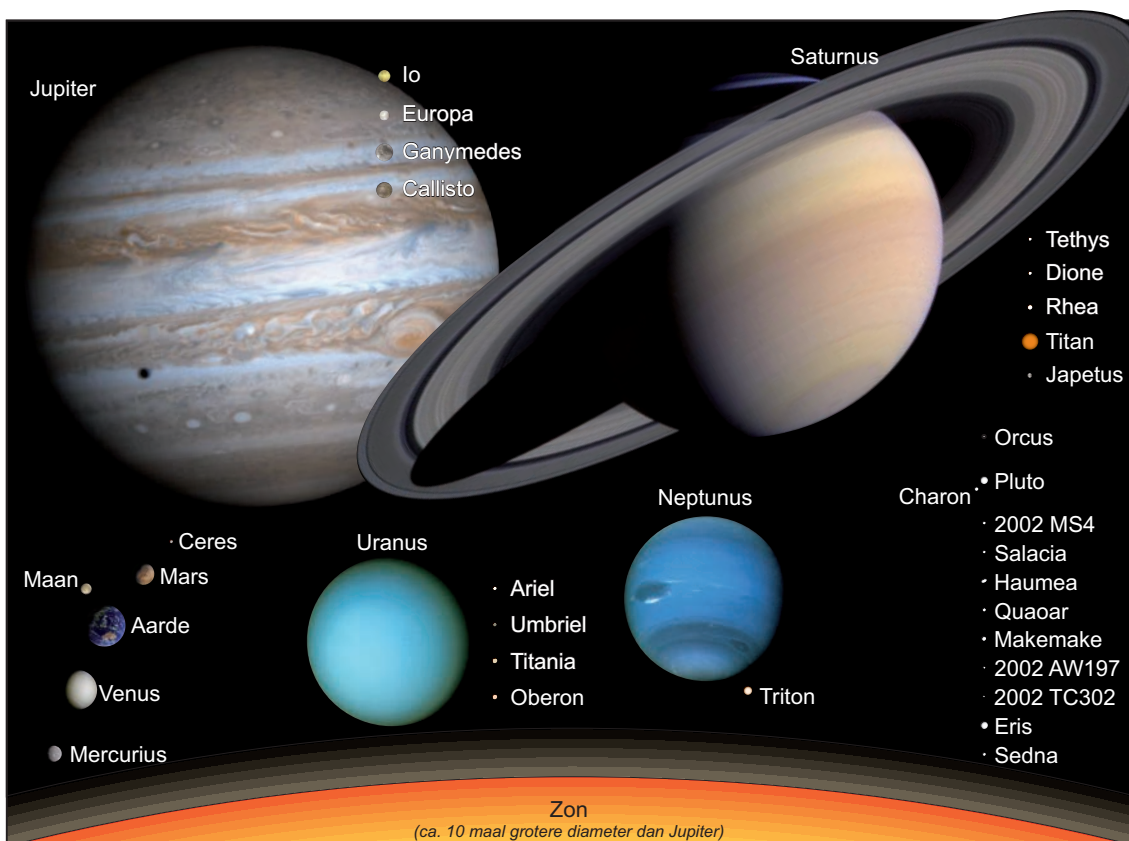
Op die site vind je ook belangrijke nieuwe gegevens en ontdekkingen, als dat nodig is.

Rob's Nieuwsbrief

Ongeveer tien maal per jaar komt deze nieuwsbrief uit, met allerlei nieuws en feiten uit de sterrenkunde en vooral ook over het zonnestelsel. Je kunt je gratis abonneren via: info@walrecht.nl.

Links: een 'familieportret' van het zonnestelsel. Je ziet alle objecten vanaf met een diameter van 600 km en groter afgebeeld. De zon staat er voor slechts een klein deel op want op deze schaal is hij 63 cm in diameter!

Na de zon en de planeten zijn de zeven grootste manen (satellieten) de grootste objecten in het zonnestelsel. Pas daarna komen de dwergplaneten Pluto en Eris.



Inleiding

Veel planeten!

Op 1 januari 1801 werd Ceres ontdekt, snel gevolgd door andere nieuwe 'planeten', zoals Pallas en Vesta.

Rond 1865 stond de teller al op honderd nieuwe planeten. Toen ging men zich afvragen of we ze niet in een aparte, eigen klasse moesten onderbrengen. Dat werd de klasse van de **planetoïden**. Niemand had daar trouwens moeite mee...

Samenstelling

In het vroege zonnestelsel waren bepaalde stoffen in overvloed, zoals trouwens in het hele heelal. Het gaat vooral om de gassen waterstof en helium en daarnaast moleculen die zijn opgebouwd uit zuurstof, stikstof en koolstof. Water bestaat uit waterstof en zuurstof, koolmonoxide en kooldioxide uit koolstof en zuurstof, methaan ('aardgas') uit koolstof en waterstof, ammoniak uit stikstof en waterstof.

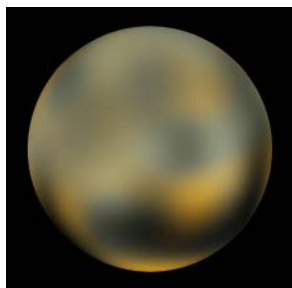
Andere elementen die veel voorkwamen (hoewel minder dan de bovengenoemde) zijn silicium, zwavel, ijzer, en magnesium. Silicium en zuurstof zijn de basis voor mineralen ('gesteenten'): silicaten. Het ligt voor de hand dat de moleculen die zijn opgebouwd uit de meest voorkomende atomen ook veel voorkwamen.

Het meeste was echter moleculaire waterstof (bestaande uit twee waterstofatomen) en helium. Het meeste waterstof en helium ging in de zon. Die bestaat voor 84% uit waterstof en 16% uit helium. De zon 'verbrandt' waterstof in zijn kern (**kernfusie**). Zie ook het kader op de volgende pagina.

Hieronder: de beste foto die we van Pluto hadden tot vlak vóór de passage van de ruimtesonde New Horizons, op 14 juli 2015, was van de Hubble Space Telescope.

Midden: Pluto, gefotografeerd door New Horizons.

Rechtsomder: Pluto's maan Charon, ook op 14 juli 2015.



Eindselectie

Dan was er nog ruimte voor zes objecten. Ik heb vrij lang nagedacht over de eindselectie. Nam ik gewoon de (voor zover bekend) grootste objecten? Of richtte ik me op de objecten die iets toevoegen aan het schaalmodel? Ik koos uiteindelijk voor het laatste: op objecten die als voorbeeld dienen van objecten met verschillende banen in de Kuipergordel (Quaoar en Orcus), omdat ze een gebied afbakenen (zoals Salacia de binnenkant netjes aangeeft en 2002 AW197 dat voor de buitenkant doet), of omdat ze erg ver weg staan (2007 OR10 en Sedna).

Ik ben zeer tevreden met de samenstelling van de sets. Mocht er iets veranderen, zoals de ontdekking van een nieuw groot object, kan ik extra kaartjes op de website plaatsen! Zie onder *Extra kaartjes*, in het kader op de vorige pagina.

Pluto

In 2006 werd Pluto geschrapt als negende planeet en werd hij een lid van de nieuwe klasse van dwergplaneten. Daar is erg veel over te doen geweest, vooral in de VS, waar zelfs nu nog astronomen erg emotioneel zijn over deze 'degradatie'. Overigens is Pluto zelf natuurlijk nog steeds dezelfde ijswereld. Wat is er aan de hand?

Hoewel Pluto na zijn ontdekking in 1930 veel te groot werd geschat (zo groot als de aarde) bleek zijn diameter in 1978 ongeveer twee-derde die van onze maan te zijn! Daarnaast heeft Pluto een langgerekte baan met een grote *baanhelling* (17°), en weten we al langer dat Pluto met Neptunus in een 2:3 *baanresonantie* zit, door de zwaartekracht van de grote planeet. Al met al werd het steeds moeilijker om vol te houden dat Pluto bij de planeten hoorde. Misschien was het beter hem een grote *planetoïde* te noemen.

Overigens is Pluto's maan Charon erg groot in verhouding tot Pluto, en sommigen noemen het Pluto/Charon-stelsel wel een **dubbeldwergplaneet**.



Geen planeet meer

Maar Pluto was de enige van zijn soort: een redelijk grote ijswereld in een baan om de zon. Dat was... tot in 2005 de ontdekking bekend werd gemaakt van het object dat we nu Eris noemen. Dit object staat nog verder weg van de zon, heeft een nog grotere baanhellings en men dacht toen dat hij groter was dan Pluto. Een tiende planeet? Maar als er nog meer van die grote objecten zouden worden gevonden (wat inderdaad is gebeurd)? Dan zouden we er wel heel veel nieuwe planeten bij krijgen! Zoiets hadden we in de 19e eeuw al meegemaakt (zie kader).

Definities

Na enkele roerige vergaderingen besloot de International Astronomical Union (IAU) in augustus 2006 dat er een nieuwe klasse van **dwergplaneten** moest komen. Pluto, Eris en Ceres waren de eerste, in het najaar van 2008 gevolgd door Makemake en Haumea.

Wat is nu een planeet en wat een dwergplaneet? Een planeet is nu een object dat:

1. Om de zon beweegt.
2. Voldoende massa heeft om door zijn eigen zwaartekracht een bolvorm gekregen te hebben.
3. Zijn baan domineert (zie hieronder), dus daar geen andere grote objecten toestaat.

Een dwergplaneet voldoet aan de eerste twee voorwaarden maar niet aan de derde.

Domineren

Wat betekent dat: *zijn baan domineren*? Het wil zeggen dat er geen andere grote objecten in dezelfde baan bewegen. We hebben het dan niet over manen, want die bewegen rond een (dwerg-) planeet en worden dus per definitie gedomineerd. Kleinere objecten worden in bepaalde gevallen wel 'getolereerd' in dezelfde baan (zie *Lagrangepunten*, op pagina 6).



Overzicht zonnestelsel

Opbouw en vorming van het zonnestelsel

Een kort overzicht

In *Genieten van het zonnestelsel* beschrijf ik uitgebreid welke gebieden men onderscheidt binnen het zonnestelsel. Daarin vind je ook een paginagrote illustratie, in vijf stappen.

Binnenste en buitenste zonnestelsel

We spreken van het binnenste zonnestelsel, met de aardachtige (of rots-) planeten Mercurius, Venus, Aarde en Mars (qua samenstelling kunnen we daar de maan bij rekenen), en het buitenste zonnestelsel, met de reuzenplaneten Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Buiten het gebied van de reuzen zijn echter nog veel meer objecten.

De **aardachtige planeten** zijn de kleinste planeten maar hebben wel een grotere **gemiddelde dichtheid**: de massa per volume (in g/cm³ of kg/liter). Heel in het kort: metalen hebben een hogere dichtheid, de dichtheid van silicaten (veel voorkomende mineralen, gesteenten) is lager, die van water is 1 en die van gassen is kleiner dan 1 (zie kader). De reuzenplaneten zijn wel veel groter maar hebben een lagere dichtheid, dus in verhouding minder massa.

De scheidingslijn tussen het binnenste en buitenste zonnestelsel is de **vorstlijn**, de afstand tot de zon waarop in het vroege zonnestelsel stoffen als water, ammoniak, methaan konden condenseren. Die stoffen noemen astronomen **ijzen**, omdat ze op die afstanden tot de zon alleen als ijs voorkomen.

Vorming van de planeten

Het is belangrijk om te weten dat de **zonnenevel** (zie kader) voor 0,6% uit metalen en silicaten en voor 2,5% uit **ijzen** bestond. De rest, bijna 97%, was waterstof en helium. Het is dus logisch dat de rotsplaneten klein bleven (ze ontstonden uit slechts 0,6% van het beschikbare materiaal). Voor de reuzen was vijf maal zoveel materiaal voorhanden (zowel ijzen als silicaten en metalen), terwijl de snelst groeiende planeten, Jupiter en Saturnus, ook nog eens bijna onbeperkt konden groeien door gassen op te nemen.

Dan worden ook de verschillen in **dichtheid** duidelijk. In de gloeiendhete **protoplanetaire schijf** (zie kader), de schijf van gas en stof waaruit het zonnestelsel ontstond, was alles in gasvorm. Pas toen het materiaal kon **condenseren** (stollen) kon de vorming van de planeten beginnen. De vorstlijn was daarbij bepalend:

- Binnen de vorstlijn was het zo heet dat alleen metalen en silicaten er konden condenseren. Zo kwam het dat de rotsplaneten en de maan bestaan uit metalen (ijzer en nikkel in de kern) en silicaten (in de mantel en de korst).
- Voorbij de vorstlijn konden de ijzen condenseren. Waterstof en helium, waaruit de zon bestaat (84% waterstof en 16% helium), konden nergens condenseren (zie *Kelvin*, kader). Zo konden vooral Jupiter en Saturnus bijna onbeperkt groeien door alle ijzen die daar waren. Toen Jupiter en Saturnus 10 maal zo zwaar waren geworden als de aarde nu is konden ze ook waterstof en helium opslokken, zodat we deze planeten **gasreuzen** kunnen noemen.
- Door hun grotere afstand visten Uranus en Neptunus achter het net: hun grote 'broers' hadden het al het gas al ingepikt. Uranus en Neptunus zijn daardoor kleiner gebleven en bevatten voornamelijk ijzen en weinig gassen. Daarom vind ik zelf de naam **ijsreuzen** beter voor die twee planeten.

Het gebied van de vier reuzenplaneten wordt afgebakend door Jupiter, die met zijn enorme zwaartekracht de objecten in de *Planetoïdengordel* op hun plek houdt, en Neptunus die op dezelfde manier de *Kuipergordel* 'bestiert'. Beide reuzen bepalen waar kleine objecten hun banen mogen hebben. Sommige banen blijven zo leeg.

De kleine werelden

Ook de kleinere zonnestelselobjecten, zoals planetoïden en ijsdweren (in het Engels 'minor planets') bewegen in min of meer afgebakende gebieden rond de zon. Na de planeten komen, als je naar grootte en massa kijkt, eerst de zeven grote **satellieten**, of **manen**: onze maan, Io, Europa, Ganymedes en Callisto (Jupiter), Titan (Saturnus) en Triton (Neptunus). Pas daarna komen de dwergplaneten Pliuto en Eris.

De Planetoïdengordel

De *planetoïden* vinden we rond de vorstlijn, in een cirkelvormig gebied met de vorm van een autobinnenband (auto's hadden vroeger binnenbanden...), of een donut: op schaal is hij 2,35 m diep (van 3,15 tot 5,5 m van de zon) en ongeveer 1,5 m dik. Zo'n donutvormige schijf rond een ster noemen we een **gordel**. Zie de tekening linksonder op de volgende pagina.

De Kuipergordel

Voorbij Neptunus vinden we een andere gordel, de *Kuipergordel*. Die vinden we in het schaalmodel vanaf 45 m (de afstand Zon-Neptunus) tot ca. 82 m. Hij is ook erg dik: ruim 20 m! De Kuipergordel is verder onder te verdelen naar de vorm en de helling van de banen van de objecten (zie het overzicht hierna).

Zonnenevel

De zon en de rest van het zonnestelsel ontstonden uit een enorme gas- en stofwolk, de **zonnenevel**, die op een zeker moment in elkaar ging storten (door een supernova in de buurt of door een 'passerende' ster). Doordat de zonnenevel kromp werd hij steeds warmer (zoals in een fietspomp de lucht warmer wordt als je je band oppompt).

De wolk draaide rond en doordat hij kromp ging die rotatie steeds sneller. Denk maar aan een kunstschaatsster die een pirouette maakt en zich kleiner maakt door haar armen dicht bij haar lichaam te brengen: zij gaat sneller ronddraaien! We noemen dat de **Wet van behoud van impulsmoment**. Het gevolg was dat de zonnenevel afgeplat werd, door de steeds snellere rotatie, en een schijf vormde: de **protoplanetaire schijf**. Om die reden bewegen de acht planeten ongeveer in hetzelfde vlak rond de zon: het **vlak van de ecliptica** (zie pag. 10).

Kelvin

Kouder dan -273,15°C kan het nergens zijn. We noemen dat het absolute nulpunt. Hier is ook een nieuwe eenheid aan gekoppeld: kelvin of K. Het absolute nulpunt is dus 0 K. De ruimte is ontzettend koud, maar niet zo koud: het is er minstens 2,7 K. Waterstof en helium worden pas **vloeibaar** bij resp. -253°C en -269°C (20 en 4 K) - bij 1 atm druk! In de ruimte ligt die temperatuur voor helium zelfs op 1 K! Deze gassen kunnen dus nooit in de vrije ruimte vloeibaar worden. Dat kan pas bij een druk van minstens 20 atm zoals je binnen in grote planeten hebt.

Astronomische Eenheid

Afstanden in kilometers leiden tot erg grote getallen: de afstand tot Eris, bijvoorbeeld, is gemiddeld 10 152 336 385 km.

Om die reden gebruiken we in het zonnestelsel en onmiddellijke omgeving de **Astronomische Eenheid** (AE): 1 AE is gelijk aan de afstand van de aarde tot de zon, of wel zo'n 149,6 miljoen km. Eris staat dan gemiddeld op 67,86 AE.

Linksonder: de jonge ster Wega heeft ook een planetoïdengordel, met daarbinnen warm en daarbuiten koud gebied. Illustratie NASA.



Overzicht zonnestelsel

Lagrangepunten

Er zijn twee punten rond welke (veel kleinere) objecten in dezelfde baan als een object (zoals een planeet) kunnen bewegen: de Lagrangepunten L4 en L5. Dit is in 1772 berekend door de Franse wiskundige Lagrange. Er zijn drie andere punten: L1, L2 en L3. Dat zijn instabiele punten, waarin de baan van een object snel verandert. L1 ligt aan de kant van de planeet die naar de zon gericht is, L2 juist aan de andere kant van de planeet en L3 zelfs helemaal aan de andere kant van de zon.

De Lagrangepunten L4 en L5 liggen op ongeveer 60° vóór (L4) en achter (L5) de planeet. Dat betekent dat ze ongeveer de halve afstand Zon-Neptunus vóór de planeet uit, of achter de planeet aan bewegen (ruim 2,3 miljard km).

Jupiter heeft ruim 2000 van dergelijke Trojanen (maar dan van planetoiden, voor een groot deel bestaande uit gesteenten en metalen).

Zie de illustratie **rechtsonder**.

Linksonder: een tekening van de Kuipergordel, uit Genieten van het zonnestelsel. Let op: een ellips in de (tweedimensionale) tekening kan een cirkel zijn die je van opzij ziet! Haumea zit op de oranje lijn.

Rechtsonder: de vijf Lagrangepunten in planeetbanen. De L1 en L2 punten liggen bij de aarde op 1,5 miljoen km afstand. Veel ruimtetelescopen worden in dat L2 punt geplaatst, zoals de Gaia en de James Webb Space Telescope (de opvolger van de Hubble). De Gaia, gelanceerd in december 2013, is een ruimtetelescoop die een miljard sterren en andere objecten in kaart moet brengen.

De Oortwolk

Nog verder weg vinden we de *Oortwolk*, die bestaat uit twee delen. De **Binnenste Oortwolk** is eigenlijk een donutvormige ring die zich uitstrekt van de Kuipergordel (ca. 55 AE) tot ongeveer 20.000 AE van de zon.

Het verst weg vinden we een bolvormige wolk, de **Buitenste Oortwolk**, van 20.000 tot zeker 50.000 AE (en mogelijk zelfs 125.000 AE) van de zon. Zie de kaartjes voor de afstanden op schaal. Het zou goed kunnen dat sterren in de buurt ook Oortwolken hebben en dat die Oortwolken elkaar overlappen. De storingen die daardoor ontstaan kunnen langperiodieke kometen in de richting van de zon sturen, of naar een andere ster!

TNO's en CNO's

Objecten met banen die voorbij die van Neptunus liggen noemen we **Trans-Neptunische Objecten**, of **TNO's**. Dat *trans* betekent *voorbij*. Ook de Kuipergordel ligt in dat gebied.

De objecten in de Kuipergordel, de **Kuiper Belt Objects (KBO's)**, kunnen door de zwaartekrachtinvloed van Neptunus uit hun baan gegooid worden en dan ook in de richting van de zon gestuurd worden: **Cis-Neptunische Objecten (CNO's)**; *cis* betekent *aan onze kant*.

We kennen twee soorten CNO's: **Centaurus** en **Neptunus-Trojanen**. Centaurus zijn ijsdweren in het gebied van de reuzenplaneten, met langgerekte banen. Hun banen zijn niet stabiel want ze worden door de grootste planeten beïnvloed. Uiteindelijk zullen ze in het binnenste zonnestelsel terecht komen en als ze niet met de planeten of de maan botsen eindigen ze in de zon. Het zijn er, voor zover wij nu weten, niet zo veel. Gelukkig. Chariklo (kaart 20) is een Centaur.

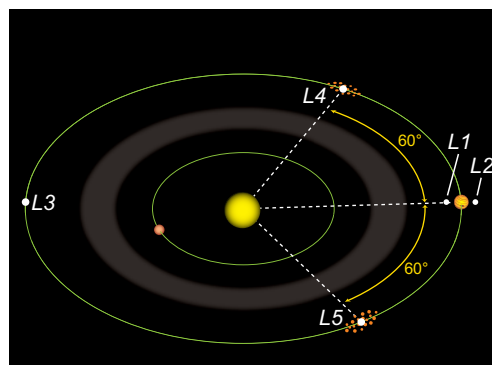
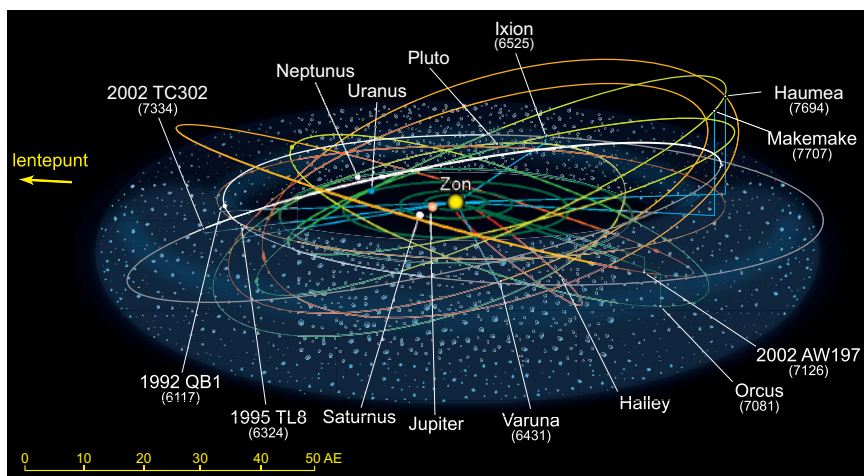
De Neptunus-Trojanen zijn ijsdweren die al heel lang bij Neptunus horen. Er waren er in 2015 dertien bekend. Wat bijzonder is: ze hebben dezelfde baan als Neptunus! Kan dat dan? Ja, er zijn twee punten waarin dat soort objecten stabiele banen kunnen hebben (zie kader).

Voorbij Neptunus

De TNO's worden verder onderverdeeld naar hun banen (hoewel dat niet altijd gemakkelijk is). Zo krijgen we dit overzicht:

1. Kuipergordel

- De **klassieke KBO's** (tussen ca. 6,2 en 7,2 miljard km – op schaal 62-72 m). Deze bewegen in nette, bijna cirkelvormige banen (de meeste weinig geheld), wat aangeeft dat ze nauwelijks worden beïnvloed door Neptunus. Voorbeelden zijn Make-make, Quaoar en Salacia.
- De **resonerende KBO's** zijn KBO's die wel zijn gevangen door de zwaartekracht van Neptunus, waardoor ze langgerekte (dus excentrische) en flink gehelde banen hebben. Er zijn diverse *resonanties* mogelijk:
 - 2:3 resonantie, de *plutino's*, zoals Pluto, Orcus en Ixion (beschikbaar als *extra kaartje*); ze hebben *omlooperperioden* ('jaren') van ongeveer 250 jaar. Overigens noemt men dwergplaneten voorbij de baan van Neptunus ook **plutoïden**.
 - 2:1 resonantie, de *twotino's*, vanwege die '2:1'; er zijn geen bekende KBO's tussen. Hun banen zijn minder stabiel dan die van de plutino's, zodat er meer verdwenen zijn. Ze hebben omlooperperioden van ongeveer 330 jaar. Het gebied van de twotino's wordt gezien als de buitengrens van de Kuipergordel. Bij de set MDL-ZS3 zit een gratis kaartje voor twotino's.
 - 2:5 resonantie, waarvan als grootste bekende 2002 TC302 (zie *Scattered Disc*, hieronder); ze hebben omlooperperioden van ongeveer 410 jaar.
 - 4:7 resonantie, waarvan als grootste (bekende) 1999 CD198 (beschikbaar als *extra kaartje*); ze hebben omlooperperioden van ongeveer 410 jaar.
 - 3:1 resonantie, waarvan als grootste (bekende) 2007 OR10; ze hebben omlooperperioden van ongeveer 550 jaar.
- Verder zijn er veel andere resonanties mogelijk.



een uniek planetenpad

2. Scattered Disc

De Scattered Disc is een andere gordel rond de zon, maar deze noemt men een schijf, een enorme, miljarden km dikke schijf rond de zon. Hij strekt zich uit van middenin de Kuipergordel tot in de Oortwolk (ruwweg van 5 tot 15 miljard km - op schaal 50 tot 150 m, en meer dan 100 m dik!).

Objecten in die schijf worden **Scattered Disc Objects** genoemd: **SDO's**. Deze zijn als het ware verbannen uit de Kuipergordel. Het woord *scattered* betekent *uiteengejaagd*, hoewel de schijf in het Nederlands *Verstrooide Schijf* wordt genoemd. Hoe is dat gekomen?

Voorbij de rand van de Kuipergordel, waar de twotino's bewegen, worden TNO's door baanresonanties met Neptunus zo verstoord dat zij zeer instabiele banen krijgen. Die banen worden erg excentrisch en sterk geheld, zodat ze uit de Kuipergordel gestuurd worden, in alle richtingen: *scattered* dus.

Men denkt nu dat centaurs eigenlijk SDO's zijn die door Neptunus naar het gebied van de grote planeten zijn gejaagd. Bekende SDO's zijn de dwergplaneet Eris, de grote TNO 2007 OR10 en de kleinere 2002 TC302 (alle drie zijn ook in resonantie met Neptunus).

3. Detached objects

Detached objects ('losse objecten') zijn objecten die zo ver weg zijn dat ze niet meer worden beïnvloed door Neptunus. Er zijn ook andere benamingen voor dit soort objecten, zoals bijvoorbeeld *Extended Scattered Disc Objects*: *E-SDO*.

Hun banen zijn erg langgerekt, met *perihelia* tussen 40 en 52 AE, en *aphelia* van 64 tot ruim 260 AE. Er zijn (in 2021) negen Detached Objects met zekerheid bekend. Daarnaast zijn er zo'n 60 objecten die waarschijnlijk DO's zijn. De grote zijn in de orde van 300 tot 800 km diameter, maar die afmetingen zijn erg onzeker. Sedna is een twijfelgeval: is het een Detached Object of een OCO? Of een object van een eigen klasse, een *Sednoïde* (zie hierna)? Daaruit blijkt maar weer hoe lastig het is die verre objecten te classificeren. Zeker is dat een object dat weggejaagd is uit de Kuipergordel er ook weer naar kan terugkeren, of nog dichter bij de zon kan komen.

Sednoïden

Zeker is dat de Sednoïden speciaal zijn, als onderdeel van de Detached Objects of als een aparte groep. Ik vermeld ze hier maar als aparte groep. Er zijn drie officiële sednoïden, Sedna, 2012 VP113 en Leleākūhonua (die laatste zit gratis bij de set MDL-ZS3). Zij hebben hun *perihelia* op ongeveer 80 AE (op schaal 120 m) en een gehelde baan die ze voornamelijk onder het vlak van de *ecliptica* voert, in dezelfde richting. Hun perihelia liggen dus ook aan dezelfde kant van de zon (zie verder onder Planet Nine).

Oort Cloud Objects

Objecten in de Binnenste Oortwolk noemen we *Oort Cloud Objects*, of **OCO's**. Ook zij hebben een erg excentrische en sterk gehelde baan maar daaraan zijn de planeten niet schuldig. Hoeveel grote objecten er in de Oortwolk zijn is niet bekend, maar mogelijk zitten er grote tussen, zo groot als een planeet. Het volgende stukje laat zien dat we nog lang niet klaar zijn met het onderzoek van het zonnestelsel.

Sedna werd als OCO gezien maar hij is nu ook in de aparte klasse van *Sednoïden* gezet. Een andere OCO is 2000 CR105 (265 km), maar die wordt óók als Detached Object gezien. Er zijn nog enkele objecten in dat gebied bekend.

Nederlandse astronomen

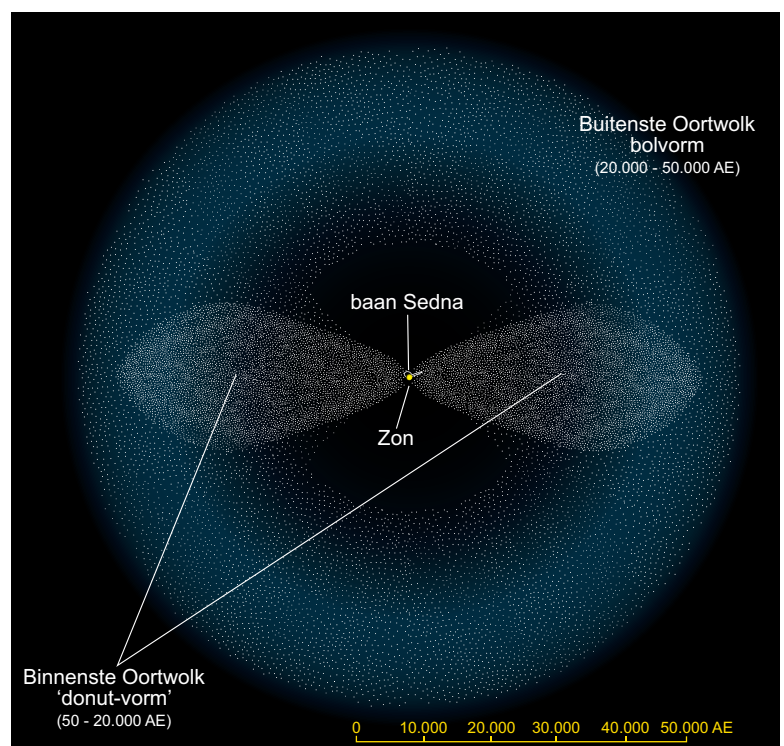
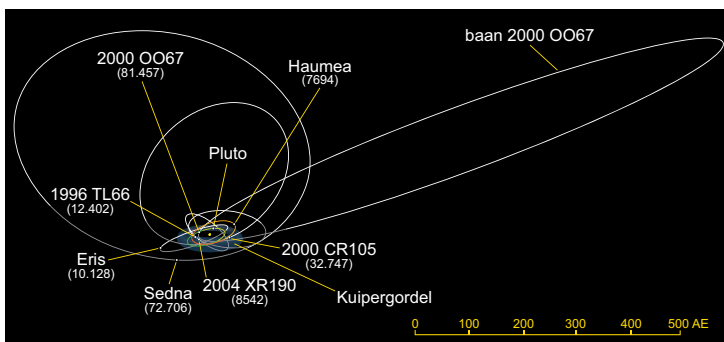
De Kuipergordel en de Oortwolk zijn vernoemd naar Nederlandse astronomen!

In de twintigste eeuw ging men nadenken over kometen. Men ging er toen al vanuit dat kometen bestaan sinds de vorming van het zonnestelsel, miljarden jaren geleden. Als een komeet in de buurt van de zon komt verliest hij veel gas en stof, waaruit zijn staart wordt gevormd. Als een komeet dat een aantal malen heeft gedaan heeft hij geen materiaal meer over om een staart te vormen en is het een 'dode' komeet geworden. In miljarden jaren zouden kometen dus allang op moeten zijn! Toch was er regelmatig een nieuwe, actieve komeet te zien.

(vervolg op pagina 8)

Linksonder: een tekening van de banen van enkele objecten in de Binnenste Oortwolk, uit een serie in het boek *Genieten van het zonnestelsel*. De baan van Pluto is aangegeven om dit plaatje te kunnen vergelijken met die van de Kuipergordel op de vorige pagina.

Rechtsonder: een tekening van de Buitenste Oortwolk, de vijfde uit de serie 'Overzicht van het zonnestelsel'. Dit is een dwarsdoorsnede, de Oortwolk is een bolvormige wolk van ijsobjecten. Deze is minstens 50.000 AE in diameter, maar misschien zelfs 125.000 AE.



(vervolg van pagina 7)

In 1950 kwam de Nederlandse astronoom Jan Hendrik Oort met een verklaring. Volgens hem zouden er op een enorme afstand van de zon miljarden komeetkernen moeten zijn, zo ver weg dat de warmte van de zon er nauwelijks invloed heeft. Kometen kunnen uit alle richtingen komen, niet alleen uit het vlak van de ecliptica, waarin de planeten bewegen. Dat zou alleen kunnen worden verklaard als er een grote, bolvormige wolk rondom de zon is (dus een bol met de zon in het middelpunt). Het was ook een prima verklaring voor het feit dat er blijkbaar een bijna oneindige voorraad komeetkernen is: naar schatting 1000 miljard!

(vervolgd op pagina 9)

Linksonder: de banen van de zes TNO's en de mogelijke baan van de voorsnog hypothetische negende planeet. Je ziet dat de banen van de zes in dezelfde richting wijzen.

Rechtsboven: een artist impression van Planet Nine.

Tweede van boven: Mike Brown (!) en Konstantin Batygin.

Derde van boven: vergelijking van de mogelijke diameter van Planet Nine met die van de aarde en Neptunus.

Rechtsonder: het zonnestelsel is een buitenbeentje vergeleken met de planetenstelsels die wij nu rond andere sterren kennen. Je ziet dat de meeste exoplaneten die wij nu kennen een massa hebben tussen die van de aarde en die van Neptunus, terwijl het zonnestelsel die niet heeft. Of toch?

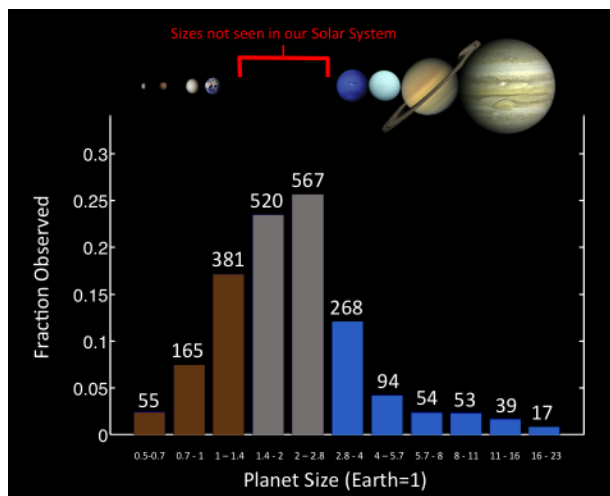
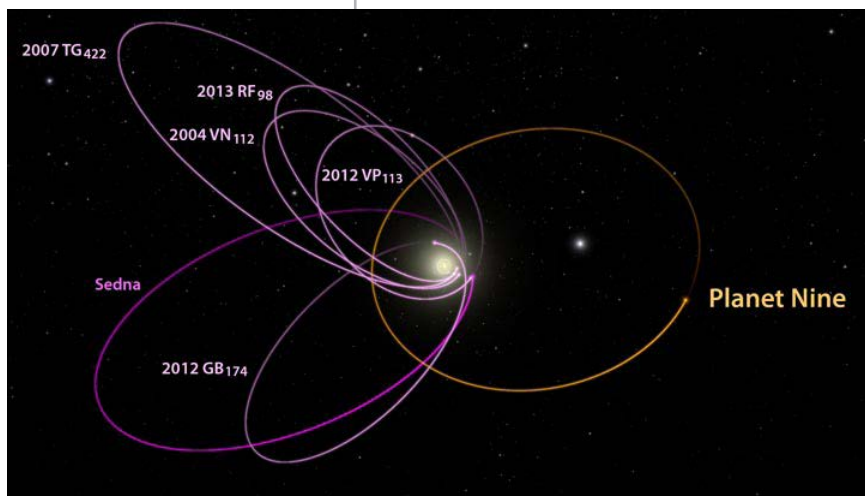
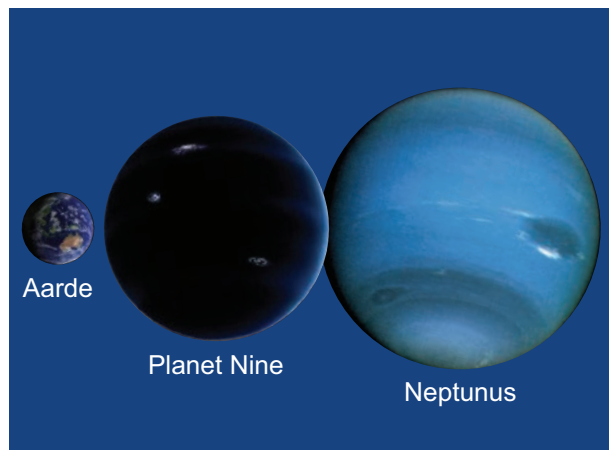
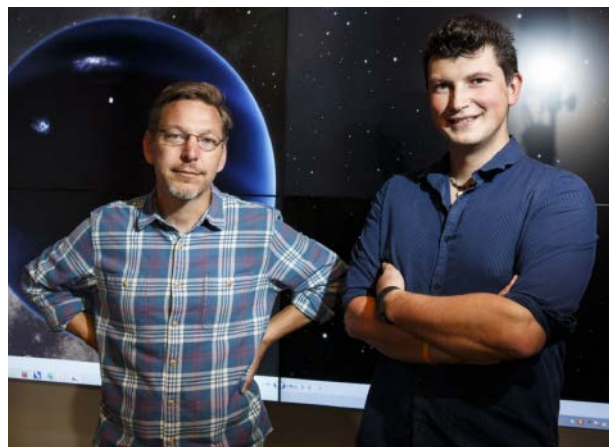
Planet Nine

Een negende planeet?

Men heeft nog drie *Sednoïden* gevonden, alle met een baan in dezelfde richting als Sedna en 2012 VP113, maar dan naar een punt boven het eclipticavlak wijzend (ze bewegen voornamelijk boven dat vlak). Alle zes hebben hun *perihelium* dus aan dezelfde kant van de zon. Ik noem ze ook maar Sednoïden maar ik weet niet zeker of we ze zo zouden moeten noemen. Als die situatie toevallig zo zou zijn ontstaan (een kans van 1:15.000) zou die nooit erg lang hebben kunnen duren. Er moet iets anders aan de hand zijn. Dat kunnen bijvoorbeeld *baanresonanties* zijn, veroorzaakt door een verre, grote planeet!

Met hulp van de computer

Mike Brown en zijn collega Konstantin Batygin gingen in 2014, na de ontdekking van 2012 VP113 en andere, soortgelijke objecten, nadenken over een hypothetische planeet die de zes TNO's zo netjes in hun banen zou houden. Ook al vonden ze zo'n planeet zelf onwaarschijnlijk. Ze lieten de computer zeer veel mogelijkheden uitrekenen, steeds met een iets andere baan, afstand en massa van de denkbeeldige planeet. De computermodellen die overeenkwamen met wat wij zien wijzen op een soort kleine Neptunus in een baan op een enorme afstand: in het schaalmodel tussen 300 en 1800 m! Deze 'Planet Nine' zou een baan hebben die 30° geheld is t.o.v. het *eclipticavlak*, en tegengesteld aan de Sednoïden (zijn *perihelium* ligt dus aan een kant van de zon die tegenover de perihelia van de TNO's ligt). Verder moet de planeet rond *aphelium* zijn als de kleine objecten rond hun perihelium zijn. Dat laatste is nu het geval (die kleintjes zijn rond perihelium) dus als er een Planet Nine bestaat is hij heel ver weg, en dus slecht te ontdekken (zeker als hij toevallig in de richting van de Melkweg staat). Op de website staat een *extra kaartje* voor de hypothetische planeet, en ook via *Rob's Nieuwsbrief* kun je op de hoogte blijven.



Een 3D model maken

Zelf knutselen

Knikker, kopspeeldjes en...

Nog leuker en mooier dan een schaalmodel in kaartjes is een schaalmodel dat bestaat uit echte modelletjes, uit bolletjes. Op basis van de informatie op de kaartjes is dat prima te doen. Het lijkt met deze schaal misschien gemakkelijker gezegd dan gedaan, maar dat valt wel mee. Een schuifmaat is echter wel handig. En je zult merken dat je een obsessie kunt gaan ontwikkelen voor het verkrijgen van bolletjes en balletjes in alle maten...

Op deze *schaal* (1:100 miljard) is de zon 1,4 cm groot: zo groot als een gewone knikker! Jupiter en Saturnus zijn veel kleiner: 1,4 en 1,2 mm. Dat is ongeveer zo groot als de kop van een kleine kopspeeld, het soort dat je vindt in nieuw gekochte overhemden. Die zijn niet allemaal even groot, dus het moet geen probleem zijn twee te vinden die flink verschillen van grootte.

Bases

Je moet de modelletjes natuurlijk ergens op plaatsen. In mijn eerste schaalmodel op deze schaal gebruikte ik kubusjes van piepschuim (zie tekening). De knikker kun je daar op lijmen, de spelden en staal draadjes (zie hierna) steek je er zo in. Je kunt ook iets anders bedenken als basis voor de modellen. Je kunt er labels op plakken of lijmen met de namen.

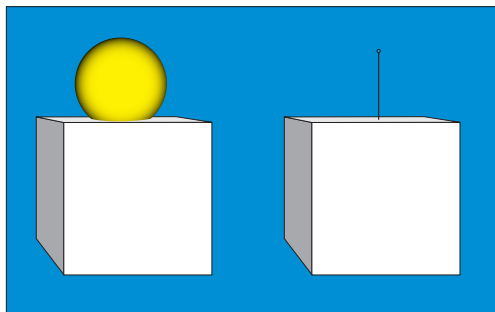
Kleinere objecten

Hoe maak je de kleinere objecten? Ik heb daarvoor heel dun staal draad gebruikt, zoals je kunt kopen op een rolletje. Het is verkrijgbaar vanaf 0,1 mm en dat soort draad wordt onder andere gebruikt voor kralenkettingen.

Een winkel waar je veel nuttige materialen voor schaalmodellen kunt vinden is Pipoos (pipoos.nl), met zo'n 40 vestigingen in Nederland.

Verder heb je hobbyverf nodig, in diverse kleuren: zwart, wit, blauw, geel, donkerrood, roestrood, grijsbruin. Je kunt verf op terpentijn-basis gebruiken (Humbrol, Revell) of op water-basis (acryl).

Je wilt de bolletjes natuurlijk ongeveer zo hoog hebben als de twee kopspeeldjes, dus knip stukjes staal draad af die lang genoeg zijn om in het kubusje te steken, en er nog voldoende bovenuit te steken.



Strijk de draadjes eventueel recht met een mes of iets dergelijks.

Schilder of spuit nu alle staal draadjes mat zwart (er is matzwarte grondverf!). Als ze droog zijn kun je ze in de kubusjes steken.

Dopen

Vervolgens ga je de planeetmodelletjes maken door de uiterste puntjes van de draadjes in de verf te dopen, heel voorzichtig. (Denk erom de verf heel goed te roeren.) Het gaat echt om een klein puntje en daarvoor kun je het beste een dun laagje verf op een schotel druppelen. Als verf neem je natuurlijk de juiste kleur: rood voor Mars, blauw voor de aarde, Uranus en Neptunus, wit voor Venus, donkergrijs voor de maan en Mercurius. Voor de kleinere hemellichamen kun je het beste het boek *Genieten van het zonnestelsel* raadplegen want daarin staan heel veel foto's.

Uranus en Neptunus zijn groter dan de aarde, en de aarde weer groter dan de maan. Hoe maak je een bolletje groter dan de andere bolletjes? Dat is niet moeilijk: door het puntje vaker in dezelfde kleur verf te dopen. Zorg er wel voor dat het eerste verlaagje goed droog is want anders vervormt het bolletje.

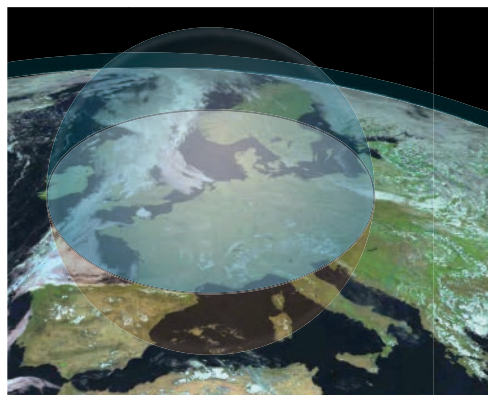
Perfekte grootte?

Het maakt niet zoveel uit of het bolletje perfect de juiste afmeting heeft, want het gaat om het effect van een heel klein bolletje op de juiste afstand. Niemand kan goed zien of een bolletje 0,05 mm is, of 0,1 mm...

Andere sterren

Je kunt ook sterren in de buurt in je schaalmodel opnemen. Dat wordt een kwestie van twee grote knikkers, enkele normale knikkers, en een hele rits kopspeeldjes.

Sirius en Procyon zijn knikkers van ongeveer 2,8 cm groot (zo groot als grote knikkers, of neus weer eens rond bij een Pipoos). De sterren van Alfa Centauri zijn ongeveer zo groot als de zon (Alfa Cen A is 17 mm, Alfa Cen B is 11 mm). De meeste sterren zijn echter kleine rode dwergen (zie kader).



(vervolg van pagina 8)

We noemen die kometenwolk nu de Oortwolk (in het Engels Oort Cloud). Pas in 2000 werd het eerste object gevonden dat vermoedelijk uit de Oortwolk komt (OCO's, zie pagina 7).

In 1951 schreef de tot Amerikaan genaturaliseerde Nederlandse astronoom Gerard Kuiper in een wetenschappelijk tijdschrift dat er volgens hem in het vroege zonnestelsel een soort schijf moest zijn geweest, bestaande uit zeer veel kleine objecten. Waarschijnlijk waren het planetesimalen die daar geen planeten hadden kunnen vormen, omdat het gas en stof er te ijel was geweest. Hij stelde voor dat veel periodieke kometen, die we in een afgeplat gebied rond de zon zien, uit deze schijf afkomstig moesten zijn. Hij ging er echter van uit dat die schijf niet meer bestond. Vanaf 1988 ging men de hypothetische schijf de Kuipergordel noemen.

Rode dwergen

De meeste sterren zijn klein, donker en koel, en daardoor rood van kleur: rode dwergen. Het is zelfs zo dat in onze omgeving 80 tot 85% van alle sterren rode dwergen zijn. De meeste zijn anderhalf maal zo groot als Jupiter (in diameter), hoewel ze veel meer massa hebben (dus compacter zijn). Jupiter had 80 maal meer massa moeten hebben om een ster te kunnen worden. Dat betekent dat we voor rode dwergen flinke kopspeeldjes kunnen gebruiken, met kunststof koppen (die zijn er met een rode kop!).

Linksonder: van piepschuim kun je blokjes snijden, en die gebruiken om de modelletjes op te plaatsen.

Rechtsonder: het kaartje '16 - En verder...' over sterren in de buurt' vertelt onder andere dat er in een straal van 1000 km rondom de kaart van de zon in dit schaalmodel slechts 23 sterren zijn te vinden. Dit plaatje laat zien hoe groot die bol is: 1000 km de ruimte in (hier blauw; het ISS beweegt op ca. 410 km hoogte); 1000 km de aarde in (bruin gekleurd), en van de westkust van Ierland tot de Baltische staten, en van Midden-Zweden tot het noorden van Spanje en Italië! Het laat ons goed zien hoe leeg het in het Melkwegstelsel is. Daarbuiten is het nog leger!

Achtergrondinformatie

Linksonder: een ellips heeft geen middelpunt maar twee brandpunten (F1 en F2). Alle banen in het zonnestelsel zijn elliptisch (met de zon in een van die brandpunten), maar sommige zijn bijna rond en andere erg langgerekt. In een ellipsbaan zijn twee uitersten te vinden: het perihelium (het punt dat het dichtst bij de zon ligt) en het aphelium (het verste punt). Zie verder de hoofdttekst.

Rechtsonder: de baanhellingen van de planeten en enkele andere objecten. Je ziet dat vooral verre, kleine objecten grote baanhellingen kunnen hebben (let op Eris: ruim 44°!).

Helemaal onderaan: als je de planeetbanen van opzij bekijkt zien zij er zo uit. Je ziet duidelijk een vlak waarin ze allemaal (ongeveer) bewegen. Je kijkt hier van een beetje bóven dat vlak dat we het **vlak van de ecliptica** noemen. Dat vlak is voor ons een soort referentie, waarmee we kunnen aangeven hoe scheef een baan is. Het denkbeeldige vlak wordt omsloten door een even denkbeeldige **ecliptica**. Dat is de 'weg' die de zon tegen de achtergrond van de verre sterren aflegt als gevolg van de beweging van de aarde op de zon. Denk je eens in dat je op een plein (tegen de wijzers van de klok) rond een lantaarnpaal loopt: je ziet dan de paal tegen een steeds weer andere achtergrond. Meer hierover lees je in het boek *Genieten van de sterrenhemel en de planisferen*.

Verklaring van begrippen

Perioden

Elke planeet, dwergplaneet, maan of ander object maakt twee bewegingen: een om zijn as en een om de zon of een planeet (of ander object want er zijn ook ijsdweren, planetoiden en zelfs kometen met een maantje).

De beweging om de as noemen we **rotatie**, en de periode die nodig is voor één rotatie is de **rotatieperiode**. De beweging van een object om de zon of planeet noemen we de **omloop**, (het **omlopen**), en de tijd die voor één rondje nodig is de **omlooperperiode**.

Binnenplaneten en binnenste planeten

We spreken over *binnenplaneten* als hun baan binnen die van de aarde ligt. Dat zijn alleen Mercurius en Venus. De *buitenplaneten* hebben hun baan verder van de zon dan de aardbaan: Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus.

Als we het hebben over de **binnenste planeten** bedoelen we de vier aardachtige planeten.

Een vlak

De acht planeten liggen wel aardig in één *vlak*: het vlak waarin de aarde om de zon beweegt. Het baanvlak van de aarde noemen we ook het **vlak van de ecliptica**. Het is een denkbeeldig (referentie-) vlak, niet iets dat je kunt aanraken. Je kunt je zo'n vlak voorstellen door de vloer als voorbeeld te nemen. Stel je voor dat de zon in het midden van de vloer ligt, en dat grote en kleine balletjes in mooie banen om die zon bewegen, rollend over de vloer. Dat geeft een goede voorstelling van planeten die in hetzelfde vlak om de zon bewegen (zie kader).

Alleen... Mercurius beweegt in een scheve baan, een die 7 graden helt ten opzichte van het vlak van de ecliptica (zie tekening rechtsboven). Dus Mercurius ligt meestal een beetje onder of boven de vloer, in het schaalmodel tot

7 cm eronder of erboven.

Alle planeten hebben een grotere of kleinere **baanhelling**, of **baaninclinatie**, zoals de tekening rechtsonder laat zien. Kleinere objecten kunnen grotere baaninclinaties hebben dan planeten: Pluto's baan is ca. 17° geheld.

Ellipsen

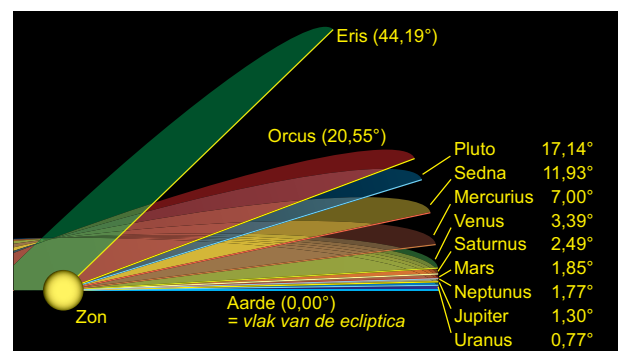
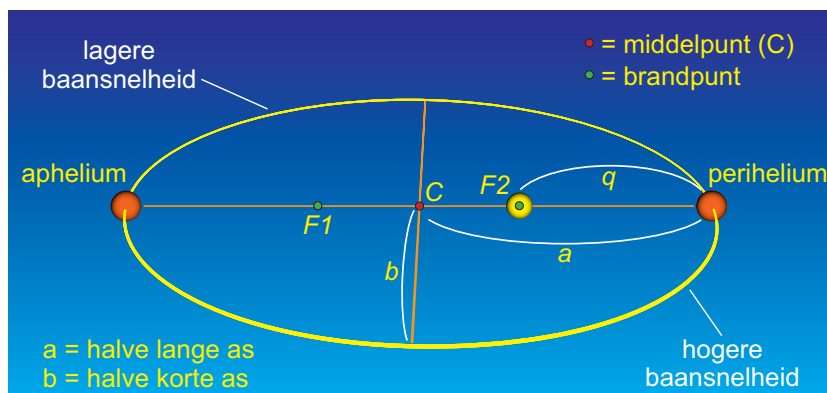
Verder zijn de banen van de hemellichamen niet netjes rond, maar minder of meer elliptisch. Pluto bijvoorbeeld, heeft een erg elliptische baan waardoor hij dicht bij de zon kan staan dan Neptunus (in het model 44,4 m, in 1989), maar op zijn verst op 73,8 m van de zon in het schaalmodel komt. Zie ook het kader en de tekening.

Een ellips heeft geen middelpunt maar twee **brandpunten**. De klassieke manier om ellipsen te tekenen is ook met twee spijkertjes of punaises en een touwtje met de einden aan elkaar geknoopt. Met de pen houd je het touwtje strak terwijl je de ellips tekent. Hoe verder die twee spijkers van elkaar af staan hoe langer en smaller de ellips wordt. Als je de spijkertjes vlak naast elkaar zet wordt het bijna een cirkel. Zonnestelselobjecten hebben een ellipsbaan met de zon in één van de brandpunten.

Een ellips heeft een lange en een korte as. De **lange as** is een lijn die door de brandpunten loopt en de twee tegenover elkaar liggende punten op de ellips met elkaar verbindt. De **korte as** staat daar loodrecht op en loopt door het midden van de lange as (zie de tekening). De halve lange as wordt ook vaak gebruikt (ook door mij) als gemiddelde afstand, hoewel dat niet helemaal juist is. Overigens geven de kaartjes de gemiddelde afstanden tenzij er iets anders bij staat.

Excentriciteit

De excentriciteit is de maat voor de afwijking van een zuivere cirkel. De excentriciteit (e) wordt gedefinieerd als $e = 1 - q/a$, waarbij q de



een uniek planetenpad

*perihelium*afstand is, en a de halve lange as (de gemiddelde afstand). Hoe groter de waarde die daaruit voortvloeit des te langgerechter de baan. Een cirkel heeft als waarde 0. Sedna heeft met 0,85491 een erg grote excentriciteit: zijn *aphelium* ligt op ongeveer 936 AE en zijn perihelium op 76 AE (op schaal 1400 m en 114 m).

Perihelium en aphelium

Of een planeetbaan nu weinig of juist erg elliptisch is, de afstand van de planeet tot de zon verandert tijdens een omloop. Het punt van een planeetbaan dat het dichtst bij de zon staat heet het **perihelium** (*peri* betekent *dichtbij*). Als een object door het perihelium gaat dan spreken we van een periheliumpassage. Het **aphelium** is het punt van de baan waarop de planeet het verst weg is van de zon (*apo* betekent *veraf*). Een planeet beweegt sneller om de zon als hij dichterbij onze ster staat, dus in zijn perihelium heeft hij de grootste baansnelheid; in het aphelium is de baansnelheid het laagst. Ook banen rond de aarde (perigeum en apogeum) en andere planeten (periapsis en apoapsis) hebben natuurlijk dat soort punten.

Baanresonantie

Als de omloopbanen van twee hemellichamen in een 'mooie' verhouding tot elkaar staan, zullen ze een regelmatige, periodieke zwaartekrachtinvloed op elkaar uitoefenen. Dat gebeurt vooral als de omlooperperioden een verhouding hebben die je kunt schrijven als een gehele breuk: 1:2 ('één op twee'), 2:3, 3:5 enz. In dat laatste geval beweegt het ene object drie maal om de zon in de tijd waarin het andere object dat vijf maal doet.

We noemen dat *baanresonantie* en het zorgt

voor een versterking van de wederzijdse aantrekkingskracht. Meestal leidt dat tot een situatie die niet stabiel is. Beide objecten zullen zó van baan veranderen dat de resonantie verdwijnt. Soms kunnen objecten echter in stabiele resonantie komen en blijven. Zo zijn drie manen van Jupiter, Ganymedes, Europa en Io, in een 1:2:4 resonantie (als Ganymedes één rondje om de planeet heeft gemaakt heeft Io er vier gedaan) en is er een stabiele 2:3 resonantie tussen Pluto en Neptunus.

Resonanties van de manen van Saturnus zorgen voor de scheidingen in de ringen en in de Planetoïdengordel zijn zones 'opgeschoond' door instabiele resonantie van Jupiter: de Kirkwood Gaps. Neptunus bestiert op dezelfde manier de Kuipergordel.

Een bijzonder geval is 1:1 resonantie, dus als twee hemellichamen dezelfde afstand tot de zon hebben. Dat is een erg instabiele situatie die de protoplaneten ooit hielp hun zone 'schoon te vegen', een voorwaarde om *planeet* te worden genoemd (zie pag. 4). Ceres en de planetoïde Pallas zijn in zo'n 1:1 resonantie maar zij zijn te klein om elkaar te beïnvloeden.

Afstanden

De afstanden in het zonnestelsel worden aangegeven in km, of in **Astronomische Eenheden** – AE. Een AE is de gemiddelde afstand van de aarde tot de zon: ongeveer 150 miljoen km. Op die manier kun je afstanden binnen het zonnestelsel met kleinere getallen aangeven. Zo is de afstand tot Neptunus ongeveer 4,5 miljard km: 30 AE. Pluto bevindt zich gemiddeld op 6 miljard km: 40 AE. De Oortwolk strekt zich uit tot misschien 125.000 AE!

Satellieten (manen)

De aarde heeft een **natuurlijke satelliet**: de maan. In 1609 ontdekte Galileo Galilei, die als eerste mens een telescoop gebruikte om de sterrenhemel te bestuderen, de vier grote satellieten van Jupiter: de Galileïsche satellieten. Later ontdekte men ze ook bij Saturnus en de andere planeten, en ging men ze manen noemen. Er zijn er nu (2021) ongeveer 220 bekend in het zonnestelsel.

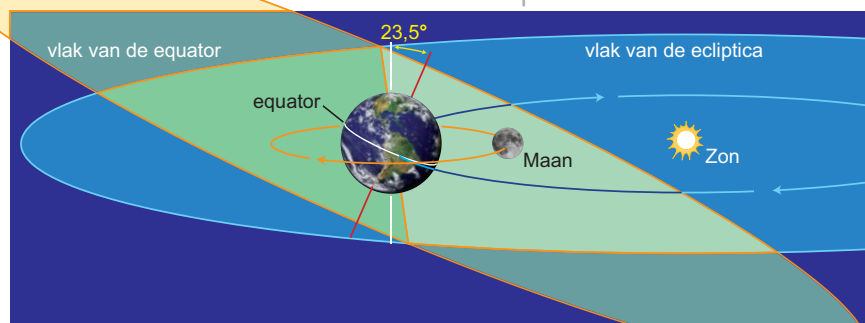
Linksonder: de vier Galileïsche manen zijn de grootste manen van Jupiter. Hier zie je ze op een collage van foto's die zijn gemaakt door de Voyagers 1 en 2 (in 1979). Van boven naar beneden zijn het Io, Europa, Ganymedes en Callisto. Dat is ook de volgorde in afstand tot de planeet (Io staat het dichtst bij van de grote manen). In de tekst kun je lezen dat drie manen in een 1:2:4 resonantie zijn.

Ganymedes is de grootste maan van het zonnestelsel. Net als Titan van Saturnus (de nummer 2 in grootte) is hij groter dan de planeet Mercurius! De kleine planeet heeft echter ruim twee maal zoveel massa als de grote satelliet.

Het leuke van zo'n foto is dat je ook kunt gaan kijken hoe ver ze van de planeet staan op deze schaal! Uitgaande van de grootte die ze hier hebben is Jupiter ruim 62 cm groot, en zijn de afstanden van de manen tot de planeet:

Io	184 cm
Europa	293 cm
Ganymedes	467 cm
Callisto	822 cm

Rechtsonder: naast het vlak van de ecliptica kennen we ook het vlak van de equator. Dat is het verlengde van de evenaar op Aarde. Doordat de aarde 23,5° scheef staat (daarom staat een aardglobe ook scheef) is het vlak van de equator ook 23,5° geheld ten opzichte van het vlak van de ecliptica.



Gebruik

Meetlinten

Je kunt het planetenpad niet opzetten zonder een meetlint. Of liever enkele meetlinten.

Die meetlinten zijn er in allerlei lengten (google maar eens op 'meetlint'). Ze zitten op een soort haspeltje zodat je ze snel kunt oprollen. Zelf heb ik jarenlang meetlinten van 30 m lengte gebruikt, maar nu heb ik er twee van 50 m waarmee ik het schaalmodel tot en met Eris goed kan uitmeten. Het is namelijk handig om de linten te kunnen laten liggen en op het juiste punt met de volgende te beginnen.

Hieronder: in mijn oudste opstelling heb ik de kaarthouders (zie kader volgende pagina) op blokjes hout geplakt (met dubbelzijdig plakband).

In die blokjes is een gat geboord (niet helemaal door het blokje heen) waarin een stuk draadeind van 1 m lengte wordt gestoken. De andere kant van het draadeind zit in een groter blok hout dat op de grond staat. Ook dat is niet door en door geboord.

Een extra gat in het grootste blok hout, dat wel door en door is geboord, biedt de mogelijkheid het blok met een penharing vast te zetten, tegen het omwaaien.

Rechtsonder: zo ziet de opstelling er dan uit.

Rechtsboven: ik bedacht een eenvoudigere en ook goedkopere oplossing met stokken en knijpers (zie de foto op pagina 2). Die stokken kun je in de grond duwen (je kunt beter eerst een gat maken met iets stevigs, een grote haring of iets dergelijks) en zo snel een planetenpad opzetten.



Het Planetenpad in de praktijk

Inleiding

Er zijn twee vragen als je begint met een planetenpad: waar en hoe zet ik het op, en wat doe ik er dan mee? De eerste vraag is logisch: de kaartjes moeten op de een of andere manier worden gepresenteerd zodat de doelgroep ze kan zien. De tweede vraag hangt af van wat je bedoeling is, wat je wilt bereiken met de doelgroep. Dus het gaat om:

1. Opstelling
 - Selectie kaartjes
 - Fysieke opstelling (paaltjes e.d.)
 - Locatie
2. Presentatie

Selectie kaartjes

Het is natuurlijk belangrijk om eerst een keuze te maken uit de kaartjes. Die keuze is afhankelijk van de lengte van het geplande pad (de lengte van de straat of de gang (op school), de ruimte in een park, enz. Maar de keuze wordt ook bepaald door wat je in beeld wilt brengen, de doelgroep (bij kleinere kinderen zou je het aantal objecten terugbrengen tot de zon, de planeten en bijv. Pluto). Je zult altijd een doel voor ogen moeten hebben: wil je gewoon een goed overzicht van het zonnestelsel geven, of heb je een specifiek doel, zoals het in beeld brengen van de buitenste gebieden van het zonnestelsel? Of zelfs een veel beperkter doel, zoals een nadere kennismaking met de Planetoïdengordel.

Locatie

De locatie moet de mogelijkheid bieden om het hele planetenpad goed te overzien, in een

kaarsrechte of iets gebogen lijn. Dat kan op het schoolplein zijn, in een lange gang op school of in een park. Het schaalmodel is afhankelijk van de beschikbare ruimte. Of beter 'lengte', want we hebben immers zojuist besloten het schaalmodel op één lijn op te stellen.

Die **lengte** moet minstens 45 m zijn, om het tot en met Neptunus op te zetten. Als er ruimte is zou ik echter zeker Pluto en enkele andere ijsdwerfen plaatsen omdat deze een goed beeld geven van buitenste gebieden van ons zonnestelsel. Pluto is ook nog heel populair, zeker bij de jeugd, en vertegenwoordigt een hele nieuwe klasse van hemellichamen: de *dwerfplaneten*.

Overigens kun je ook de afstanden verkleinen, bijvoorbeeld om het schaalmodel in een kleine ruimte op te hangen, maar bedenken dat dan de grootten ook niet meer kloppen!



een uniek planetenpad

Ideaal is het om een pad van 101 m lengte te kunnen gebruiken, zodat ook die andere grote dwergplaneet, Eris, present is.

Sommige kaartjes zijn onmogelijk op de juiste plek te zetten (zoals die van de Oortwolk en 'En verder...', over sterren in de buurt). Die kun je aan het eind van het pad plaatsen, en daar behandelen. Als je een presentatie of les geeft is het handig om voorbeelden bij de hand te hebben voor de afstanden: de Voyager 1 staat bij die kerktoeren, de dichtstbijzijnde volgende ster (Proxima Centauri) staat in Parijs, etc.

Opstellen

Maar hoe moet je de kaartjes plaatsen of op hangen? Dat hangt ook af van de situatie. In een gang van de school kan gebruik worden gemaakt van de standaardjes, zodat de kaartjes kunnen worden neergezet op tafels of stoelen, die op de goede afstanden zijn neergezet. Maar de kaartjes hebben ook een gaatje waarmee ze kunnen worden opgehangen, aan muren of plafonds.

Je kunt ze daarmee ook op latten of stokken prikken. Dat heeft grote voordelen omdat je die stokken in een grasveld in de grond kunt steken. Je bent dan niet afhankelijk van de plekken op muren. Verder is het een goedkope oplossing want je hebt alleen een aantal stokken nodig waarop je met houtlijm een knijper hebt gelijmd. Daarin kun je dan de kaartjes steken. Zie ook het achterblad van de sets.

Handige docenten zullen een eigen opstelling kunnen bedenken (zie kader).

Als je het planetenpad gaat opstellen met kinderen is het leuk om hen het meetwerk te laten doen. Dat is ook erg leerzaam!

Presentatie of les

Goed, je hebt het nu opgesteld, maar wat ga je ermee doen? Er zijn twee mogelijkheden: je laat de leerlingen of je publiek zelf langs de kaartjes lopen en de teksten lezen; of je geeft zelf een les of presentatie: 'een reisje door het zonnestelsel'.

Aan de eerste optie, dus mensen zelf het zonnestelsel laten verkennen, hoef ik hier geen aandacht te besteden, behalve dat het erg leuk is om (school-) kinderen in groepjes opdrachten te geven en vragen te laten beantwoorden.

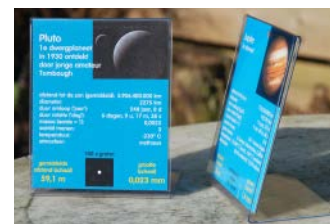
Wat vooral interessant is, is wat je met het planetenpad kunt doen in een les of een leuke presentatie voor familie, vrienden en buurtkinderen.



Kaarthouders

Om de kaartjes netjes en droog te houden kun je speciale PVC kaarthouders bestellen, een soort displays. Die hebben een vlakke bodem waarmee ze beter kunnen worden opgenomen in een mooie opstelling voor je planetenpad. Hieronder zie je een foto van deze kaarthouders. Zie ook:

- www.walrecht.nl/nl/
- Onze producten en folders
- Over het zonnestelselmodel
- Transparante displays voor kaartjes



Links: in mijn cursus 'Leer het heelal begrijpen', voor docenten van het basis- en voortgezet onderwijs en PABO's, zet ik de cursisten natuurlijk aan het werk. Ze mogen zelf het Planetenpad opstellen! En dat doen ze met veel plezier. Hier zijn cursisten van de eerste pilot bezig zo nauwkeurig mogelijk de paaltjes te plaatsen.

Linksonder: een andere foto gemaakt tijdens mijn cursus voor docenten. Je ziet hier duidelijk hoe ver de paaltjes reiken. Het pad is een beetje geknikt geraakt (dat is niet erg) en is ca. 80 m lang. Daarvoor moesten we het diagonaal uitzetten want dan heb je een groter pad ter beschikking. Op een pleintje achter de heggen in de verte zijn de paaltjes (kaartjes) verzameld die niet binnen die 80 m passen.

Rechtsonder: de kaartjes met punaises op een schutting geprikt (foto Frank Kosterman).



Gebruik

Linksboven en rechtsonder: nog twee foto's van mijn nieuwe opstellingen (paaltjes). Deze zijn perfect voor mijn gebruik maar voor de meeste gebruikers natuurlijk wat te ingewikkeld en kostbaar.

Ze bestaan uit assteunen (die bedoeld zijn om tijdens werkzaamheden onder een auto te zetten) waarvan de T van het middelste pijpje is afgeslepen. In het overgebleven stuk heb ik PVC pijp geklemd (het past nèt). Bovenop zit een losse 'kop' met de kaarthouder, een busje voor de 3D modellen en informatie over het schaalmodel.



Linksonder: een deel van mijn 3D model op schaal 1:100 miljard. Deze kunnen worden gecombineerd met de nieuwe opstelling, zodat ik de kaartjes én de 3D modellen tegelijk kan laten zien.



Doel en kennis

Als je een presentatie geeft moet je je goed afvragen wat je wilt vertellen. Je kunt bijvoorbeeld veel informatie geven over de zon, de planeten en de andere leden van het zonnestelsel. Dat is leuk en zal worden gewaardeerd. Iedereen kan dat echter zelf opzoeken op internet of in een boek.

Je kunt ook vertellen over de verschillen en overeenkomsten tussen de werelden op verschillende afstanden tot de zon, over groepen van objecten (aardachtige planeten, gasreuzen, ijsreuzen, planetoïden, Kuipergordelobjecten enz.) en andere zaken waarvoor het Planetenpad van nature erg geschikt is.

Wat veel potentiële reisleaders zal afschrikken is de kennis die je nodig hebt om een compleet verhaal te vertellen. Maar dat is helemaal niet zo'n probleem. Als je de kaartjes zelf goed leest heb je al genoeg materiaal voor een leuke presentatie. Later kun je steeds verder gaan, door informatie op internet op te zoeken of mijn boek *Genieten van het zonnestelsel* te lezen (zie pag. 2). Bedenk dat het voor je publiek allemaal nieuw is en dat alles wat je ze kunt leren welkom is!

Toegift

Als je klaar bent met het 'reisje' is het vooral met kinderen leuk en leerzaam om ze de kaartjes op te laten pakken (dus eventueel de stok uit de grond te trekken) en ze dan elke een laatste opdracht te geven. Elk kind pakt een planeet of ander object, alleen de zon blijft staan. Laat ze nu in een grote cirkel rond de

zon (-kaart) lopen, tegen de wijzers van de klok in. Pas wel op een eventuele weg of fietspad in de buurt, want het worden forse cirkels! Het is erg leuk maar het leert ze ook iets, bijvoorbeeld waarom planeten die verder van de zon staan langer nodig hebben voor één rondje (omloop) om de zon. Dat is wetenschappelijk niet helemaal correct, want de baansnelheid van een object is lager naarmate het verder van de zon staat, maar het geeft toch een goed idee.

Vergelijken met de afmetingen

Op de kaartjes heb ik aangegeven wat de diameter van elk object op schaal is, met daaronder waarmee je die grootte kunt vergelijken. Ik heb daarvoor zo duidelijk mogelijk vergelijkingsmateriaal genomen. Hier is een overzicht. Het gaat, behalve bij de dikte van spinnenwebdraad, steeds om een **deeltje**, dus één zandkorrel of één sigarettenrookdeeltje.

	circa:	voorbeelden:
kopspeldje	1,5 mm	Jupiter, Saturnus
grof zand	0,5 mm	Uranus, Neptunus
normaal zand	0,25-0,5 mm	-
fijn zand	0,1 mm	Aarde, Venus
zeer fijn zand	0,05 mm	Mars, Mercurius
talkpoeder	0,02 mm	Pluto, Eris, Maan
mistdruppel	0,01 mm	Salacia, Quaoar, Sedna
rode bloedcel	0,007	Vesta, 2002 AW197
dikte spinsel	0,002	Hermione, Chariklo
sigarettenrook	0,00002	Komeet van Halley
zuurstofatoom	0,0000005	object van ca. 50 m

Errata

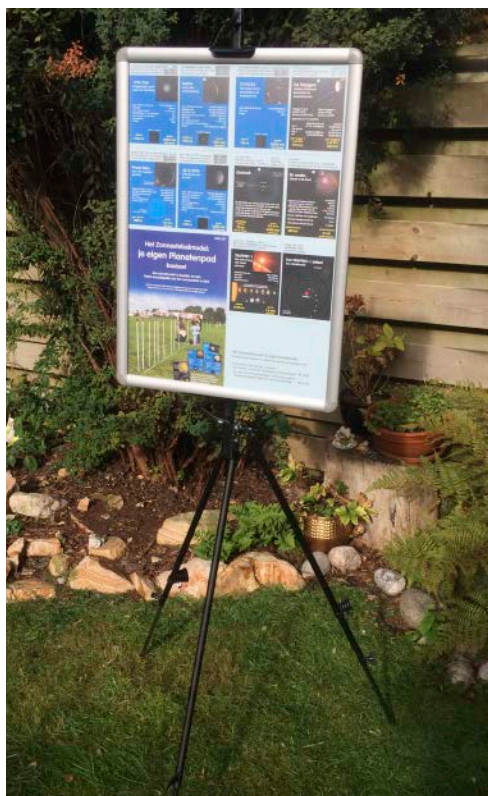
De vergelijkingen van de afmetingen zijn op enkele kaartjes helaas niet juist. Je moet daarvoor de onderstaande gegevens gebruiken.

- **21:** vergelijking grootte bij de planetoïde Psyche moet zijn **dikte spinsel**;
- **23:** vergelijking grootte bij 2012 VP113 moet zijn: **rode bloedcel**;
- **31:** vergelijking grootte 2007 OR10 moet zijn: **mistdruppel**.



Index

3D modellen		Genieten van het zonnestelsel (boek)	2	perihelium	11	sterren (in het schaalmodel)	9
afmetingen, vergelijkingen	14	extra kaartjes Zonnestelselmodel (gratis)	3	Planetenpad	2, 12	tips bij het lezen van de handleiding	3
zelf maken	9	helium (gas)	5	doel	14	tips bij het presenteren	14
aardachtige planeten	5	ijsreuzen	5	kennis (nodig voor presentatie, tip)	14	TNO	6
AE (astronomische eenheid)	11	ijzen (in zonnestelselobjecten)	5	opstellen	12-13	Trans-Neptunisch Object	6
afstand	2, 9, 11	inclinatie: zie baanhelling		presentatie geven	13-14	Trojanen	6
aphelium	11	kaarthouders (displays)	13	selecteren kaartjes	12	vlak	10
astronomische eenheid (AE)	11	KBO (Kuiper Belt Object)	6	tips	12-14	vlak van de ecliptica (aardbaan)	10
baanexcentriciteit: zie excentriciteit		klassieke KBO	6	Planet Nine (hypothetische planeet)	8	vlak van de equator (evenaar)	11
baanhelling, baaninclinatie	10	resonerende KBO	6	planetoïden	5	vorstijjn	5
baanresonantie	11	kometen	7-9	Planetoïdengordel	5	waterstof (gas)	5
binnenplaneet	10	korte as (van ellips)	10	Pluto	4	Wet van behoud van impulsmoment	5
Binnenste Oortwolk	6, 7	Kuiper, Gerard (Nederlandse astronoom)	9	plutoïde	6	zonnenevel	5
binnenste planeten	10	Kuipergordel	5, 6	protoplanetaire schijf	5	Zonnestelselmodel	2
brandpunten (ellips)	10	Lagrangepunten	6	resonantie: zie baanresonantie		aanvulset	3
Brown, Mike (Amerikaanse astronoom)	8	lange as (van ellips)	10	Robb Nieuwsbrief	3	basisset	3
buitenplaneet	10	manen (natuurlijke satellieten)	11	rode dwergen (sterren)	9	extra kaartjes (gratis downloads)	3
Buitenste Oortwolk	6, 7	meetlint	12	rotatie	10	Zonnestelsel - achtergrondinformatie	
Centaur (object)	6	metalen (in zonnestelselobjecten)	5	rotatieperiode (Aarde: 1 dag)	10	familieportret	3
Cis-Neptunisch Object	6	natuurlijke satelliet	11	rotsplaneten: zie aardachtige planeten		samenstelling	3
CNO	6	Neptunus-Trojanen	6	satelliet (natuurlijke, maan)	11	zonnestelselobjecten	2
condensatie	5	Nieuwsbrief (Robb)	3	Scattered Disc	7		
Detached Object	7	OCO (object)	7	Scattered Disc Object	7		
dwerfplaneet (definitie)	4	omloop, omlopen	10	schaal	2, 9		
ellips	10	omlooperperiode (Aarde: 1 jaar)	10	metrische schaal, voordeel	2		
errata	14	Oort Cloud Objects (OCO)	7	schaalmodel: zie Planetenpad			
excentriciteit (definitie)	10	Oort, Jan (Nederlandse astronoom)	7	zelf 3D modellen maken	9		
gassen, waterstof en helium	5	Oortwolk	6-8	SDO	7		
gasreuzen	5	opstelling Planetenpad	2, 13	Sednoïde	7		
gemiddelde dichtheid	5	kaarthouders (displays)	13	silicaten (mineralen, in zonnestelselobj.)	5		



Linksboven: ik gaf de 'Reis door het zonnestelsel' tijdens de 2020 editie van mijn cursus 'Leer het heelal begrijpen' nog met de oude standaards.

Linksonder: met bijna tweemaal zoveel nieuwe standaards dan de 32 'heavies' kan ik meer kaarten, dus objecten en onderwerpen tonen. Daarvoor moest ik wel veel nieuwe 'koppen' maken.

Boven, midden: deze ingewikkelde constructie, die ik een 'kop' noem (ik moet altijd nieuw jargon bedenken bij mijn uitvindingen...), bevat een kaarthouder en dus een kaart (sommige zijn dubbel); op het grijze stukje PVC pijp kan ik een PVC busje plaatsen voor een 3D modelletje. Verder informatie over wat het is ('Dit is een schaalmodel, de standaards staan precies op de juiste afstanden. Verplaats ze dus niet!').

Rechtsboven: de nieuwe standaards zijn op basis van de 'voeten' van muziekstandaards, waarvan ik de rest weggedaan heb. Ze werken het perfect, staan heel stevig en zijn veel lichter dan de oude standaards. **Rechtsonder:** een ideale oplossing om de kaartjes te tonen die gewoon veel te weg staan om te plaatsen (Proxima Centauri staat op 400 km!): een display op een ezel. Ik heb ook zo'n set om het begin van mijn Planetenpad (bij de zon) duidelijk aan te geven; handig bij evenementen, als ik meer 'reisjes' geef.