Hoe groot is ons zonnestelsel?

De Aarde lijkt groot, maar toen Voyager 1 er in 1990 een foto van maakte, bleek dat onze thuiswereld niet meer is dan een klein lichtblauw stipje in een grote donkere leegheid. Het ruimtevaartuig was op dat moment ongeveer even ver van de zon als de gemiddelde afstand van de dwergplaneet Pluto, en had het einde van ons zonnestelsel nog lang niet bereikt. Dat roept de vraag op: hoe groot is ons zonnestelsel eigenlijk?



Afbeelding 1. Een foto van de Aarde. Op 14 februari 1990 nam Voyager 1 deze iconische foto (“Pale Blue Dot”) van de Aarde, van een afstand van zo’n zes miljard kilometer (40 AE) van de zon. Vanaf deze afstand lijkt de Aarde op niet meer dan een klein licht stipje. Afbeelding: NASA/JPL-Caltech.

Onvoorstelbaar groot

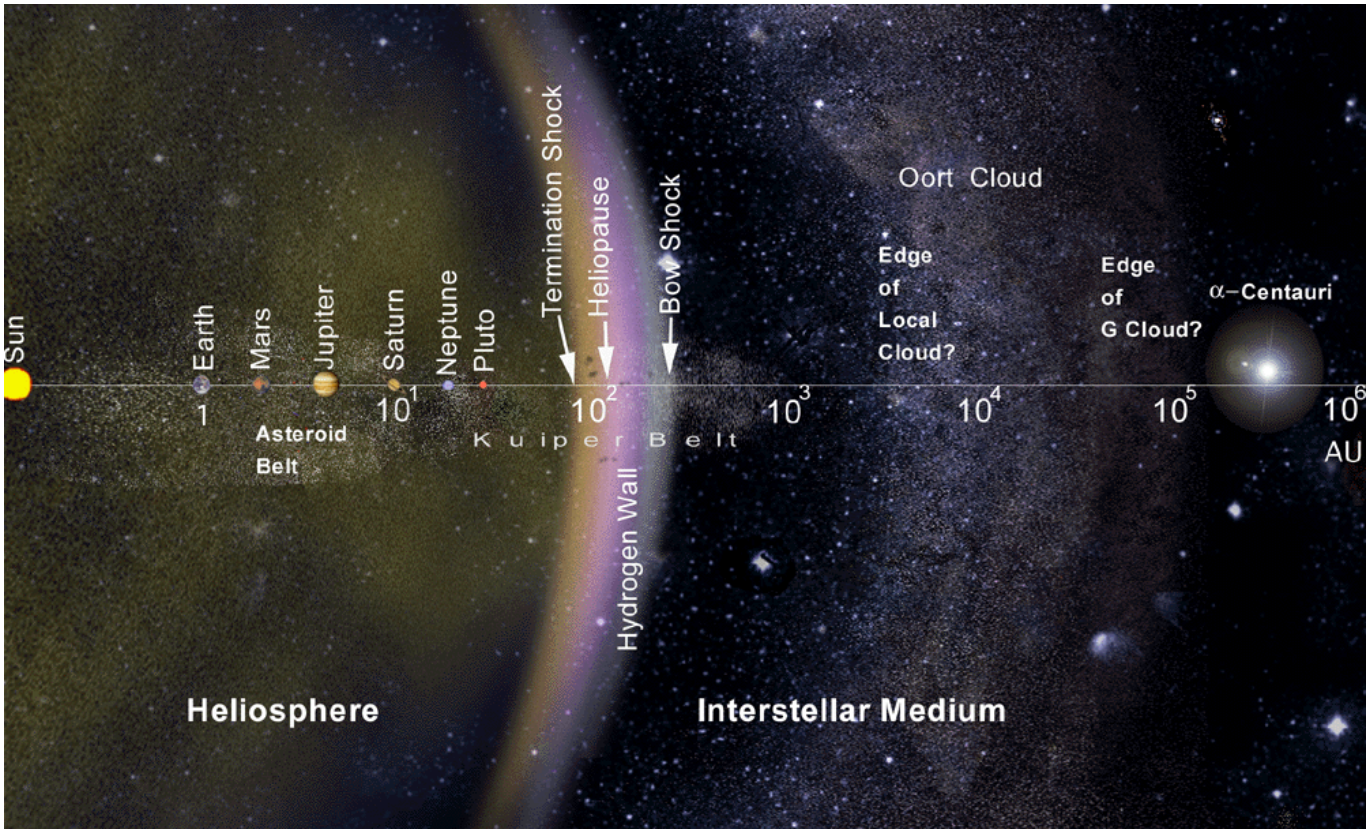
Afstanden tussen objecten in de buitenaardse ruimte zijn voor ons onvoorstelbaar groot. De Aarde is zo ver van de zon verwijderd dat licht meer dan acht minuten nodig heeft om de

grofweg honderdvijftig miljoen(!) kilometer te overbruggen. Om het niet steeds over miljoenen en miljarden kilometers te hebben, noemen we deze afstand ook wel een *astronomische eenheid*: 1 AE = 149.597.870.700 meter.

Neptunus, de achtste en verst bekende planeet van de zon in ons zonnestelsel, ligt zo'n dertig keer verder (30,1 AE) van de zon vandaan. Nog verder weg liggen dwergplaneten zoals Pluto (gemiddeld 40 AE van de zon verwijderd), mogelijk de nog-niet-waargenomen Planeet 9, en nog vele andere komeetachtige objecten in de Kuipergordel. Nóg verder weg wordt vermoedelijk alles omringd door miljarden kometen in de Oortwolk, naar schatting 2.000 – 100.000 AE van de zon af.

Het is moeilijk om je zulke afstanden echt voor te stellen. In een afbeelding van ons zonnestelsel die op schaal getekend zou zijn, zouden de planeten zo klein zijn dat je ze niet zou kunnen zien. Om een beter gevoel te krijgen voor hoe groot de interplanetaire afstanden zijn, kun je (heel lang) scrollen door deze website, rondkijken op deze website van NASA, kijken naar deze video van een model van het zonnestelsel dat op schaal gemaakt is in een woestijn, of eens rondrijden door Zweden, waar het grootste permanente schaalmodel van ons zonnestelsel zich bevindt. In dit model bevinden de zon en de planeten Mercurius, Venus, de Aarde en Mars zich allemaal in en rondom Stockholm, ligt Neptunus er 229 km vandaan, en bevindt het verst-liggende monument zich ver in het noorden van het land, 950 km van de hoofdstad verwijderd.

Een truc die we kunnen gebruiken om toch een 'correcte' afbeelding van ons zonnestelsel te kunnen maken, is om afstanden niet op de normale, lineaire manier af te beelden, maar om een *logaritmische* schaal te gebruiken. Dit houdt in dat iedere stap langs een as een afstand aangeeft die een vast aantal malen groter is dan de stap ervoor – bijvoorbeeld steeds tien keer. In plaats van normaal te tellen (1,2,3,4,…) tel je dus als 1,10,100,1000, … De logaritmische schaal kun je ook begrijpen als tellen in machten van tien, oftewel $10^0 = 1$, $10^1 = 10$, $10^2 = 100$, $10^3 = 1000$, enzovoort. Op deze manier tellen en meten is minder intuïtief, maar heeft wel tot gevolg dat het hele zonnestelsel mooi in een plaatje past, zoals in afbeelding 2.



Afbeelding 2. Ons zonnestelsel op een logaritmische schaal. De afstanden tussen de planeten zijn hier op een logaritmische schaal afgebeeld in astronomische eenheden. Pas op, deze schaal kan misleidend zijn: de afstand van de zon naar Saturnus is tien keer zo groot als die van de zon naar de Aarde! De groottes van de zon en planeten zelf zijn niet op schaal weergegeven. Afbeelding van NASA/JPL-Caltech.

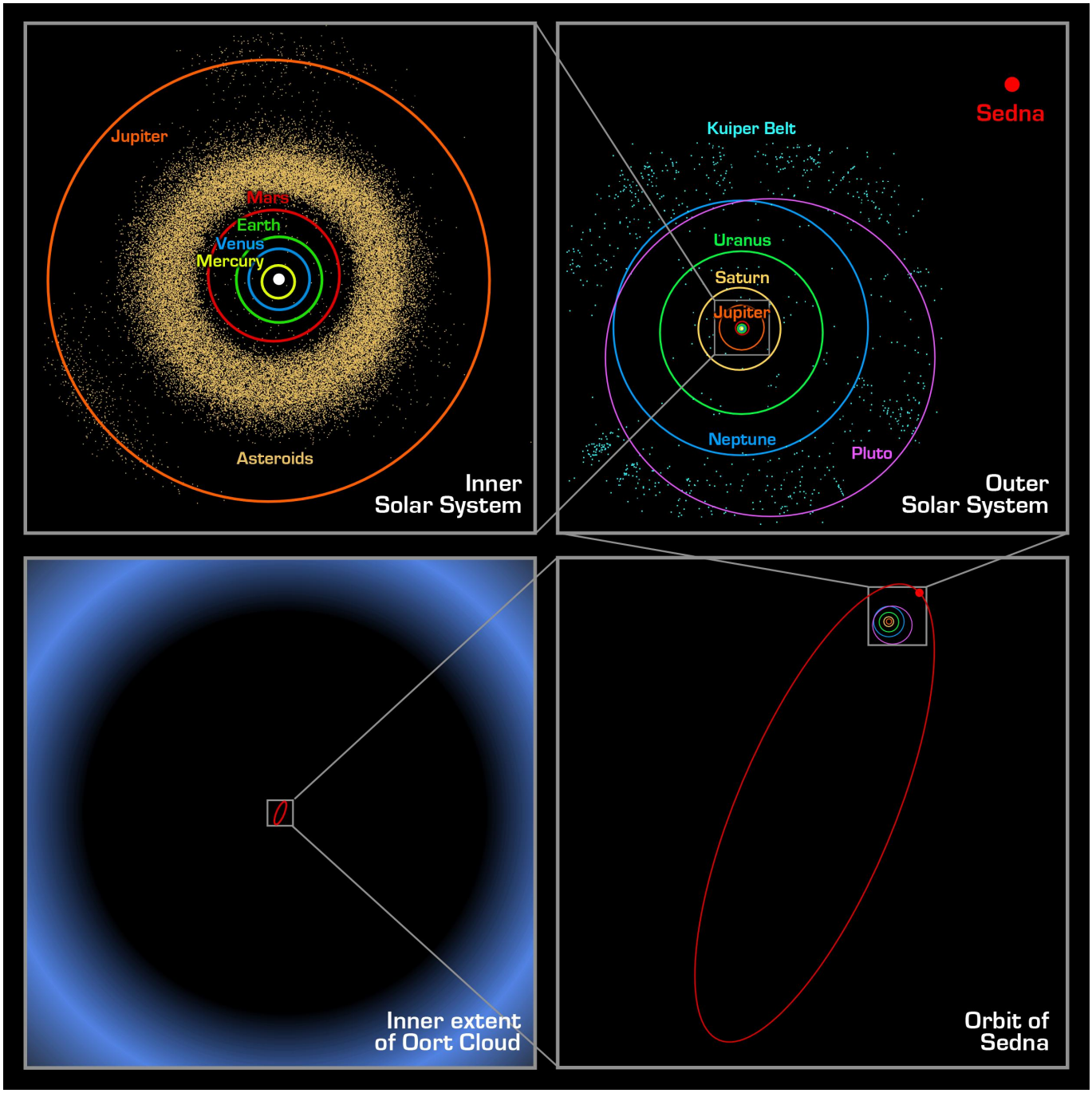
Het einde van het zonnestelsel

Het is duidelijk dat ons zonnestelsel groot is. Erg groot zelfs. Maar ergens houdt ons zonnestelsel op. Er bestaan immers ook andere sterren, met hun eigen ‘zonnestelsels’. De dichtstbijzijnde hiervan is het Alpha Centauri-stelsel, met een centrum dat ongeveer 277.600 AE (of 4,39 lichtjaar) van ons vandaan ligt. Ergens tussen de zon en de dubbelster α-Centauri eindigt ons zonnestelsel en begint dat van α-Centauri, en misschien zit daar tussenin ook nog ruimte die bij geen van beide sterrenstelsels hoort. Hoe bepalen (of: definiëren) we waar het einde van ons zonnestelsel ligt?

Om zo’n vraag te beantwoorden is het fijn om een meetbare grens te kunnen gebruiken. Je zou kunnen beargumenteren dat de grens van ons zonnestelsel het einde van de Kuipergordel ligt, zo’n 50 AE van de zon verwijderd. Deze gordel van uit steen en ijs

gemaakte *transneptunische* objecten heeft een grotere dichtheid dan wat daarbuiten zit, voor zover we weten, en de plaats waar die gordel ophoudt is dus goed te bepalen.

Helaas is dit toch een onhandige definitie, omdat buiten de Kuipergordel in de zogeheten ‘scattered disk’ (oftewel verstrooide schijf) nog steeds veel objecten rondzweven, vaak in grillige banen om de zon. De planetoïde Sedna, met een breedte van ongeveer 1000 km, heeft bijvoorbeeld een elliptische baan die haar van 76 AE tot wel 937 AE van de zon afbrengt. En dáárbuiten ligt natuurlijk altijd nog de Oortwolk, waar we nóg minder van afweten.

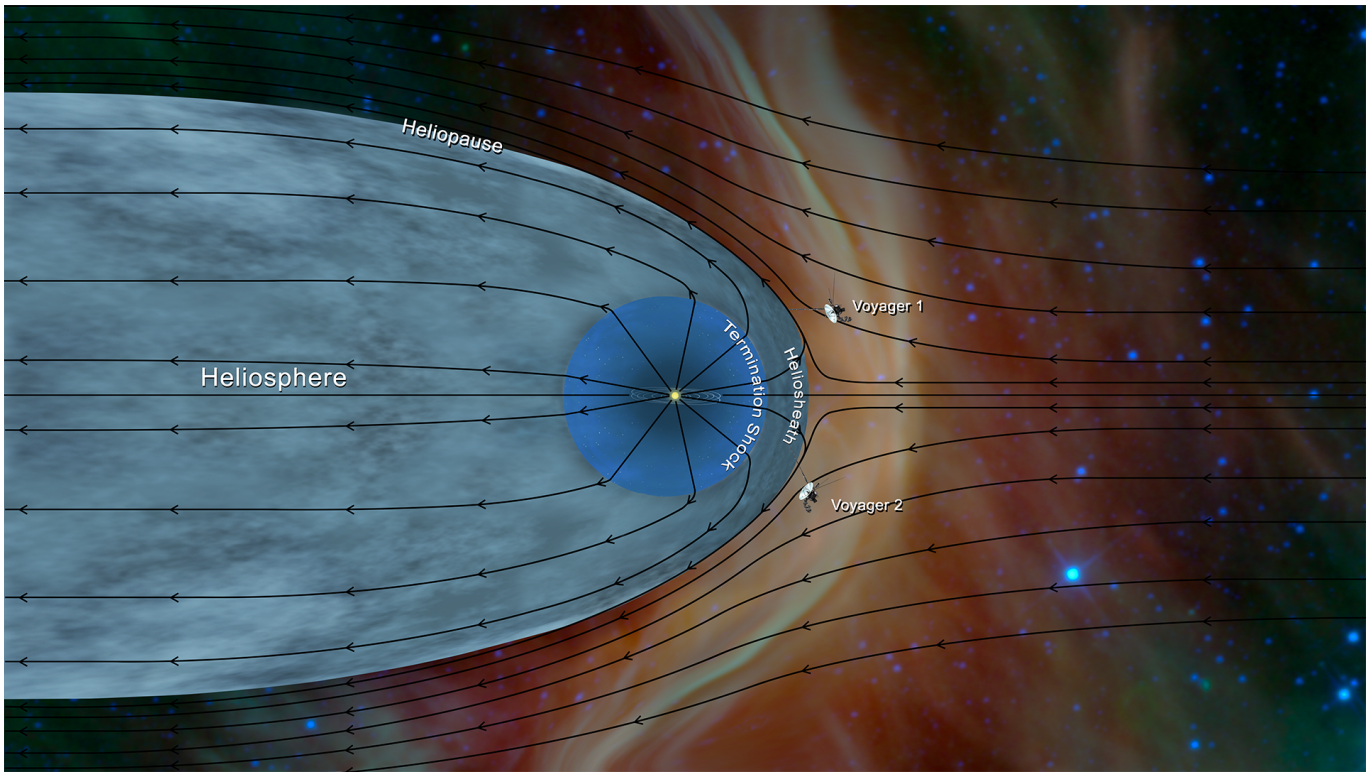


Afbeelding 3. Ons zonnestelsel, weergegeven op vier verschillende lengteschalen. De baan van de planetoïde Sedna (in het rood) gaat ver voorbij de grenzen van de Kuipergordel. Tegenwoordig denkt men dat het begin van de Oortwolk (linksonder in blauw) dichterbij is dan hier wordt weergegeven. Afbeelding: NASA/JPL-Caltech.

Door weer en wind

Toch ligt er buiten de Kuipergordel iets wat we wél kunnen meten: het einde van de zogenoemde *heliosfeer*. Zoals in afbeelding 2 ook al wordt aangegeven, bevindt zich

daarbuiten het *interstellaire medium*, een koud plasma (gas van geladen deeltjes) afkomstig van andere bronnen dan de zon. Binnen de heliosfeer bevindt zich ook een plasma, maar dat bestaat uit deeltjes afkomstig van de zon. Deze *zonnewind* bestaat uit elektronen, protonen, heliumkernen (oftewel alfadeeltjes), en in mindere mate ook ionen en atoomkernen van zwaardere elementen (C, N, O, Ne, Mg, Si, …). Met snelheden van 250 – 750 kilometer per seconde blaast deze wind als het ware een bel in het interstellaire medium: het plasma duwt interstellaire deeltjes opzij, en blokkeert naar schatting zo'n 70% van de veel meer energetische kosmische straling die afkomstig is van buiten ons zonnestelsel.



Afbeelding 4. De heliosfeer. De zonnewind afkomstig van de zon duwt deeltjes van buiten ons zonnestelsel weg. Afbeelding: NASA/JPL-Caltech.

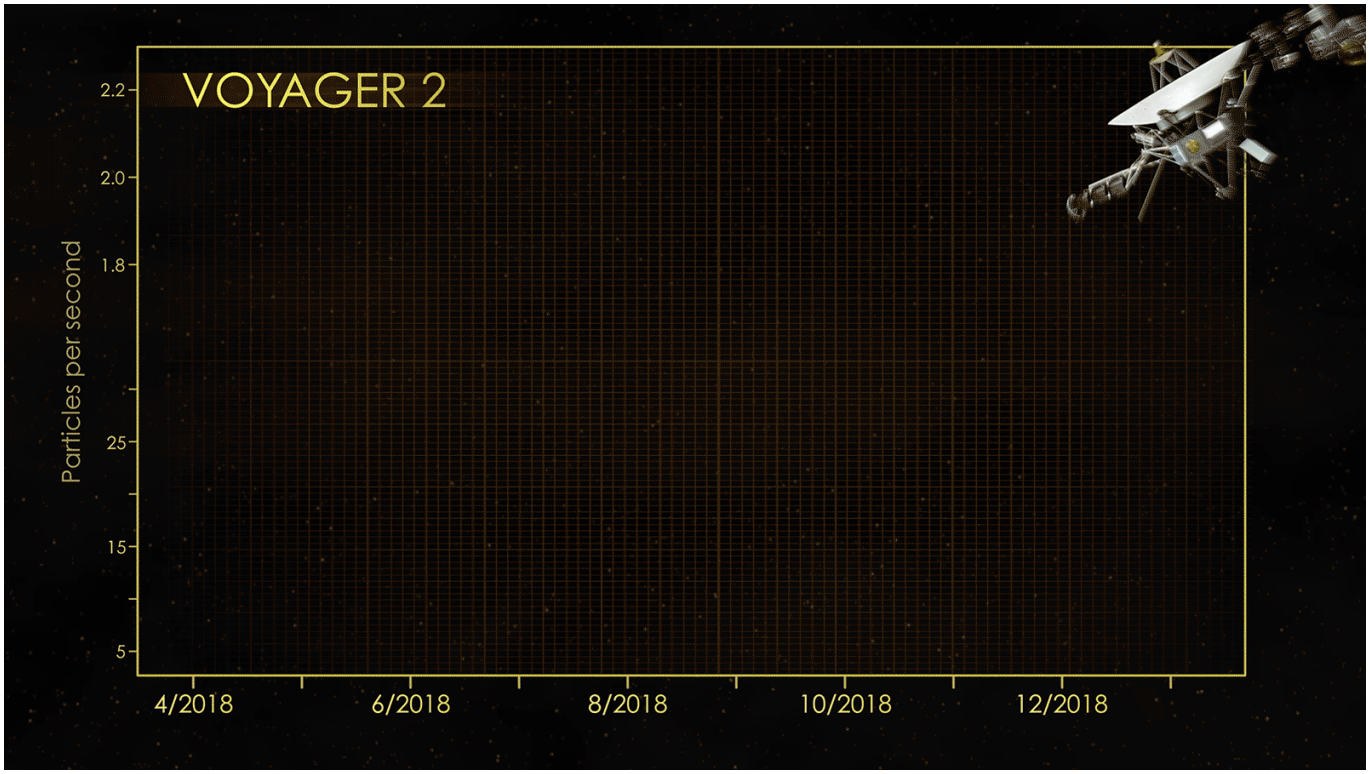
In afbeelding 4 is te zien hoe de stroom van plasma zich beweegt binnen en buiten de heliosfeer. Vanuit de interstellaire ruimte komt een grotendeels eenzijdige stroom van deeltjes, omdat het hele zonnestelsel zelf door de ruimte beweegt in een baan rond het zwarte gat in het midden van de Melkweg. Het koudere, dichtere uitwendige plasma duwt dus vanuit één richting tegen de zonnewind aan, en vertraagt die. Tot en met de nogal *Star Trek*-achtig klinkende *termination shock* (zo'n 75 – 90 AE vanaf de zon) is de zonnewind supersonisch en duwt die andere deeltjes uit de weg in alle richtingen, maar door botsingen met interstellaire materie beweegt de zonnewind daarbuiten langzamer en wordt de stroom

omgebogen. De heliosfeer eindigt bij de *heliopauze*, waar de zonnewind zodanig is afgeremd dat de druk van het interstellaire medium even groot is als de druk van de zonnewind zelf.

De lange tocht naar data

Waar de grens van de heliosfeer heel precies ligt is tot nu toe moeilijk te zeggen. Er zijn nu nog maar twee ruimtevaartuigen die de interstellaire ruimte bereikt hebben: Voyager 1 (25 augustus 2012) en Voyager 2 (5 november 2018). Allebei zijn al sinds 1977 onderweg, en bevinden zich nu respectievelijk zo'n 150 en 124 AE van ons vandaan. Ondanks dat deze sondes alleen bedoeld waren om het vijf jaar lang vol te houden, zijn ze nog steeds actief (volg hun activiteiten hier) en zijn ze in staat om ons de eerste directe metingen van de interstellaire ruimte te sturen.

Hoewel het passeren van de termination shock geen overduidelijk signaal gaf, was er bij de heliopauze – rond 121 AU (18 miljard km) van de zon af – wel een abrupte afname zichtbaar van deeltjes die van de zon afkomstig waren, en een toename van interstellaire straling (afbeelding 5). Hiernaast lieten metingen van beide vaartuigen zien dat het plasma rond de heliopauze een hogere dichtheid heeft, alsof het daar wordt samengeperst. Ook lijkt het erop dat er méér deeltjes van de zonnewind aan de heliosfeer kunnen ontsnappen dan werd verwacht.



Afbeelding 5. Metingen van het einde van de heliosfeer. De stralingsmetingen (deeltjes per seconde) van Voyager 2 laten hier duidelijk zien wanneer het ruimtevoertuig de heliosfeer verlaat en de interstellaire ruimte betreedt. Afbeelding: NASA/JPL-Caltech.

Hoewel we veel hebben geleerd van de Voyagers, is er ook nog heel veel dat we nog niet weten. Beide Voyagers lijken zich nu nog te bevinden in een overgangsgebied net buiten de heliosfeer, en moeten nog even doorvliegen naar het onverstoorde deel van de interstellaire ruimte. Daarna vliegen ze gewoon door, hoewel het naar schatting nog wel zo'n 300 jaar zal duren voordat Voyager 2 het begin van de Oortwolk zal bereiken, en mogelijk zelfs 30.000 jaar voordat het ruimteschip daar weer uitvliegt!

Natuurlijk willen we graag meer meetpunten verzamelen uit andere regio's van de heliosfeer. Terwijl we wachten tot andere ruimtevaartuigen (zoals NASA's New Horizons) uiteindelijk ook de rand van de heliosfeer bereiken, worden er van dichterbij ook veel metingen verricht, bijvoorbeeld met NASA's Interstellar Boundary Explorer (IBEX). Zo geven recente berekeningen gebaseerd op metingen van IBEX aan dat de de heliosfeer geen uitgerekte komeetachtige staart heeft zoals lang werd gedacht, maar qua vorm mogelijk meer op een 'leeggelopen croissant' lijkt. Minder elegant misschien, maar zeker interessant!