



Keuzeonderwerp 5

GEOCENTRISCH EN HELIOCENTRISCH WERELDBEELD

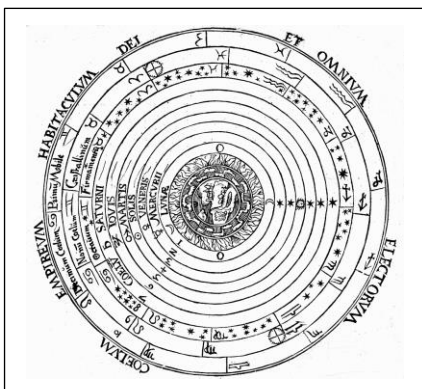
Het denken van de mens over hoe ons zonnestelsel in elkaar zit heeft zich in ruim tweeduizend jaar ontwikkeld van een *geocentrisch wereldbeeld* met de aarde in het centrum naar een *heliocentrisch wereldbeeld* met de zon in het centrum.

Kernvraag

Hoe is het huidige heliocentrisch beeld van ons zonnestelsel tot stand gekomen?

Voor het antwoord op deze vraag volgen we de gedachten van zes astronomen: Aristarchos van Samos (ca. 300 v Chr.), Claudius Ptolemaeus (ca. 120-180 na Chr.), Nicolaus Copernicus (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Johannes Kepler (1571-1630) en Galileo Galilei (1564-1642). Zij waren de voorgangers van Isaac Newton (1643-1726), die met zijn gravitatiewet een verklaring kon geven voor de bewegingen in ons zonnestelsel.

In figuur 1 is het geocentrisch wereldbeeld weergegeven. In dat wereldbeeld staat de aarde in het centrum. Buiten de aarde draaien de hemellichamen die vastzitten aan kristallen schillen. De maan draait het dichtst om de aarde heen, daarna volgen Mercurius, Venus, de zon, Mars, Jupiter en Saturnus. Deze hemellichamen zijn perfect rond en glad, en bewegen in perfecte cirkels. De buitenrand wordt gevormd door een schil waarin zich de sterren bevinden.



Figuur 1 – Het geocentrisch wereldbeeld volgens een gravure uit 1539.

- 1 Wat zijn volgens jou de sterke en de zwakke punten van het geocentrisch wereldbeeld? En wat zijn volgens jou de sterke en de zwakke punten van het heliocentrisch wereldbeeld?

Het geocentrisch wereldbeeld

In de periode van 400 tot 200 jaar voor het begin van onze jaartelling kwamen in het oude Griekenland de wetenschappen tot ontwikkeling. De meeste sterrenkundigen in de oudheid hielden zich bezig met het zo nauwkeurig mogelijk waarnemen van de positie van hemellichamen. Griekse sterrenkundigen vermoedden al dat de aarde een bol was. Zij zagen dat de schaduw van de aarde tijdens een maansverduistering altijd een cirkel was. Zij namen waar dat de poolster hoger kwam te staan als je naar het noorden reisde. En ze merkten op dat, als een schip naar zee ging, voor een waarnemer op het strand eerst het schip verdween, daarna de zeilen en ten slotte de mast.

- 2 Omdat mensen de kromming van de aarde niet zomaar kunnen zien, werd lange tijd gedacht dat de aarde plat was. In de loop van de eeuwen vond men steeds meer argumenten voor het feit dat de aarde een bol is. Hieronder staan vijf van die argumenten. Bespreek elk argument afzonderlijk en geef aan of dit inderdaad aantoonde dat de aarde niet plat is.

A Een zeilschip dat uit de haven vertrekt, zakt voor een waarnemer in de haven, langzaam onder de horizon. Eerst is het schip niet meer zichtbaar en de mast verdwijnt als laatste. Dat is niet zo als de aarde plat is.



- B** In sommige landen is het dag, terwijl het op hetzelfde tijdstip in andere landen nacht is. Als de aarde plat was, dan was het in alle landen tegelijkertijd dag (of nacht).
- C** Soms verdwijnt de maan in de schaduw van de aarde. Tijdens zo'n maansverduistering zien we dat de schaduw van de aarde op de maanschijf gekromd is. Dus moet de aarde een bol zijn.
- D** Ontdekkingsreizigers ontdekten dat ze rond de aarde konden varen zonder de randen te zien.
- E** Foto's gemaakt vanuit de ruimte laten zien dat de aarde een bol is.

Volgens Aristarchos van Samos (300 v Chr.) bestond de wereld uit een stelsel waarin de aarde om de zon draait. We noemen dit een heliocentrisch wereldbeeld. Helios is het Griekse woord voor zon. De geschriften van Aristarchos zijn verloren gegaan. We kennen zijn werk alleen via de werken van anderen die over hem schreven.

Toch waren de meeste mensen er in die tijd van overtuigd dat de aarde het middelpunt van het heelal was. De zon, de maan, de vijf toen bekende planeten en de sterren zouden allemaal in cirkels om de aarde draaien. We noemen dit een geocentrisch wereldbeeld. Geo is afgeleid van het Griekse woord geos, dat aarde betekent.

- 3** Zowel het geocentrisch als het heliocentrisch wereldbeeld geven een verklaring voor de dagelijkse beweging van de zon. Welke verklaringen zijn dat?
- 4** Hieronder staan drie argumenten tegen een aarde die in een heliocentrisch wereldbeeld rond de zon beweegt en om zijn as draait. Weerleg elk van deze argumenten.

- A** Je voelt dat de aarde vast staat en niet door de ruimte gaat of om zijn as draait.
- B** Als de aarde in een dag om zijn as draait, dan wil dat zeggen dat het oppervlak met hoge snelheid ronddraait. Waarom voelen we dan geen sterke wind?
- C** Als we een voorwerp recht omhoog gooien, dan komt het weer in je hand terug. Maar als je met grote snelheid ronddraait, dan zou het een stuk achter ons landen, want we zijn een stuk verder gegaan terwijl dat voorwerp in de lucht was.



Figuur 2 – Het geocentrisch wereldbeeld van Ptolemaeus.

Het geocentrisch wereldbeeld had zijn sterke kanten: als we vanaf de aarde de bewegingen van de zon en de planeten bekijken, lijkt het of ze allemaal om ons heen draaien. Maar dit wereldbeeld gaf geen verklaring voor de waarneming dat de grootte van de zon, maar vooral de grootte van de planeten regelmatig veranderde, zodat de zon en de planeten soms verder weg leken te staan en soms weer dichterbij. Dit werd echter geaccepteerd, en in de volgende eeuwen hield het geocentrisch wereldbeeld stand.

De epicykels van Ptolemaeus

Het geocentrisch wereldbeeld werd door de astronoom Ptolemaeus uitgewerkt in zijn boek *De Almagest*. Daarin vormde de cirkelbeweging het uitgangspunt.

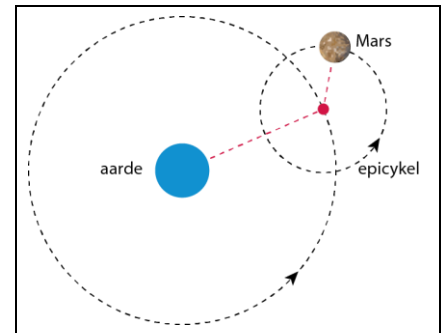


Volgens de Griekse filosoof Plato waren cirkels de ideale (vaak goddelijke) vormen. Vooral hemellichamen golden als volmaakt: ze kunnen geen gebreken vertonen, en bewegen eenparig (dus met constante snelheid) in volmaakte cirkels.

Ptolemaeus wilde een verklaring geven voor de waarneming dat de zon en de planeten soms verder weg lijken te staan en soms weer dichterbij. En dan was er ook nog die eigenaardige beweging van de planeet Mars: deze planeet voert af en toe een lusbeweging uit (zie figuur 3). Dat wil zeggen dat deze planeet ineens een stukje achteruit gaat en daarna weer vooruit. We noemen dit de *retrograde beweging* van Mars. Om deze verschijnselen te verklaren nam Ptolemaeus aan dat de planeten niet in een cirkelbaan rond de aarde draaien, maar in zogenaamde epicykels: cirkels op cirkels. De planeten zouden naast hun ideale cirkelbeweging rond de aarde nog een tweede cirkelbeweging uitvoeren (zie figuur 4).



Figuur 3 – Opname van de planeet Mars vanaf de aarde op een aantal opeenvolgende nachten op hetzelfde tijdstip. De planeet beweegt, vanaf de aarde gezien, een deel van de tijd 'achteruit'.



Figuur 4 – De beweging van de planeet Mars volgens de epicykeltheorie van Ptolemaeus. De zon en de andere planeten zouden op een vergelijkbare manier bewegen.

5 In figuur 4 zie je de beweging van de planeet Mars in de epicykeltheorie van Ptolemaeus.

- Probeer in figuur 4 de volledige baan van Mars te schetsen.
- Leg uit hoe de epicykeltheorie de verandering van de grootte van Mars kan verklaren.
- Leg uit hoe de epicykeltheorie de retrograde beweging van Mars kan verklaren.

6 Open de computersimulatie [Epicykel-theorie](#) (zie figuur 5). Deze simulatie laat de baan van de planeten volgens de epicykeltheorie van Ptolemaeus zien.

Kies in het menu rechtsboven voor de planeet Mars en bevestig met OK. Laat de simulatie lopen.

- Controleer of de baan van Mars overeenkomt met wat je zelf in figuur 4 hebt ingetekend.
- Beschrijf op welke momenten de planeet Mars een retrograde beweging uitvoert.
- Maak met 'epicycle size' de straal van de epicykel groter en kleiner. Hoe verandert daardoor de baan van Mars? Is er steeds sprake van een retrograde beweging?

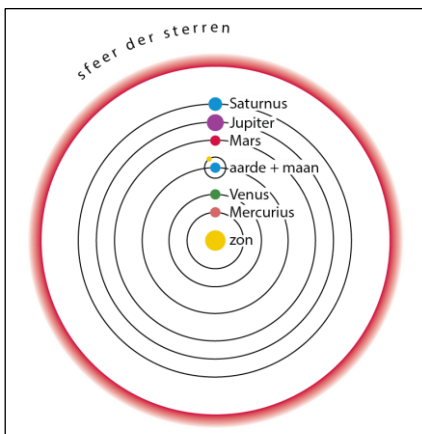


Figuur 5 – Computersimulatie *Epicykel-theorie*.

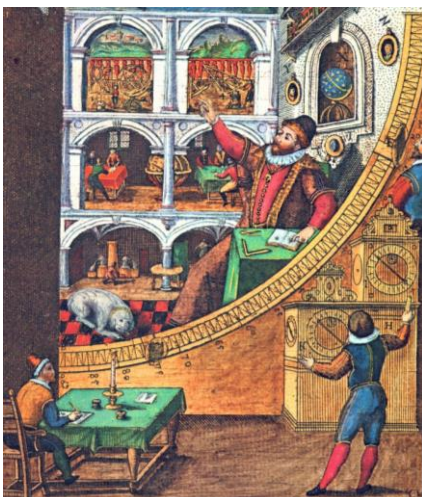


DE SCHIJNBARE GROOTTE VAN VENUS

In de video [Venus](#) zie je de grootte van de planeet Venus veranderen, gekoppeld aan haar beweging rond de aarde volgens de epicykeltheorie.



Figuur 6 – Het heliocentrisch wereldbeeld van Copernicus.



Figuur 7 – Het observatorium van Brahe met voor die tijd zeer nauwkeurige meetinstrumenten om de positie van sterren en planeten te bepalen.

Kies in het menu rechtsboven voor de planeet Venus en bevestig met OK. Laat de simulatie lopen.

- d Beschrijf op welke momenten de grootte van de planeet Venus, gezien vanaf de aarde, maximaal is, en op welke momenten minimaal.
- e Laat Venus ook een retrograde beweging zien?
- f Maak met 'epicycle size' de straal van de epicykel groter en kleiner. Hoe verandert daardoor de baan van Venus?
- g Leg uit dat Ptolemaeus de straal van de epicykel (en ook de snelheid in die epicykel, maar die is in de simulatie niet in te stellen) per planeet verstandig moest kiezen.

Het model van Ptolemaeus kon de hemelverschijnselen redelijk nauwkeurig beschrijven en voorspellen. Het sloot ook goed aan bij het wereldbeeld van het christendom, met de aarde als het middelpunt van alles. Op den duur kwam men echter steeds meer problemen tegen die met het stelsel van Ptolemaeus niet verklaard konden worden. Men hield er echter op Bijbelse gronden toch aan vast. Kritiek op het geocentrisch wereldbeeld stond gelijk aan kritiek op de bijbel. Die kritiek was volgens de kerk niet toegestaan. Daardoor kon het wereldbeeld van Ptolemaeus zo'n 1500 jaar lang overeind blijven. Daarna was het Copernicus die de discussie over het geocentrische en het heliocentrische wereldbeeld weer nieuw leven inblies.

Naar een heliocentrisch wereldbeeld

In 1543 verscheen het boek *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (in het Nederlands: *Betreffende de Omwentelingen van de Hemellichamen*) van de Poolse geestelijke Nicolaus Copernicus. In dat boek beschrijft Copernicus een wereldbeeld waarbij de zon in het midden van het heelal staat en waarin de planeten Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter en Saturnus om de zon draaien (zie figuur 6). De maan vormt een uitzondering: deze draait om de aarde. Copernicus was zich ervan bewust dat zijn model niet goed zou vallen bij de kerk. Hij riskeerde een aanklacht wegens ketterij. Daarom stelde hij de publicatie van zijn boek uit tot aan het eind van zijn leven.

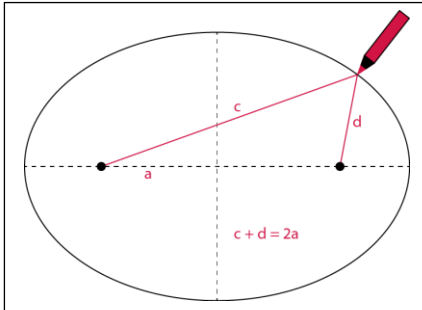
Copernicus was geen waarnemer, maar wel een goed wiskundige. Hij zag in dat men, door de zon een centrale plaats toe te kennen, het banenstelsel van de planeten aanzienlijk overzichtelijker en eenvoudiger kon maken. Doordat hij echter niet afstapte van het uitgangspunt van 'volmaakte' cirkelbanen, bleven epicykels een onmisbaar onderdeel van zijn model.

De Deense edelman Tycho Brahe was een fel bestrijder van de denkbeelden van Copernicus. Omdat echter duidelijk was dat het oude model van Ptolemaeus zwakheden vertoonde, verving hij dit door een soort compromis tussen de twee theorieën van zijn voorgangers. Zijn belangrijkste bijdrage lag echter op het gebied van de waarnemingen.

Brahe ging bij zijn waarnemingen zeer wetenschappelijk en nauwkeurig te werk. In de periode van 1575 tot 1595 stelde hij een sterrencatalogus op die alle voorgaande in nauwkeurigheid overtrof. Bovendien voerde hij een groot aantal exacte plaatsbepalingen uit van de verschillende planeten. Na zijn overlijden kwamen deze gegevens in handen van zijn laatste assistent: Johannes Kepler.

De elliptische banen van Kepler

Johannes Kepler vertrouwde volledig op de waarnemingen van Brahe. Met die

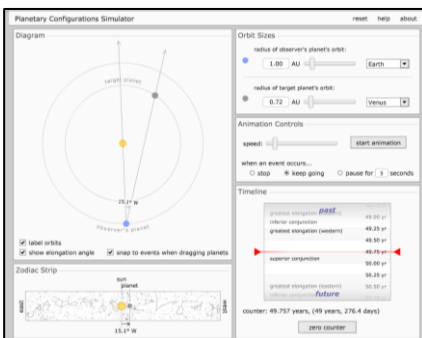


Figuur 8 – Een ellips maak je door op twee punten (de brandpunten) een touw vast te maken en met een pen in het touw een rondje te draaien.

waarnemingen liet hij zien dat de schijnbare baan van Mars niet in overeenstemming kon worden gebracht met een cirkelvormige baan in de ruimte, of men nu de aarde of de zon als middelpunt koos. Na lang zoeken vond hij in 1609 de oplossing van het probleem: de planeten beschrijven banen om de zon die niet cirkelvormig zijn maar elliptisch. Een *ellips* is een uitgerekte cirkel, ongeveer zoals de doorsnede van een ei. Zo'n ellips is wiskundig exact te beschrijven (zie figuur 8).

Aan de hand van de waarnemingen van Brahe kwam Kepler ten slotte tot zijn drie wetten van de planeetbeweging:

- Een planeet beweegt in een ellipsbaan rond de zon, met de zon in één van de twee brandpunten van de ellips.
- De snelheid van een planeet in zijn ellipsbaan is niet constant. Als de planeet het dichtst bij de zon staat, is de baansnelheid het grootst. En als de planeet het verst van de zon af staat, is de baansnelheid het kleinst.
- De derde macht van de gemiddelde baanstraal van de planeten is evenredig met het kwadraat van hun omlooptijden rond de zon.



Figuur 9 – Computersimulatie *Planeten*.

- 7 De epicykeltheorie van Ptolemaeus gaf binnen het geocentrisch wereldbeeld een verklaring voor de verandering van de waargenomen grootte van de zon en de planeten in de loop van de tijd en voor de retrograde beweging van Mars.

Verklaar beide verschijnselen met het heliocentrisch wereldbeeld. Gebruik daarbij zo nodig de computersimulatie *Planeten* (zie figuur 9) en/of de weergave van de aarde en de planeet Mars in hun banen rond de zon in figuur 10.

De computersimulatie laat in het venster links de beweging van twee planeten zien. Met het regelpaneel rechtsboven kun je aangeven welke twee planeten dat zijn. Kies bij 'radius of observer's planet's orbit' in het menu voor Earth. De simulatie laat de hoek zien waaronder de 'target planet' vanaf de aarde ten opzichte van de zon te zien is. Deze positie van de planeet ten opzichte van de zon (gezien vanaf de aarde) is ook weergegeven in het venster linksonder tegen de achtergrond van de sterrenbeelden van de dierenriem, waar de zon in een jaar 'doorheen loopt'. Je kunt de simulatie continu laten draaien met 'start animation'. De snelheid is daarbij te regelen met 'speed'.



Figuur 10 – De posities van de aarde en de planeet Mars in hun baan rond de zon op een aantal opeenvolgende tijdstippen.

- 8 Het geocentrisch en het heliocentrisch model van ons zonnestelsel geven beide een verklaring voor het afwisselend dichtbij en veraf staan van de zon en de planeten (gezien vanaf de aarde), en voor de retrograde beweging van Mars.

Welk model heeft dan je voorkeur: het geocentrische of het heliocentrische model? Geef argumenten voor je keuze.

Galilei en de manen van Jupiter

In 1609 hoorde de Italiaanse wis- en natuurkundige Galileo Galilei dat een Hollander, Hans Lippershey uit Middelburg, een verrekijker had geconstrueerd. Aan de hand van de vage beschrijving van dit apparaat was hij in staat er zelf één te bouwen. Op 7 januari 1610 zag hij daarmee drie kleine heldere sterren in de buurt van de planeet Jupiter en noteerde deze waarneming in zijn dagboek.



Hij dacht dat het vaste sterren waren, maar de volgende avond zag hij dat ze zich verplaatst hadden. Zijn nieuwsgierigheid was gewekt en ongeduldig wachtte hij op de volgende nacht. Maar hij had pech, want het was bewolkt. De daaropvolgende avond zag hij slechts twee sterren. En dan, op 13 januari, zag hij voor de eerste keer vier sterren bij Jupiter.

Op grond van vele nachtelijke waarnemingen trok Galilei de conclusie dat de sterren in feite manen rond Jupiter waren. Hij was ervan overtuigd dat de vier manen van Jupiter een antwoord waren op de kritiek die men had op het wereldbeeld van Copernicus, namelijk dat het onmogelijk was dat de maan rond de aarde draait en tegelijk ook met de aarde in een baan om de zon beweegt. Hier waren vier manen die om Jupiter cirkelden, terwijl Jupiter zelf om de zon draaide.

De aanhangers van Ptolemaeus op de verschillende universiteiten verzetten zich echter hevig tegen zijn ideeën, niet in de laatste plaats omdat deze een bedreiging vormden voor hun reputatie. Galilei beschikte over een grote spreek- en schrijfvaardigheid en hij gebruikte deze zijn hele leven om zijn tegenstanders te bespotten. Dat deed hij zelfs als zijn eigen argumenten onjuist waren. Zo maakte hij vele vijanden.

Uiteindelijk lukte het zijn tegenstanders om de kerk op hun hand te krijgen. Galilei kreeg de vermaning zich voortaan van dergelijke ketterijen te onthouden. In 1623 werd zijn boek *Il Saggiatore* (in het Nederlands: *De Onderzoeker*) uitgegeven, waarin hij opnieuw de juistheid van het Copernicaanse stelsel verdedigde, niet als veronderstelling maar als vaststaand feit, hoewel hij hiervoor eigenlijk geen degelijk bewijs kon tonen. Hierop reageerde de kerk aanvankelijk niet.

Negen jaar later, toen zijn *Dialogo over de twee grote Wereldstelsels van Ptolemaeus en Copernicus* verscheen, brak het conflict opnieuw uit. Een proces kon niet uitblijven en in 1633 werd Galilei veroordeeld tot levenslang huisarrest. Hij moest al zijn theorieën over een bewegende aarde afzweren. Dat deed hij officieel. Het verhaal gaat dat hij daarna zachtjes heeft gezegd: 'Eppur si muove' (in het Nederlands: 'En toch beweegt ze'). Dat is waarschijnlijk niet waar, maar hij was er ongetwijfeld van overtuigd dat de aarde in beweging was, en dat zijn vonnis daar niets aan kon veranderen.

9 Toen Galilei zijn telescoop op Jupiter richtte, ontdekte hij vier heel kleine lichtpuntjes. Hij besloot deze lichtpuntjes een aantal weken te observeren. In zijn logboek schreef hij onder andere de volgende waarnemingen:



Figuur 11 – De waarnemingen van Galilei aan de lichtpuntjes bij Jupiter.

De lichtpuntjes verplaatsen zich en komen na een bepaalde periode weer op dezelfde plaats terug en dat patroon herhaalt zich. [...] Soms zie ik vier lichtpuntjes, het andere moment maar twee of drie. Heel vreemd... [...] De lichtpuntjes lijken zich allemaal op één horizontale lijn te bewegen.

- a Wat waren dat voor lichtpuntjes die zich rond de planeet Jupiter bevonden?
- b Waardoor zag Galilei de ene keer vier lichtpuntjes en het andere moment maar twee of drie?
- c Waardoor liggen de lichtpuntjes steeds op één lijn?
- d Waarom was deze ontdekking in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?

10 Het geocentrisch wereldbeeld heeft lang stand gehouden, maar is uit-



- eindelijk vervangen door het heliocentrisch wereldbeeld.
- a Wat zijn nu de sterke en de zwakke punten van het geocentrisch wereldbeeld? En wat zijn de sterke en de zwakke punten van het heliocentrisch wereldbeeld?
 - b Vergelijk je antwoorden op deze twee vragen met je antwoorden bij opdracht 1 in dit keuzeonderwerp: zijn je antwoorden nu vollediger, nauwkeuriger en/of beter beargumenteerd?
 - c Waardoor heeft het geocentrisch wereldbeeld zo lang stand gehouden? Geef minstens drie redenen.

Wetenschappelijke revolutie

De omwenteling in het denken over de bewegingen in ons zonnestelsel is een voorbeeld van een *wetenschappelijke revolutie*. Ideeën worden niet meer aanvaard op grond van het geloof in een autoriteit (de kerk), maar worden pas geaccepteerd na het uitvoerig beproeven van deze ideeën door waarnemingen en experimenten. Een voorbeeld is de worsteling van Kepler om het heliocentrische wereldbeeld in overeenstemming te brengen met de waarnemingen van Brahe.

Daarnaast speelt bij een wetenschappelijke revolutie ook de vraag wat nu eigenlijk een wetenschappelijke theorie is. Het geocentrische model van Ptolemaeus en het heliocentrische model van Kepler konden beide de bewegingen van de zon en de planeten goed beschrijven en voorspellen. Welk model heeft dan de voorkeur? De Engelse filosoof William of Ockham bedacht rond 1300 het filosofisch principe dat bekend staat als 'Ockham's Razor': "Als er twee verschillende verklaringen zijn voor hetzelfde verschijnsel, accepteer dan de eenvoudigste." In dat opzicht was Keplers theorie van de ellipsbanen rond de zon eenvoudiger dan de epicykels van Ptolemaeus, waarbij de planeten niet alleen rond de aarde maar ook nog eens rond een 'leeg' punt in de ruimte zouden draaien.

In deze wetenschappelijke revolutie speelde ook de techniek een belangrijke rol. Denk daarbij aan de instrumenten waarmee Brahe de posities van sterren en planeten nauwkeurig kon bepalen, en de telescoop waarmee Galilei nieuwe verschijnselen zoals de manen van Jupiter kon waarnemen. Dit is een voorbeeld van de invloed die de ontwikkeling van de techniek (in dit geval: de telescoop) heeft op de theorie in de natuurwetenschap (in dit geval: de theorie over de bouw van ons zonnestelsel).