

Reizen door het zonnestelsel

Bij een reis door het zonnestelsel staat het ruimteschip onder invloed van de zwaartekracht. Wat is zwaartekracht en wat voor invloed heeft deze op de baan van een ruimteschip? De leerlingen beantwoorden deze vraag met behulp van een zwaartekrachthoepel.

Lesdoelen

De leerlingen

- maken kennis met de werking van zwaartekracht in het heelal en hoe deze afhangt van massa en afstand;
- maken kennis met banen van objecten onder invloed van de zwaartekracht.

Vorbereiding

Lees de lesbeschrijving en de werkbladen door. Verzamel de materialen. Maak een voorbeeldhoepel volgens de instructie in de lesbeschrijving. Experimenteer zelf met de zwaartekrachthoepel: wat zijn de mogelijkheden en beperkingen? U vindt hiervoor een instructie in de lesbeschrijving. Ook het filmpje van docent Dan Burns is de moeite waard als inspiratie: www.huff.to/1vSDIEz
Zet tot slot de filmpjes en animaties klaar.

Benodigheden per zwaartekrachthoepel (zie lesomschrijving voor de verschillende opties)

- Zo groot mogelijke hoepel (diameter minstens 75 cm). Een alternatief is een grote ring gemaakt van bijvoorbeeld buigbare tentstokken
- Lap elasthan (ook wel lycra, spandex of dorlastan genoemd) dat over de hoepel past
- 8 papierklemmen of wasknijpers.
- Ongeveer 20 knikkers (diameter 1,5 cm)
- 2 elastiekjes
- 2 paperclips
- Andere balletjes (kogeltjes, houten kralen, piepschuim bollen, knikkers met andere afmetingen)
- Gewichten van 100 g tot 1 kg, liefst klein en rond.

Tijdsduur

45 minuten

Kerdoelen

28, 29, 31, 32

Vakken

Natuurkunde

Lesbeschrijving *Reizen door het zonnestelsel*

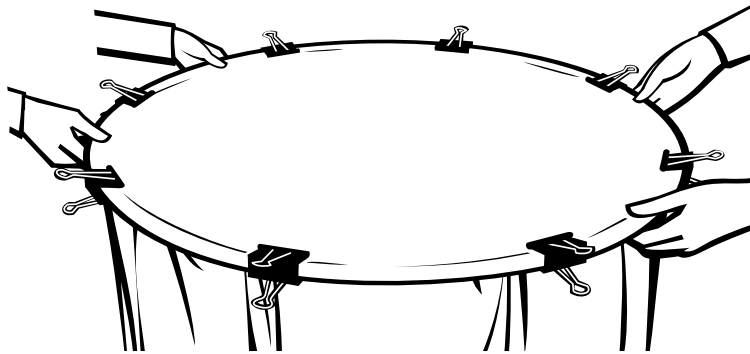
Introductie 5-10 minuten

Vertel dat de leerlingen gaan ontdekken hoe de baan van een ruimteschip in het zonnestelsel eruit ziet. Teken een deel van het zonnestelsel op het bord. Teken in ieder geval de zon en de aarde, met daarbij de maan, Mars en/of een komeet. Teken ook de banen die de objecten maken. Vraag nu aan de leerlingen welke route zij zouden nemen om van de aarde naar een van deze hemellichamen te komen. Verzamel hun ideeën en teken ze eventueel in het zonnestelsel. Geef nog niet het juiste antwoord. Na het experiment met de zwaartekrachthoepel evalueert u de ideeën van de leerlingen.

De zwaartekrachthoepel maken 10 minuten¹

De zwaartekrachthoepel is een simulatie van de aantrekkingskracht tussen sterren en planeten in het heelal. Op een doek van elasthaan bewegen knikkers en kogels die het doek indeuken. Doordat ze het doek indeuken, ontstaan er bewegingen die lijken op de werking van zwaartekracht op objecten.

¹ Indien de hoepels voorafgaand deze les gemaakt worden, dan is er tijdens de les geen tijd nodig voor dit onderdeel.



- 1 Houd met twee personen de hoepel vast of laat hem steunen op drie punten (bijvoorbeeld drie tafels).
- 2 Leg het elasthaan over de hoepel.
- 3 Maak het elasthaan vast met de acht klemmen.
- 4 Zitten er vouwen in? Verschuif dan het elasthaan net zolang tot het doek helemaal vlak is.
- 5 Let op dat het doek niet te strak zit. Er mag geen spanning op staan.

Let verder op de volgende dingen:

- Houd de hoepel altijd zo horizontaal mogelijk.
- Probeer de hoepel enkel te ondersteunen onder de rand en niet onder het elasthaan.

U kunt de zwaartekrachthoepel op twee manieren aan de leerlingen aanbieden:

Optie 1 *In groepjes van vier leerlingen*

Geef elk groepje de materialen voor een zwaartekrachthoepel. Leg klassikaal uit hoe ze de hoepel moeten maken, of maak van tevoren voor elk groepje een hoepel.

Optie 2 *Klassikaal (voorbereiding vereist)*

Maak voor de les zelf één grote zwaartekrachthoepel met een diameter van minstens 2 meter. De instructie is vergelijkbaar met de instructie hierboven. Gebruik meer

klemmen om het doek te bevestigen. De hoepel kan steunen op bijvoorbeeld drie tafelpunten. Tijdens de les kunnen de leerlingen die om de hoepel staan de hoepel vasthouden.

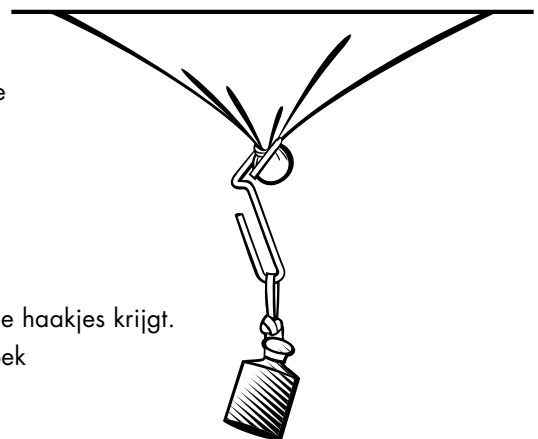
Hoe werkt de zwaartekrachthoepel 5 minuten

Vertel in onderstaande stappen wat de hoepel doet:

- 1 De hoepel is het universum. Het elasthaan geeft weer of er zwaartekracht is. Zonder objecten is het doek vlak. Er zijn geen krachten aanwezig.
- 2 Leg een kleine knikker op het doek. Er gebeurt niets. Laat de knikker eventueel rechtdoor rollen. Hiermee laat je zien wat objecten doen als er niets anders in de buurt is: in een rechte lijn bewegen. De oplettende leerling zal opmerken dat de knikker een kuiltje veroorzaakt. Het kuiltje laat zien dat de knikker zorgt voor zwaartekracht om zich heen. Hierover meer in stap 3.
- 3 Leg nu twee knikkers op korte afstand van elkaar op het doek. De knikkers rollen naar elkaar toe. De knikkers deuken het doek in. De ene knikker 'voelt' dat de andere knikker het doek indeukt en rolt ernaar toe. Omgekeerd gebeurt precies hetzelfde.
- 4 We gaan nu het zonnestelsel nabootsen. In het midden is de zon. De zon is het zwaarste object in ons zonnestelsel (700 maal zo zwaar als alle planeten bij elkaar). Pak een zwaar gewicht en leg dit in het midden van het doek. Het gewicht is de zon.
- 5 De planeten draaien om de zon. Pak een knikker en laat deze om het gewicht draaien. De knikker gaat naar het midden toe en sneller draaien om vervolgens tegen het gewicht tot stilstand te komen. Merk op dat de knikkers lang niet altijd in cirkels draaien, maar ook in ellipsen. In werkelijkheid maken planeten ook geen perfecte cirkels, maar draaien ze ook in ellipsen.

Het is ook mogelijk om een massa aan het doek vast te maken. Dit is handig wanneer je meerdere massa's wilt gebruiken zonder dat ze naar elkaar toe rollen.

- 1 Leg een knikker op het doek op de gewenste plek.
- 2 Maak de knikker onder het doek vast met een elastiekje.
- 3 Buig een paperclip in een rechte hoek zodat je twee haakjes krijgt.
- 4 Maak één haakje vast aan de knikker onder het doek
- 5 Bevestig aan het andere haakje het gewicht.



Zelf experimenteren 10 minuten

Laat de leerlingen zelf experimenteren met de hoepel, wat knikkers en één of twee (bevestigde) gewichten. Het experimenteren is deels vrijblijvend, maar laat ze ook gericht vragen beantwoorden. Schrijf de volgende vragen op het bord om het experimenteren enigszins te sturen. Verdeel de vragen over de groepjes.

Vraag: *Waarom draait alles om de zon?*

Antwoord: als een voorwerp niet zou draaien om de zon, dan zou het worden opgeslokt door de zon, of verdwijnen uit het zonnestelsel.

Bewijs: leg of bevestig een gewicht in het midden. Rol een knikker richting het gewicht, of juist van het gewicht af. Deze knikkers vallen van het doek (verdwijnen uit het zonnestelsel), of gaan naar het midden (verdwijnen in de zon).

Vraag: *Waarom is de zon zo zwaar ten opzichte van de planeten?*

Antwoord: het zonnestelsel is ontstaan uit een wolk stof. Het grootste gedeelte van de stofwolk klonterde samen in het midden. Op deze plek ontstond de zon. Daaromheen draaide nog overgebleven stof. Dat vormde later de planeten en andere objecten in ons zonnestelsel.

Bewijs: gooi een handvol knikkers op het doek in meerdere richtingen (zonder massa in het midden). Bijna alle knikkers klonteren vrijwel direct samen. Er blijven een paar knikkers draaien om het hoopje knikkers in het midden. Let op! Dit gebeurt allemaal heel snel: binnen 5 seconden. Herhaal het experiment meerdere malen om goed te kijken wat er gebeurt. Dit experiment geeft ook een beetje een bewijs voor vraag 1. Het ontstaan van het zonnestelsel wordt ook uitgelegd in de NTR-cliphanger Hoe is ons zonnestelsel ontstaan? (www.bit.ly/ontstaan_zonnestelsel)

Vraag: *Wat gebeurt er als twee objecten in dezelfde baan om de zon draaien?*

Antwoord: als de objecten zwaar genoeg zijn, zullen ze naar elkaar toe bewegen en/of om elkaar heen draaien. Op deze manier zijn planeten en manen ontstaan.

Bewijs: leg of bevestig een gewicht in het midden. Gooi twee knikkers tegelijk in dezelfde richting. De knikkers zullen naar elkaar toe bewegen en om elkaar heen draaien. Dit gebeurt niet altijd. Herhaal het experiment desnoods om het opnieuw aan te tonen. Bekijk ook of het experiment beter werkt met grote of kleine knikkers, en met een groter of kleiner gewicht in het midden. Waarschijnlijk werkt het experiment het beste met een licht gewicht in het midden.

Vraag: *Hoe bewegen objecten tussen de maan en de aarde?*

Antwoord: er zijn meerdere mogelijkheden. Stabiele banen zijn elliptisch op grote afstanden en maken een 8 als ze dichterbij komen. Ruimteschepen die in het verleden van de aarde naar de maan vlogen, maakten ook een baan die eruit ziet als een 8. Het ruimteschip draaide eerst een aantal maal om de aarde en vervolgens een aantal

maal om de maan in tegengestelde richting.

Bewijs: hiervoor is een zwaartekrachtsveld met twee vaste massa's nodig. In de instructie hierboven staat uitgelegd hoe dat moet. We gaan er gemakshalve vanuit dat de aarde en de maan ten opzichte van elkaar niet bewegen. Probeer knikers in een baan rondom de twee objecten te brengen. Banen die dicht bij de massa's zijn, bewegen in een 8, of zigzaggen tussen de twee puntmassa's. Let op! Het maken van een 8 vereist wel wat oefening.

Afsluiting 10 minuten

De leerlingen hebben na het experimenteren een goed beeld van de zwaartekracht in ons zonnestelsel. Behandel de vragen hierboven en vraag de leerlingen hun bevindingen te demonstreren.

Kom daarna terug op de antwoorden die ze hebben gegeven op de openingsvraag van de les. Vraag de leerlingen of de antwoorden kloppen. Hieronder een evaluatie van mogelijke ideeën van de leerlingen:

- 1 Het ruimteschip vliegt in een rechte lijn naar het einddoel. Dit is heel moeilijk, aangezien de zon het ruimteschip continu probeert af te buigen. Om in een rechte lijn te vliegen, vlieg je tegen de zwaartekracht in en dat kost veel energie.
- 2 Je moet het ruimteschip op het juiste moment lanceren. In de ruimtevaart wordt de lanceerdatum heel zorgvuldig gekozen. Er wordt goed gekeken naar hoe de planeten staan en welke kant ze op bewegen. Tijdens de reis van het ruimteschip beweegt het einddoel ook gewoon door en dit moet je meenemen in de voorspelling. Als je te vroeg of te laat vertrekt, mis je het einddoel.
- 3 Het ruimteschip vliegt in tegengestelde richting van de baan van de aarde. Dit is ook heel lastig, aangezien de aarde zelf met hoge snelheid om de zon draait (zo'n 30 km/s). Stel je voor dat je van een rijdende trein springt tegen de rijrichting in. Waarschijnlijk zul je wel achter de trein terecht komen, maar je zult in dezelfde richting als de trein bewegen. Als er extra tijd is: onderstaand ludiek experiment van het tv-programma proefkonijnen levert hiervoor een bewijs (www.bit.ly/1qLK0fe) vanaf 4:15.
- 4 Het ruimteschip draait rondjes om de zon. Dit is erg waarschijnlijk, omdat de zon alles naar zich toe trekt. Als het ruimteschip in de juiste richting vliegt, komt het vanzelf in een baan rondom de zon.
- 5 Het ruimteschip moet in dezelfde baan om de zon komen als het einddoel. Niet alleen is dit belangrijk om op de plek van bestemming te komen, ook is het belangrijk dat het ruimteschip dezelfde snelheid heeft als het einddoel. Als er te veel snelheidsverschil is, stort het ruimteschip te pletter.

Tot slot kunt u de baan van Rosetta laten zien. Ruimtesonde Rosetta is in 2004 vertrokken om in 2014 te landen op een komeet. In de filmpjes is te zien hoe de ruimtesonde een aantal omwentelingen om de zon maakt en ook gebruikmaakt van de zwaartekracht van de aarde en Mars om zijn baan aan te passen (www.bit.ly/YY0qe1).

Let op!

De zwaartekrachthoepel als model heeft enkele tekortkomingen:

- Op het elasthan remmen de knikers af door wrijving. In werkelijkheid remmen de planeten niet af, maar blijven ze rondjes draaien.
- Als een knikker zwaar genoeg is, zal deze naar het midden rollen. Bij zeer rekbaar elasthan zal dat minder snel gebeuren.
- De zwaartekrachthoepel is een tweedimensionaal model. In werkelijkheid is het zonnestelsel driedimensionaal en is er geen trechtervormige omgeving waarin de objecten naar beneden vallen. De trechter is een visualisatie van een onzichtbare kracht.
- De vervorming van het lycra is niet een-op-een gelijk met de zwaartekrachtsvelden. Evenmin is het een schaalmodel. Wel geeft het lycra een goed beeld wat er in eenvoudige situaties gebeurt met objecten in het zonnestelsel.

Achtergrondinformatie

In het zonnestelsel wordt elk voorwerp aangetrokken door de zon en de planeten. De kracht waarmee het voorwerp wordt aangetrokken door een hemellichaam, is te berekenen met de gravitatiewet van Newton. Alle voorwerpen trekken elkaar aan. Hoe zwaarder de voorwerpen, hoe harder ze elkaar aantrekken. Hoe verder de voorwerpen van elkaar verwijderd zijn, hoe lager de aantrekkingskracht:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

F is de kracht tussen twee massa's m_1 en m_2 op afstand R van elkaar. Zwaartekracht is altijd een wisselwerking, maar bij een aantrekkingskracht tussen grote hemellichamen en kleine voorwerpen, kunnen we aannemen dat de planeet stilstaat. De kleine voorwerpen vallen dan allemaal met dezelfde versnelling:

$$F = m_1 g = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

$$g = G \frac{m_2}{R^2}$$

Hierin is g de valversnelling (toename van de snelheid per seconde) op een planeet met massa m_2 . De grootte van de valversnelling zegt dus direct iets over hoe hard alle voorwerpen op afstand R worden aangetrokken.

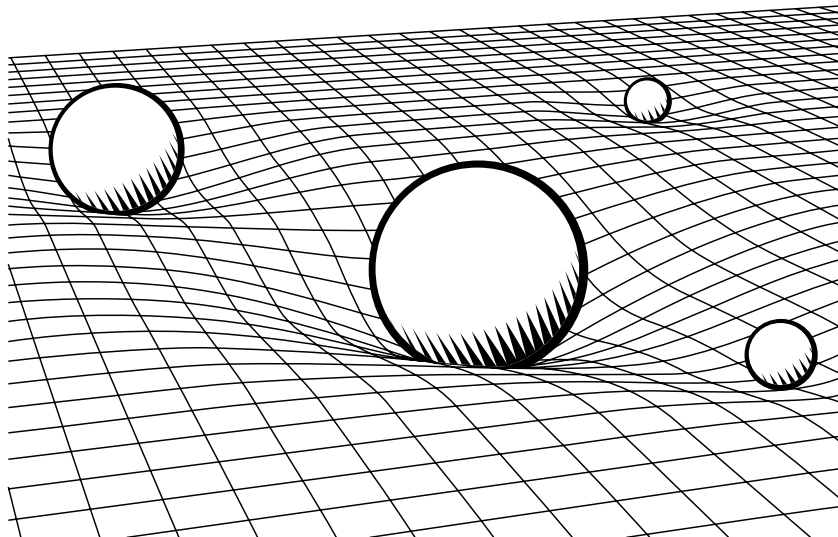
Hemellichaam (afstand tot het middelpunt)	Grootte valversnelling (m/s ²)
Aarde (aan het oppervlak)	9,8
Maan (aan het oppervlak)	1,6
Aarde (op afstand 380.000 km, ongeveer waar de maan draait)	0,0027
Zon (aan het oppervlak)	274
Zon (op afstand 150 miljoen km, ongeveer waar de aarde draait)	0,0059

Merk op dat er overal in het zonnestelsel een aanzienlijke hoeveelheid zwaartekracht is. Zelfs op grote afstand van de zon of van de aarde is er een valversnelling van enkele mm/s^2 , wat voor een stilstaand voorwerp na een uur al zou leiden tot snelheden van enkele meters per seconde. De maan zal echter niet te pletter storten op de aarde en de aarde niet op de zon. Beide worden enkel afgebogen, zonder dat ze dichterbij de aarde respectievelijk de zon komen.²

Verder is het opvallend dat de maan harder wordt aangetrokken door de zon dan door de aarde – aangenomen dat de maan en de aarde zich op ongeveer dezelfde afstand tot de zon bevinden. De maan draait weliswaar om de aarde, maar ook om de zon. De zwaartekracht van de zon is verreweg de dominantste kracht in het zonnestelsel.

Bovenstaande berekeningen en bevindingen kunnen bovenbouwleerlingen prima uitrekenen en beredeneren. Onderbouwleerlingen kennen de formules nog niet en voor hen lijkt het moeilijk voor te stellen hoe zwaartekracht in de ruimte werkt. Maar wanneer we de zwaartekracht visualiseren als in onderstaande afbeelding, wordt onmiddellijk duidelijk hoe de zwaartekracht de beweging van objecten beïnvloedt.

2 Om precies te zijn: de maan en aarde draaien niet in cirkels, maar in ellipsen. De afstand tussen de maan en de aarde varieert van 363.000 tot 406.000 km. Soms komt de maan dus wel dichterbij, om een paar dagen later weer verder van de aarde vandaan te bewegen. Voor de aarde is de variatie in afstand een stuk kleiner: tussen de 146,6 miljoen en 152,6 miljoen km.



De ballen zijn hemellichamen. Het grid geeft weer hoe sterk de zwaartekracht is en in welke richting die loopt: hoe steiler het grid, hoe meer zwaartekracht (hoe hoger de valversnelling) in de richting waarnaar het grid afloopt. Het grid noemen we ook wel het zwaartekrachtsveld. Op de afbeelding is duidelijk te zien dat de grote (zwarte) bal

het zwaartekrachtsveld het meeste vervormt en dus de meeste zwaartekracht veroorzaakt. De kleinere ballen vervormen het veld ook, maar veel minder sterk en over een veel kleinere afstand. Dicht bij de grote bal is de zwaartekracht het sterkst.

Zouden de ballen nu stilliggen, dan rollen ze naar elkaar toe, terwijl ze het grid gedurende de beweging aanpassen. De kleine ballen zullen vooral in de richting van de grote bal bewegen, maar de grote bal zal ook een beetje naar de kleine ballen toe bewegen.

Dit komt overeen met ons zonnestelsel, waarin de zon de grootste massa is. De zon bevat 99,86 procent van alle massa in het zonnestelsel en is dus ruim 700 maal zo zwaar als alle planeten bij elkaar. De zon heeft daardoor verreweg de sterkste invloed op de beweging van objecten. Het is dus niet vreemd dat alle planeten en planetoïden om de zon draaien.