The background is a complex, blue-toned digital or sci-fi scene. In the foreground, the right side of a woman's face is visible, looking upwards with a slight smile. The background features a glowing blue orb, a winged creature with a glowing blue core, and various abstract light patterns and particles. The overall aesthetic is futuristic and ethereal.

ICARUS AT THE EDGE OF TIME

Lerarenhandleiding

Droom je wel eens dat je aan een adembenemend avontuur deelneemt?

De **Griekse mythologie** vertelt het verhaal van Icarus, een jongen die - ondanks de waarschuwingen van zijn vader - met zijn vleugels gemaakt van veren en **bijenwas** zo dicht langs de **zon vloog**, dat de was smolt, de **vleugels** uit elkaar vielen en hijzelf in zee **stortte**. **Icarus at the Edge of Time** ('Icarus aan de grenzen van de tijd') gaat over een andere jongen, die vlak langs een **zwart gat** durft te vliegen en dat avontuur nog **overleeft** ook.

De **Griekse mythe** suggereert dat het te **gevaarlijk** is om iets **nieuws** te proberen. Maar doen wat nog nooit eerder is gedaan, ook al zijn er **risico's**, is precies wat **wetenschappers** moeten doen om grote **doorbraken** te bereiken.

Natuurkundige **Brian Greene** heeft de **Icarus-mythe** herschreven om mensen te **inspireren** en het wetenschappelijk **onderzoek** te **stimuleren**. Oorspronkelijk heeft hij **Icarus at the Edge of Time** als een kinderboek geschreven, later werkte hij het verhaal om tot een **multimediashow**. 'Het was mijn bedoeling om een **voorstelling** te maken die dezelfde prachtige **dramatiek**, muziek en **puntje-van-de-stoel-kwaliteit** heeft als sommige andere beroemde vertellingen,' legt Greene uit, 'maar waarbij de verhaallijn op wetenschap berust.'

ALGEMENE VOORBEREIDING

Voorbereiding voor het bezoek aan de manifestatie

1. Wat gaan we zien?

a. Geef een korte inleiding over het zonnestelsel. De zon als ster met daaromheen cirkelende planeten. (Niet al te diep op ingaan, want we gaan veel verder de ruimte in.)

Laat een schaalmodel zien.

Een schaalmodel zou kunnen zijn de zon als voetbal. Dan is de aarde een klein knikkertje en de maan een zoutkorreltje.

Zet de zon (voetbal) tien meter van de aarde (knikkertje). Dan staat de maan (zoutkorrel) op 2,5 centimeter. Proxima Centauri, de dichtstbijzijnde ster, staat dan op 3000 kilometer. Dit geeft een goed idee hoe leeg de ruimte is.

b. Iets over sterren vergeleken met de zon.

Enkele punten die aangeroerd kunnen worden

- Enig gevoel laten krijgen voor grootteordes.
- De sterren staan heel ver weg: de dichtstbijzijnde op $4 \cdot 10^{16}$ meter.
- Een sterrenstelsel zoals onze Melkweg is een verzameling van 100 miljard sterren.
- Er zijn ook weer 100 miljard sterrenstelsels.

c. Voorbereiden op merkwaardige manipulaties met tijd en ruimte.

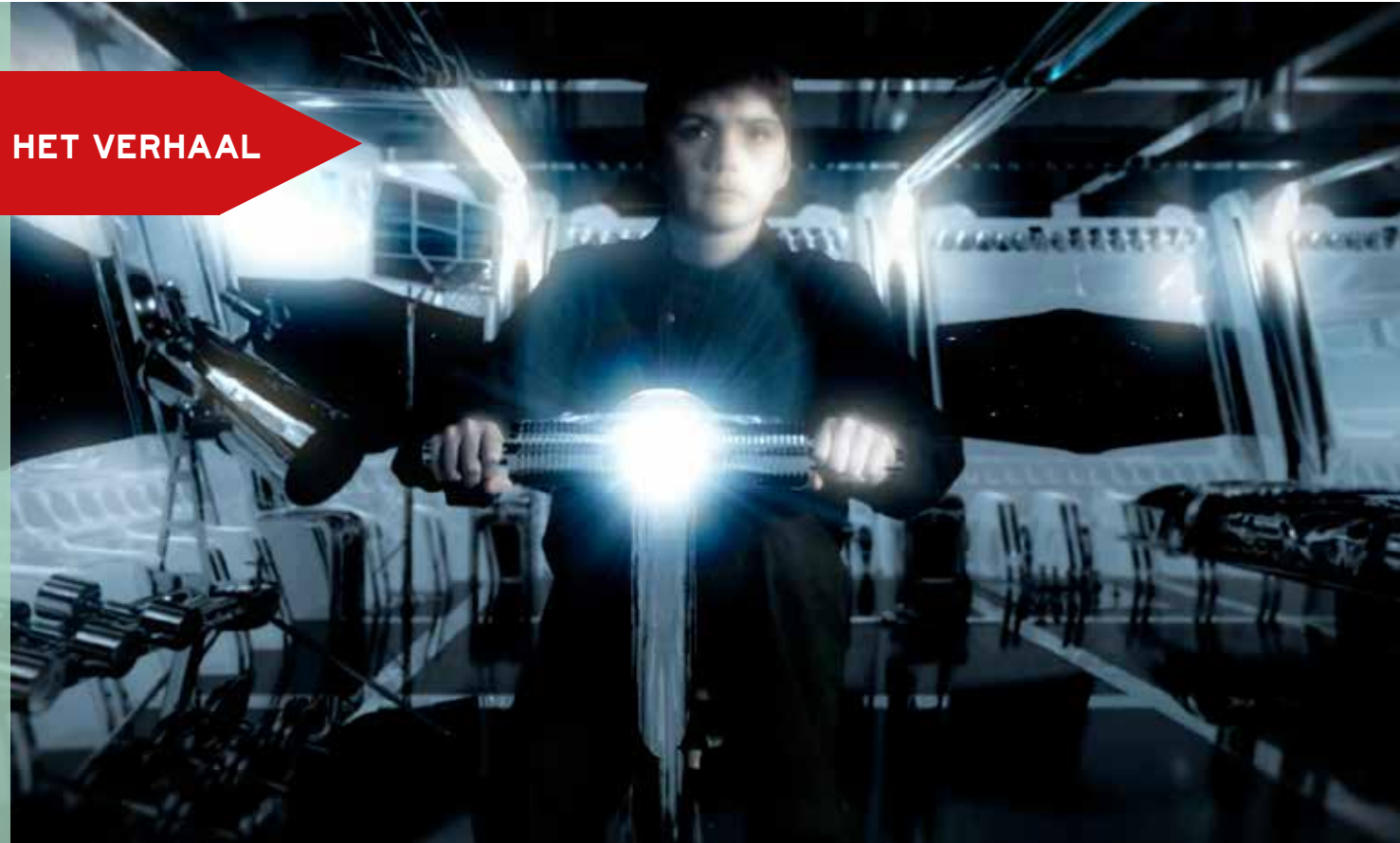
2. Practica

Benadrukken dat ze ook in de film aspecten te zien krijgen die ze in het practicum moeten gebruiken.

Je gaat metingen verrichten dus:

- Administreer goed, meet meerdere keren.
- Let op de eenheden, meet nauwkeurig.

Houd een klasgesprek over de informatie op pag. 3 t/m 10.



Aan het begin van het verhaal maken we kennis met Icarus, die zich aan boord bevindt van 'Proxima', een machtig ruimteschip dat op weg is naar een aarde-achtige

planeet bij Proxima Centaurus, de ster die het dichtst bij de zon staat. Deze 40 biljoen kilometer ($4 \cdot 10^{16}$ m) lange reis, die meer dan een eeuw zal duren, is begonnen onder leiding van Icarus' overgrootvader en zal eindigen wanneer Icarus' kinderen worden geboren.

Icarus smacht ernaar om méér te zijn dan een schakel in een keten. Wanneer het ruimteschip in de buurt van een onbekend zwart gat komt, twijfelt hij geen moment: hij wil het gaan verkennen. Vanwege de gevaren weigert zijn vader om hem te laten gaan, maar Icarus ontsnapt en vliegt tot vlak bij het zwarte gat, om daar op veilige afstand omheen te gaan cirkelen. Hij is opgetogen - niet alleen over het prachtige schouwspel, maar ook over zijn eigen moed. Na een uur keert Icarus terug naar de 'Proxima' om zijn triomfantelijke verhaal te kunnen doen.

Maar de 'Proxima' is weg. In plaats daarvan ziet Icarus een interstellare snelweg die wemelt van de ruimteschepen. Hij gaat aan boord van een ervan, ontdekt dat er duizenden jaren zijn verstreken en realiseert zich dat hij vergeten is dat de tijd wordt beïnvloed door de zwaartekracht. Zijn klok is tijdens de reis heel anders gaan lopen dan de klokken van de achterblijvers. Hij heeft het bereiken van zijn doel moeten bekopen met het verlies van iedereen die hem lief was.

In de bibliotheek van het ruimteschip komt hij niet alleen te weten hoe de reis van de 'Proxima' is afgelopen, dat er een galactische regering is opgericht en allerlei nieuwe ontdekkingen zijn gedaan, maar stuit hij ook op de legende van een jongen die - ondanks de waarschuwingen van zijn vader - dicht langs een zwart gat vloog en nooit terugkwam. Tot nu toe dan.

Hoe kan een 'reisje' naar de rand van een zwart gat zulke grote gevolgen hebben voor Icarus, en hem duizenden jaren de toekomst in sturen? Om te begrijpen wat zwarte gaten zijn, en hoe ze ruimte en tijd beïnvloeden, moeten we beginnen bij de zwaartekracht of gravitatie.

Wat is zwaartekracht?

Tot aan de 17de eeuw was de gravitatie voor de meeste mensen een mysterieuze kracht. Bekend was dat een appel die uit een boom valt altijd op de grond belandt. Ook was bekend dat de maan altijd in zijn baan blijft en niet naar de aarde toe valt. Maar men wist niet dat de appel en de maan aan één en dezelfde natuurkracht onderworpen zijn: de gravitatie.

Toen kwam de Engelse wetenschapper Isaac Newton, die hemel en aarde verenigde. Hij legde uit dat zwaartekracht de aantrekkingskracht tussen twee willekeurige massa's is en dat de grootte van de aantrekking afhankelijk is van de massa van de objecten en van hun onderlinge afstand. Als de massa's groter worden wordt de gravitatiekracht groter en ook als de afstand tussen de massa's kleiner wordt neemt de gravitatiekracht toe.

Newton meende dat de zwaartekracht als het ware de 'lijm' is van het dagelijks leven: zij is van invloed op objecten op aarde én in de ruimte. Hij kwam met een wiskundige vergelijking die allerlei bewegingen kon voorspellen de wijze waarop een honkbal door de

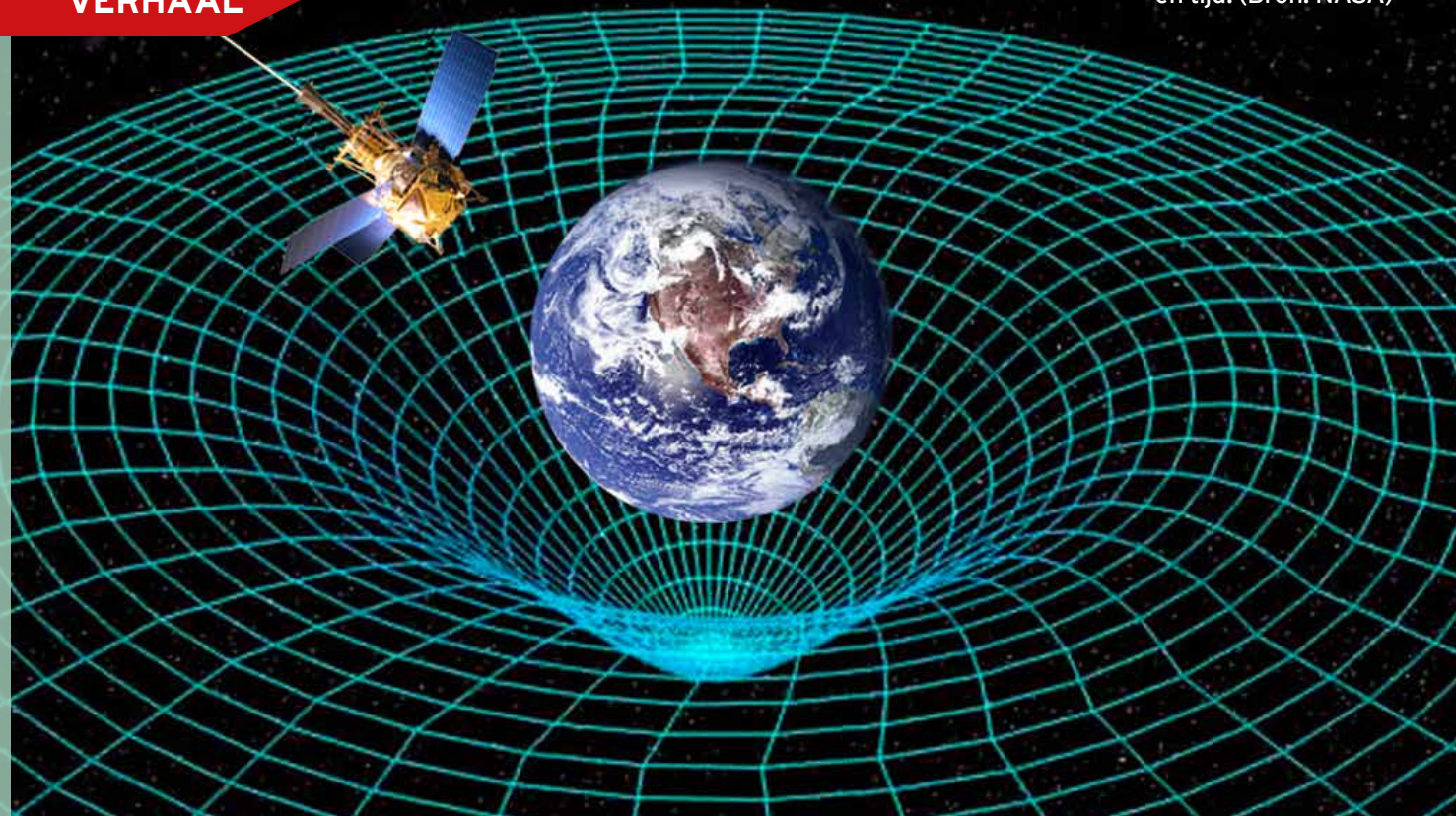
lucht vliegt maar ook de baan van een planeet.

Deze theorie was gebaseerd op Newtons visie op de ruimte. In de ruimte leek dan wel niets te gebeuren, maar er gebeurt wel degelijk iets: allerlei interacties tussen objecten vinden er plaats, waaronder gravitatieaantrekking.

Deze tekening geeft een impressie van de Melkweg. Haar spiraalarmen bestaan uit miljarden sterren. (Bron: NASA/JPL-Caltech)



Deze tekening toont een satelliet die rond de aarde draait. Zijn taak? Het opmeten van het heelal in vier dimensies: hoogte, breedte, lengte en tijd. (Bron: NASA)



Hoe overbrugt de zwaartekracht de lege ruimte?

Newtons theorie stelt ons in staat om nauwkeurige voorspellingen te doen over de grootte van de gravitatiekrachten, maar zij verklaart niet hoe de gravitatie feitelijk werkt. Hoe slaagt de zon er bijvoorbeeld in om, gescheiden door 150 miljoen kilometer ogenschijnlijk lege ruimte, de aarde te beïnvloeden? Newton kende dit probleem, maar liet de oplossing ervan over aan zijn opvolgers.

Begin 20ste eeuw was het Albert Einstein die deze uitdaging aannam. Hij begon met de vraag wat ruimte nu eigenlijk is. Voor Newton was de ruimte een passieve achtergrond, onaangedaan door de massa's daarbinnen. Einstein opperde echter dat de ruimte actief en dynamisch is – iets dat kan buigen, draaien en golven. Een volmaakt lege ruimte zou volkomen vlak

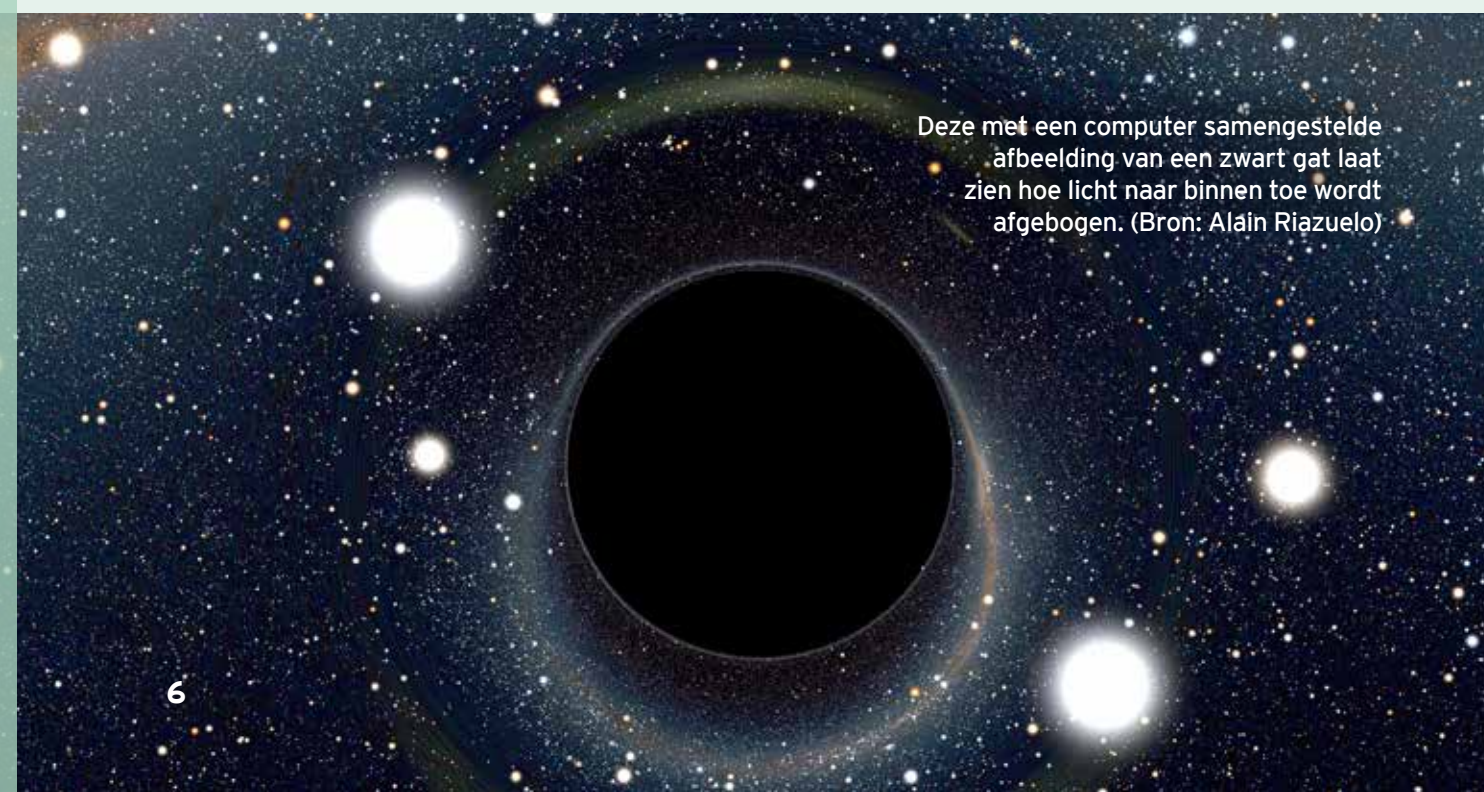
zijn. Maar de aanwezigheid van een object zou ertoe leiden dat de omliggende ruimte kromtrekt, zoals er ook een deuk in een vlies van een trampoline ontstaat als je daar een bowlingbal op legt. De kromming van de ruimte geeft de zwaartekracht door en oefent invloed uit op andere massa's. Dit betekent onder meer dat de aarde een zwaartekrachtspuit in de ruimte veroorzaakt, en dat de minder zware maan in zijn baan blijft doordat hij langs de rand van die put rolt. Tegelijkertijd rolt de aarde rond de soortgelijke, maar veel diepere zwaartekrachtspuit van de veel zwaardere zon. Wat ervoor zorgt dat de zwaartekracht de lege ruimte kan overbruggen is dus de kromming van de ruimte zélf.

Wat is een zwart gat?

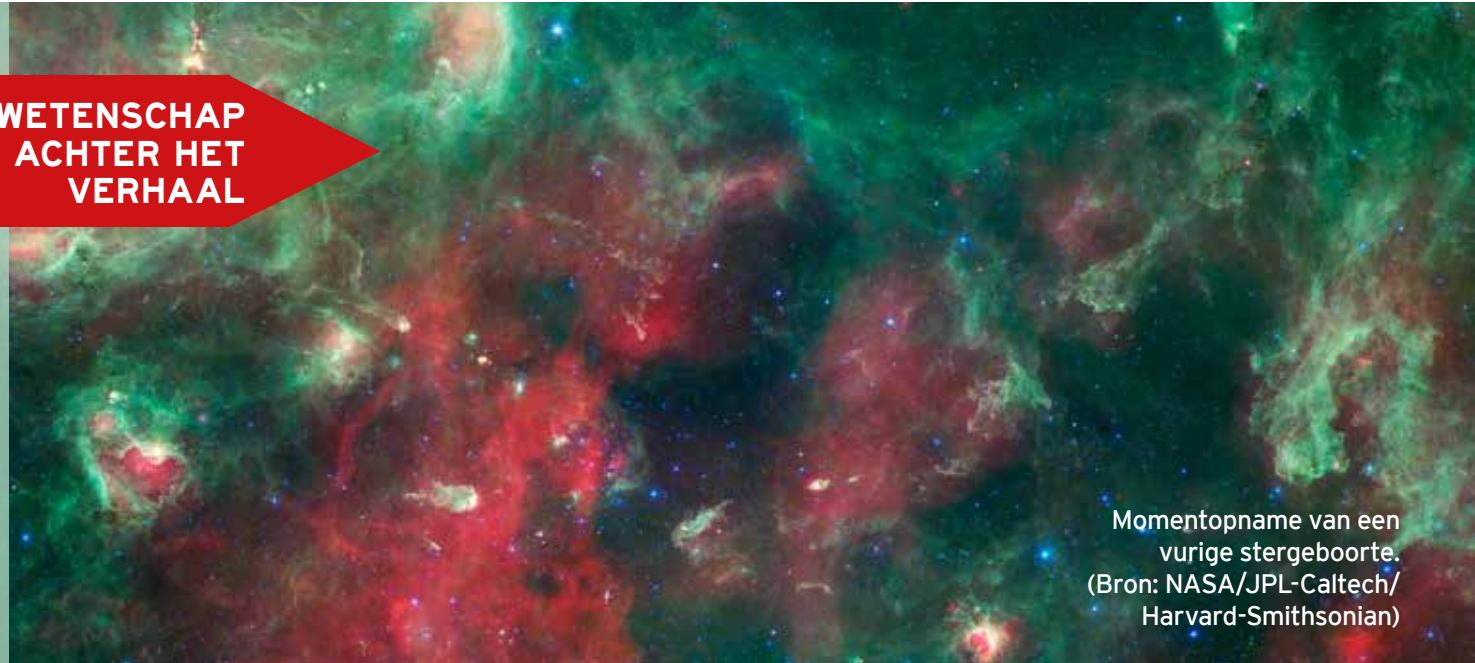
Einstein publiceerde zijn verklaring van de zwaartekracht in 1916, op het hoogtepunt van de Eerste Wereldoorlog. In datzelfde jaar vocht de Duitse sterrenkundige Karl Schwarzschild aan het Russische front, waar hij verantwoordelijk was voor het berekenen van kogelbanen – dat wil zeggen: nadenken over hoe kleine, zware kanonskogels door de ruimte bewegen. Toen hij kennisnam van Einsteins theorie, raakte hij opgewonden. Hij kwam al snel tot de conclusie dat als een object maar klein en **compact** genoeg was, zoals een samengeperste **ster**, de kromming van de ruimte zo sterk zou zijn dat alles wat te dicht in de buurt kwam niet meer aan de greep van zijn zwaartekracht kon ontsnappen. Het zou zich gedragen als een draaikolk of waterval die alles naar zich toe trok. Zelfs licht zou niet kunnen ontsnappen – daarom noemde Schwarzschild dit object een 'donkere' of 'bevroren' ster.

Later bedacht de natuurkundige John Wheeler een spannender naam: '**zwart gat**' – 'zwart' omdat het object geen licht zou uitzenden; 'gat' omdat alles wat te dichtbij kwam erdoor opgeslokt zou worden. Alleen objecten die buiten de Scharzschildstraal blijven, de grens waarbij de zwaartekrachtsaanpakking onweerstaanbaar wordt, zouden kunnen ontsnappen.

Schwarzschild stuurde zijn theorie naar Einstein, die zijn idee interessant vond en ook wiskundig correct. Maar niet alles wat wiskundig juist is bestaat ook echt, en Einstein was dan ook sceptisch over het bestaan van zwarte gaten. Welk bewijs was er? En hoe kon iets zo klein en compact worden? Om onze zon in een zwart gat te veranderen, zou je haar moeten samenpersen tot iets dat maar een paar kilometer groot is. Een theelepeltje van haar materie zou dan net zoveel wegen als de Mount Everest. Hoe krijg je dat voor elkaar?



Deze met een computer samengestelde afbeelding van een zwart gat laat zien hoe licht naar binnen toe wordt afgebogen. (Bron: Alain Riazuelo)



Momentopname van een
vurige stergeboorte.
(Bron: NASA/JPL-Caltech/
Harvard-Smithsonian)

Bestaan zwarte gaten echt?

Vaan twee kanten komen aanwijzingen dat er werkelijk zwarte gaten bestaan. Op de eerste plaats heeft het onderzoek van de levensloop van sterren wetenschappers geleerd hoe een zwart gat kan ontstaan. Wanneer een ster wordt geboren, komt zijn kern tot ontbranding. Dat is het begin van het zogeheten kernfusieproces, dat miljarden jaren kan duren. Bij kernfusie komt een niet aflatende stroom van straling vrij die zich een weg probeert te banen naar het oppervlak van de ster. Het resultaat is een naar buiten gerichte stralingsdruk die de naar binnen gerichte gravitatie in toom houdt en voorkomt dat de ster onder zijn eigen gewicht ineenstort. Maar zodra de brandstof in de kern van de ster opraakt, wordt dit hydrostatische evenwicht verstoord en is de druk van de straling niet meer in evenwicht met de gravitatiekrachten.

Wanneer de kern van een zeer zware ster ineenstort, komt er zoveel energie vrij dat de ster zichzelf aan flarden blaast. Wat er overblijft is afhankelijk van de massa van de kleine, compacte sterkern. Als deze minder dan ongeveer

drie keer zo groot is als de massa van de zon, zal hij samentrekken tot een compacte neutronenster. Maar als zijn massa groter is, stort hij ineen tot een zwart gat.

Het tweede bewijs volgt uit waarnemingen. Omdat zwarte gaten geen licht uitzenden, zijn ze niet rechtstreeks waarneembaar. Wél waarneembaar is de invloed die zij op hun omgeving uitoefenen. Als bijvoorbeeld stof en gas van sterren naar een naburig zwart gat toe vallen, versnellen zij tot bijna de snelheid van het licht en worden zij zo heet dat ze licht en röntgenstraling gaan uitzenden. Dit licht wordt buiten de Schwarzschildstraal geproduceerd, waardoor het kan ontsnappen en wij het kunnen waarnemen. Astronomen hebben ook sterren ontdekt die met zo'n hoge snelheid om een ander object draaien, dat dit object wel een zwart gat móét zijn, omdat een ander object niet genoeg zwaartekrachtsaanpakking zou uitoefenen.

Anders dan wat Einstein dacht, wijst veel erop dat zwarte gaten niet alleen bestaan, maar ook heel talrijk zijn.

Hoe laat is het?

Hoe meer we te weten komen over zwarte gaten, des te verbazingwekkender worden ze. Zo weten we inmiddels dat zwarte gaten niet alleen de ruimte laten krommen, maar ook de tijd.

Einstein was van mening dat ruimte en tijd in feite één geheel vormen: de ruimtetijd. Dat betekent dat de zwaartekrachtsaanpakking van een zwaar object niet alleen de ruimte vervormt, maar ook de tijd. Hoe kleiner je afstand tot het object, des te trager verstrikt de tijd; hoe groter de afstand, des te sneller verstrikt de tijd. Dit wordt tijddilatatie genoemd. Natuurkundigen van het National Institute of Standards and Technology in Colorado zijn erin geslaagd om dit effect te meten. Met behulp van twee van de meest nauwkeurige klokken ter wereld hebben zij ontdekt dat een klok die 33 centimeter hoger

staat dan een andere klok een klein beetje sneller tikt, omdat hij iets minder invloed ondervindt van de zwaartekrachtsaanpakking van de aarde. Dat betekent dat als je bovenin het Empire State Building woont, je sneller ouder wordt dan iemand op de begane grond. In de loop van een mensenleven zou het verschil overigens slechts oplopen tot 104 miljoenste van een seconde.

De tijddilatatie in de buurt van een zwart gat is vele malen groter, omdat de zwaartekrachtsaanpakking ter plaatse zo sterk is. Hoe dichter je een zwart gat nadert, des te sterker vertraagt de tijd ten opzichte van iemand die zich op grote afstand bevindt. Afhankelijk van hoe groot het zwarte gat is, hoe dicht je erbij in de buurt komt en hoe lang je daar blijft, kan het tijdsverschil met iemand op aarde oplopen tot honderden of zelfs duizenden jaren!

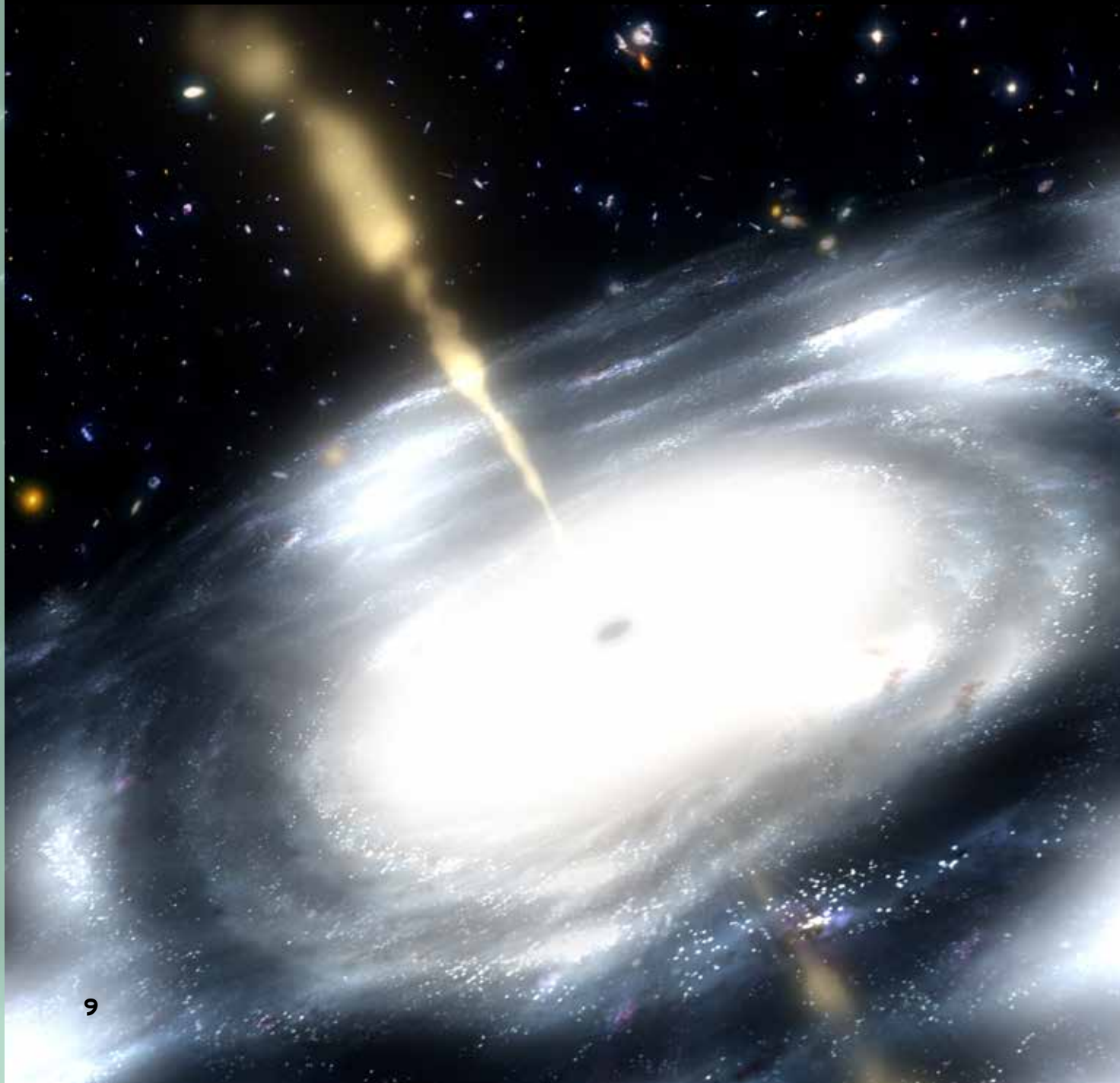


Getekende impressie van het zwarte gat Cygnus X-1. Wetenschappers denken dat zijn Schwarzschildstraal - het gebied waaruit binnenkomende objecten niet meer kunnen ontsnappen - meer dan 800 keer per seconde ronddraait. (Bron: NASA/Digitized Sky Survey)

Veel meer te ontdekken...

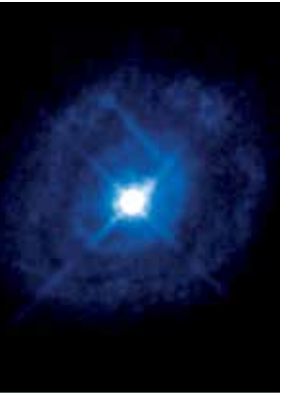
Onze kennis van **zwarte gaten** is de afgelopen honderd jaar flink gegroeid, maar we weten ook nog heel veel **niét**. Een van de grote vragen is wat zich in het **centrum** van een zwart gat bevindt. Sommige wetenschappers denken dat daar de **tijd** ophoudt te bestaan of dat het misschien een **poort** naar een ander heelal is. De beantwoording van vragen als deze is een van de grote overgebleven uitdagingen waar we voor staan.

Illustratie van een zwart gat dat bundels van radiostraling uitstoot.
(Bron: NASA/JPL-Caltech)



Verklarende woordenlijst

ZWART GAT: Een gebied in de ruimte waar de gravitatie zo sterk is, dat alles wat te dichtbij komt - zelfs licht - niet meer kan ontsnappen.



KERN: Het centrum van een ster, waar kernfusie plaatsvindt.

DICHTHEID: De hoeveelheid massa binnen een bepaald volume. Hoe compacter een object, des te groter is zijn dichtheid.

ZWAARTEKRACHT/GRAVITATIE: De aantrekkingskracht tussen objecten. De sterkte van de aantrekking wordt bepaald door de grootte van de massa's en hun onderlinge afstand.

HYDROSTATISCH EVENWICHT: Het evenwicht tussen de naar buiten gerichte stralingsdruk uit de kern van een ster (geproduceerd door kernfusie) en de naar binnen gerichte gravitatie van de ster zelf.

MASSA: De hoeveelheid materie.

KERNFUSIE: Het proces in de kern van een ster waarbij atomen onder hoge temperatuur en druk worden samengesmolten. Daarbij komen kolossale hoeveelheden energie en straling vrij.

STER: Een enorme bal van heet gas die in zijn kern energie produceert via kernfusie.

SUPERNOVA: Een explosie die plaatsvindt wanneer een zeer zware ster zijn hydrostatische evenwicht niet langer in stand kan houden en zijn kern ineenstort.

TIJDDILATATIE: Het afwijken van de tijd onder invloed van de zwaartekracht. Hoe sterker de zwaartekrachtsaantrekking, des te trager verstrijkt de tijd.

Ga naar worldsciencefestival.com/icarus voor meer lesideeën over de wetenschap van zwarte gaten.

Leerdoel:

Voorwerpen van uiteenlopende massa en volume onderzoeken, om inzicht te krijgen in het begrip 'dichtheid' (de verhouding tussen massa en volume).

Materialen:

(per groepje van vier leerlingen)

- 5 stoffen met dezelfde massa (piepschuim, hout, plastic, aluminium, ijzer)
- blokjes aluminium van verschillende groottes
- weegschaal
- 5 plastic bekere
- 5 verschillende materialen om te wegen (wattenbolletjes, knikkers, legosteentjes, piepschuimkorrels, paperclips, kleine muntjes, enz.)

Instructies:

1. Bespreek als klas de begrippen massa, volume en dichtheid.

Neem de 5 blokjes van verschillende materialen, die ongeveer even grote massa hebben. Bijvoorbeeld piepschuim, hout, plastic, aluminium en ijzer.

Neem ook een paar blokjes van hetzelfde materiaal maar verschillend van grootte. Discussieer over volume en massa.

Maak duidelijk dat we het begrip dichtheid nodig hebben om een stof te definiëren.

2. Neem wat verschillende materialen. Voorspel per groepje welk materiaal per gram de meeste ruimte inneemt, en welk de minste. Noteer de resultaten in onderstaande tabel.

materiaal	voorspeld volume: op volgorde van kleinst (1) naar grootst (5)	werkelijk volume: op volgorde van kleinst (1) naar grootst (5)	voorspelde massa: op volgorde van laagst (1) naar hoogst (5)	werkelijke massa: (in grammen)	werkelijke massa: op volgorde van laagst (1) naar hoogst (5)	dichtheid: op volgorde van laagst (1) naar hoogst (5)
A.						
B.						
C.						
D.						
E.						

3. Weeg vervolgens tien gram van elk materiaal af en rangschik de materialen op volgorde van hun volume. Hoe nauwkeurig waren je voorspellingen? Wat valt je op aan het volume van de verschillende materialen?

4. Vul nu elke beker met een ander materiaal. In iedere beker ongeveer hetzelfde volume. Voorspel, voordat je gaat wegen, welke materialen het meest zullen wegen en welke het minst. Weeg dan de bekere, noteer de massa's en

rangschik deze naar oplopende massa. Hoe nauwkeurig waren je voorspellingen? Wat valt je op aan de massa van de verschillende materialen?

Bespreek de resultaten klassikaal. Hoe hangt de dichtheid van een materiaal af van zijn volume en massa? Hoe zou je de materialen rangschikken op dichtheid (van laag naar hoog), en waarom?

Het is dus handig om van 1 cm³ van verschillende stoffen te bepalen wat de massa is.

De dichtheid is groot als iets zwaar is voor zijn grootte.

5. Spectaculaire dichtheid: houd een wattenbolletje in je hand en stel je voor dat het zo zwaar is als:

- een honkbal (142 gram)
- een kleine bowlingbal (2,7 kilogram)
- een mens (65 kilogram)
- de aarde (6.000.000.000.000.000.000.000.000 kilogram)

Dichtheid is een belangrijke factor bij het ontstaan van zwarte gaten. Om de aarde in een zwart gat te veranderen, zou je haar moeten samenpersen tot iets ter grootte van een wattenbolletje - de volledige massa van de aarde samengeperst tot een volume ter grootte van een wattenbolletje. Dezelfde massa in een veel kleiner volume met dus een veel, veel, veel grotere dichtheid!

Leerdoel:

De levensloop van sterren van verschillende massa verkennen en ontdekken welke sterren zwarte gaten worden.

Materialen:

- ballonnen: 12 rode, 12 gele, 4 witte, 2 blauwe (voor een klas van 30 leerlingen)
- witte kralen (doe er 1 in elke rode of gele ballon)
- knikkers (doe er 1 in elke witte ballon)
- stalen kogeltjes, bijvoorbeeld uit kogellager (doe er 1 in elke blauwe ballon)
- speld (om ballonnen te laten knappen)
- rode, gele en zwarte markeerstiften (om ballonnen een andere kleur te geven)

Instructies:

1. Bespreek als klas hoe sterren geboren worden, de rol van kernfusie in de ster-kern en hoe sterren onderling verschillen. Hoewel de sterren aan de hemel op het eerste gezicht veel op elkaar lijken, verschillen ze in massa, grootte, temperatuur, kleur, helderheid, leeftijd en afstand tot de aarde. De massa van een ster is bepalend voor zijn temperatuur, kleur en levensloop. Wat gebeurt er als de brandstof in de kern opraakt? [Zie 'Bestaan zwarte gaten echt?' elders in deze lerarenhandleiding.]

De leerling voelt een beetje aan dat er verschillende soorten sterren zijn met verschillende eigenschappen.

2. De docent deelt de ballonnen uit, één per leerling, en vertelt daarbij hoe zwaar de verschillende sterren ongeveer zijn.

De docent legt uit de werking van de ballonnen en de functie van de inhoud van de ballonnen inhoud van de ballonnen

3. Volg de levensloop van je ster aan de hand van de instructies op de pagina hiernaast. Let daarbij op de kleur van je ster. Je docent zal de verschillende 'leeftijden' roepen, zodat alle leerlingen hun sterren in hetzelfde tempo ouder kunnen laten worden.

- Behandel uitvoerig de stappen die iedere leerling moet uitvoeren.
- Koppel steeds terug naar de tabel.
- Breng begrippen als temperatuur en levensduur aan de orde.

	rode ster (2/5 van de massa van de zon)	gele ster (dezelfde massa als de zon)	witte ster (8-20x de massa van de zon)	blauwe ster (meer dan 20x de massa van de zon)
geboorte	blaas ballon op tot ongeveer 8 cm	blaas ballon op tot ongeveer 8 cm	blaas ballon op tot ongeveer 8 cm	blaas ballon op tot ongeveer 8 cm
5 miljoen jaar	doe niets	doe niets	doe niets	blaas een beetje verder op
10 miljoen jaar	doe niets	doe niets	blaas een beetje verder op	blaas de ballon zo ver mogelijk op en laat hem knappen - supernova-explosie!
500 miljoen jaar	doe niets	doe niets	blaas een beetje verder op; door uitdij-ing koelt ster af (kleur hem geel)	gooi restant ballon de ruimte in; wat overblijft is een kogeltje: een zwart gat!
1 miljard jaar	doe niets	blaas een beetje verder op	blaas de ballon zo ver mogelijk op en laat hem knappen - supernova-explosie!	zwart gat
5 miljard jaar	doe niets	blaas een beetje verder op; door uitdij-ing koelt ster af (kleur hem rood) - een rode reus!	gooi restant ballon de ruimte in; wat overblijft is een knikker: een neutronenster!	zwart gat
10 miljard jaar	doe niets	blaas een beetje verder op, knip de ballon in stukjes: de rode reus stoot zijn buitenste laag af en er ontstaat een gasnevel	neutronenster	zwart gat
50 miljard jaar	blaas een beetje verder op	de gasnevel ver-spreidt zich; wat overblijft is een kraaltje - een witte dwerg!	neutronenster	zwart gat
200 miljard jaar	laat de ballon leeg-lopen en haal het kraaltje eruit; de ster sterft en laat een witte dwerg achter!	laat de ballon leeg-lopen en haal het kraaltje eruit; de ster sterft en laat een witte dwerg achter!	neutronenster	zwart gat

Deze activiteit is gebaseerd op materiaal van het Adler Planetarium (adlerplanetarium.org/teacher-resources)

4. Neem daarna als klas nogmaals de levensloop van de verschillende soorten sterren door - wanneer en hoe ze uitdijen, krimpen, veranderen, enz. Bespreek de volgende vragen: Welke kleur ster leeft het langst en waarom? In hoeverre komen de werkelijke resultaten overeen met je voorspellingen? Welke sterren werden zwarte gaten? Waarom? Welk soort ster is onze zon? Zal de zon ooit in een zwart gat veranderen?

Leerdoel:

Begrijpen welke invloed een zwart gat op tijd en ruimte heeft, en wat gebeurt als je dicht in de buurt van een zwart gat komt.

Instructies:

1. Bespreek als klas de volgende vragen rond 'Icarus at the Edge of Time':

- Wat is zwaartekracht en hoe werkt deze?

Breng de gravitatiewet ter sprake.

- Hoe verandert de gravitatie als de massa's dichter bij elkaar komen?
- Hoe verandert de gravitatie als de massa's groter worden?
- Is de gravitatie op aarde even groot als op de maan?
- Is de gravitatie op aarde overal even groot?

- Wat wist je vóór de show van zwarte gaten?
- Wat heb je nu over zwarte gaten geleerd? Wat verraste je het meest?
- Hoe vervormt een zwart gat ruimte en tijd?
- Hoe weten we dat zwarte gaten ook echt bestaan?

2. In de show was te zien dat naarmate Icarus dichter bij het zwarte gat kwam, zijn vader hem steeds trager zag bewegen – een opvallende tijddilatatie ten gevolge van het sterke zwaartekrachtsveld van het zwarte gat. Om de gevolgen van tijddilatatie na te bootsen worden de leerlingen in groepjes van minstens vier personen ingedeeld. Elk groepje kiest een eenvoudige activiteit om uit te voeren: schoenveters strikken, het alfabet zingen, een paar dansstapjes doen, enz.

3. Elk groepje oefent zijn activiteit. Alle leerlingen beginnen tegelijkertijd, maar op verschillende snelheden – net alsof ze zich op verschillende afstanden van een zwart gat bevinden. De eerste leerling doet de activiteit op normale snelheid, de tweede iets langzamer, de derde nog langzamer en de vierde het langzaamst van allemaal.

- Behandel uitvoerig de stappen die iedere leerling moet uitvoeren.
- Koppel steeds terug naar de tabel.
- Breng begrippen als temperatuur en levensduur aan de orde.

Nadat de groepjes hebben geoefend, presenteren ze het resultaat voor de hele klas.

4. Bespreek als klas wat je over tijddilatatie hebt geleerd. Gaat voor iemand in de ruimte de tijd sneller of trager dan hier op aarde? En voor iemand aan de rand van een zwart gat?

5. Bespreek de tweelingparadox: Van een tweeling beschrijft de een ruimtereis en de ander blijft op aarde. Degene die de ruimtereis gemaakt heeft, is minder ouder geworden. Het effect is erg klein maar toch is het effect altijd aanwezig. Andre Kuipers is met zijn ruimtereis in de orde van een honderdste seconde minder verouderd dan wij.

Leerdoel:

Op creatieve wijze een indruk geven van een bezoek aan een zwart gat.

Instructies:

1. 'Icarus at the Edge of Time' gebruikt film, muziek en verhalen om een voorstelling te geven van een zwart gat. Hoe stel jij je een zwart gat voor – hoe het wordt geboren, hoe het tijd en ruimte vervormt, hoe het objecten die te dicht bij komen opslokt, enz.? Gebruik muziek, dans, toneelspel of kunst om een zwart gat tot leven te wekken.

Leerlingen kunnen dit project individueel, in tweetallen of in groepjes doen.

2. Leerlingen presenteren hun voorstellingen van zwarte gaten aan de klas.

Bespreek na afloop de volgende vragen:

- In hoeverre leken de voorstellingen van een zwart gat op elkaar?
- Waarin verschilden ze?

De conclusie moet zijn: we weten nog heel weinig van zwarte gaten, dus hoe ze er precies uitzien dat zijn speculaties. Dat levert science fiction-achtige voorstellingen die in ieder geval niet kloppen.

Het is heel moeilijk je voor te stellen hoe de natuurkunde bij een zwart gat functioneert.

- Wat vind je het interessantst aan zwarte gaten?

Leerdoel:

Op creatieve wijze een indruk geven van een reis naar de toekomst.

Instructies:

In de show reisde Icarus per ongeluk naar de toekomst, omdat hij vergeten was dat de zwaartekrachtsaantrekking van een zwart gat de tijd beïnvloedt. Stel dat jij zelf de kans zou krijgen om naar de toekomst te reizen...

- Hoe ver zou je dan vooruit in de tijd willen gaan?
- Hoe denk je dat die toekomst er uit zou zien?

Geef op creatieve wijze antwoord op deze vragen. Schrijf een gedicht of verhaal, of maak een dagboek van je reis naar de toekomst.