

**Naam:**

**Klas:**

**Datum:**

## GLIESE 667

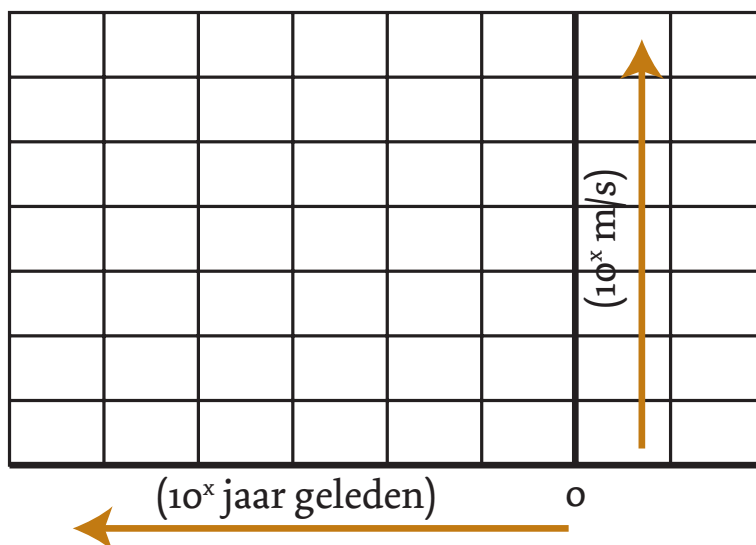
### WE GAAN OP REIS

De invloed van de mensheid reikt steeds verder. In de oertijd kon een mens zich maar enkele kilometers van zijn huis verplaatsen, maar onze eigen invloedssfeer wordt steeds groter. In 1969 zijn er mensen op de maan geland en inmiddels is de in 1977 gelanceerde Voyager 1 meer dan 18 miljard kilometer (of 120 keer de afstand aarde-zon) van de aarde gereisd. De plannen voor een bemande reis naar Mars beginnen serieuze vormen te krijgen. De kans dat we in de (verre) toekomst nog veel sneller kunnen reizen lijkt hierdoor best groot.

1.
  - A. Vul de tabel in met behulp van schatten en eventueel online bronnen. Wat is de snelheid waarmee mensen konden voortbewegen met de verschillende voertuigen? Geef ook aan vanaf wanneer dit de maximale voortbewegingssnelheid van de mens was en noteer je antwoorden als machten van tien.

Voortbeweging	Snelheid ( $10^x$ m/s)	Wanneer ( $10^x$ jaar geleden)
Lopen/rennen		
Paard		
Elektrische trein		
Raket		
Helios I ruimtesonde		

- B. Gebruik de tabel die je in opdracht 1A gemaakt hebt om een grafiek te maken in het onderstaande assenstelsel.



- C. Denk je dat mensen ooit met de snelheid van het licht kunnen reizen? Baseer je antwoord op je grafiek.

.....

.....

.....

Kijk het filmpje met de titel Gliese 667 over deze module op <http://www.quantumuniverse.nl/filmpjes>. Erik Verlinde is een theoretisch fysicus. Hij is vooral bekend vanwege zijn werk aan de snaartheorie en vanwege zijn nieuwe theorie waarin hij voorstelt dat zwaartekracht geen fundamentele kracht is, maar een statistisch effect.

- 2. Erik Verlinde heeft het in het filmpje over de speciale relativiteitstheorie. Beschrijf wat voor invloed de speciale relativiteitstheorie zou kunnen hebben op je voorspelling van opdracht 1C.

.....

.....

.....

**RUIMTEREIZEN**

In het jaar 2063 kan de mensheid eindelijk reizen met snelheden die in de buurt komen van de snelheid van het licht. Waarom de lichtsnelheid niet helemaal bereikt kan worden leer je verderop. Er gebeuren vreemde dingen als je zo snel reist. Een deel van deze effecten kunnen we begrijpen aan de hand van de relativiteitstheorie. In de komende opdrachten ben jij een onderzoeker in een raket die op zoek is naar buitenaards leven. Je bent onderweg naar de ster Gliese 667 die op ongeveer 22 lichtjaar van de aarde staat. Om deze ster draait een planeet die op de aarde lijkt, waar vloeibaar water aanwezig is en, naar je hoopt, ook buitenaards leven. Omdat de reis zo ver is moet je erg snel bewegen als je binnen je leven heen en weer wilt.

- 3. Bereken met behulp van je eigen geboortedatum en de klassieke formule  $x = v \cdot t$  hoe snel je raket ongeveer moet gaan om binnen je verwachte levensloop weer terug te kunnen komen. Laten we aannemen dat de levensverwachting voor mensen van jouw leeftijd in 2063 ongeveer 110 jaar is. Geef je antwoord als een fractie van de lichtsnelheid  $c$  (bv. 0,5  $c$  voor 150.000 km/s).

.....

.....

.....

Albert Einstein heeft zijn speciale relativiteitstheorie gebaseerd op twee verschijnselen die in experimenten aan het einde van de 19de eeuw en eerder geobserveerd werden:

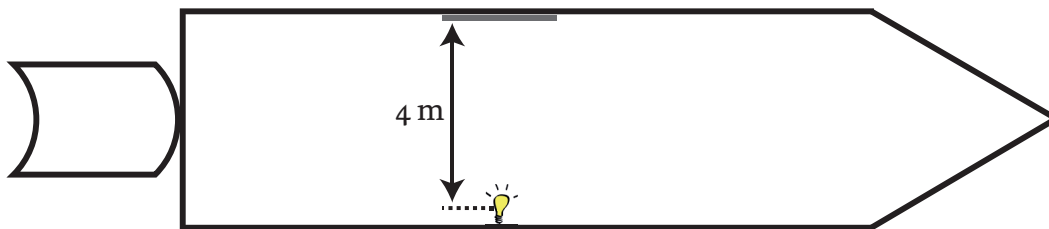
**Aanname 1:** Alle natuurwetten en -constanten zijn hetzelfde voor iedereen die met een eenparige snelheid beweegt.

**Aanname 2:** De lichtsnelheid in een vacuüm is een natuurconstante.

Een gevolg van de combinatie van deze twee aannames is het volgende. Hoe snel je ook gaat, ten opzichte van jou is de lichtsnelheid altijd **300.000 km/s**, onafhankelijk van de snelheid waarmee jij ten opzichte van de lichtbron beweegt. Dit is onder andere aangetoond door het beroemde experiment van Michelson en Morley in 1887 met behulp van de snelheid van de aarde om de zon. Als jij je bijvoorbeeld met 150.000 km/s verplaatst ten opzicht van de lichtbron is de snelheid van het licht uit die lichtbron ten opzichte van jou nog steeds 300.000 km/s. Het is vooral dit vreemde maar experimenteel geverifieerde feit waardoor de relativiteitstheorie tot soms intuïtief bizarre conclusies leidt.

4. Het is 5 april 2063 en jij zit in de hieronder weergegeven raket. Je beweegt ten opzichte van de aarde met een snelheid dichtbij de lichtsnelheid  $c$  en je bent onderweg naar Gliese 667. Je bent hiernaartoe onderweg om uit te vinden of er op één van de planeten die om deze ster draaien leven is. Je doet de lamp aan die op de tekening is weergegeven.

A. Teken in de raket een lichtstraal die heen en weer gaat tussen de lamp en de spiegel (het grijze vlak).



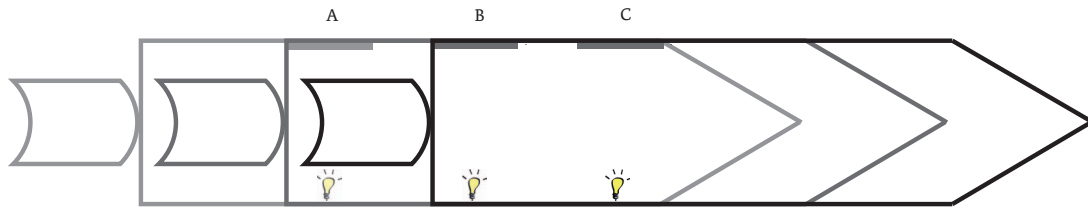
B. Reken uit hoe lang het duurt voor de lichtstraal die je getekend hebt weer terugkeert bij de lamp.

.....

.....

Na een klein half uur kom je langs de aardse kolonie op Mars. De mensen die daar omhoog kijken door hun telescoop zien de spiegel oplichten als deze geraakt wordt door de heen en weer reizende lichtstraal in de raket.

**C.** Teken in onderstaande figuur hoe de mensen op de Marskolonie de lichtstraal zien bewegen terwijl je raket voorbij vliegt. Met de snelheid die je raket heeft weerkaatst de lichtstraal tegen de spiegel bij punt B en komt de hij precies bij het derde lampje weer terug.



**D.** Gebruik de afgelegde afstand en de stelling van Pythagoras om uit te rekenen hoe ver de lichtstraal is gereisd volgens de mensen op de Marskolonie. De afstand tussen A en B is ook 4 meter.

.....

.....

**E.** Bereken hoeveel tijd er is verstreken voor de mensen op de Marskolonie terwijl ze de straal heen en weer hebben zien gaan. Hint: gebruik aanname 2 van de relativiteitstheorie.

.....

.....

**F.** Vergelijk de antwoorden die je hebt gegeven bij vraag 4B en vraag 4E. Wat valt je op?

.....

.....

**G.** Bereken met behulp van je antwoord bij 4E en de bekende afgelegde weg van de raket hoe snel je raket precies gaat ten opzichte van de Marskolonie. Formuleer je antwoord als een fractie van de lichtsnelheid  $c$  (bv.  $0,4 c$  of  $0,6 c$ ).

.....

.....

.....

- H. Herhaal de stappen uit de vorige opgaven om te berekenen hoe snel de raket was gegaan als de lichtstraal de spiegel voor het eerst bij punt C had geraakt.

.....

.....

- I. Hoe zien de mensen op de Marskolonie het verloop van de lichtstraal als je vrijwel met de lichtsnelheid beweegt? Wat betekent dit voor het tijdsverloop in de raket en op Mars?

.....

.....

- J. Verwacht je op grond van opdracht 4I dat je met de lichtsnelheid (of zelfs sneller) zou kunnen reizen?

.....

.....

**TIJDSDILATATIE**

We hebben gezien dat een stilstaande waarnemer de tijd van een bewegende waarnemer langzamer ziet lopen dan die bewegende waarnemer zelf. Hier merkt de stilstaande waarnemer alleen iets van als de bewegende waarnemer beweegt met snelheden die in de buurt komen van de lichtsnelheid  $c$ , zoals in je raket onderweg naar Gliese 667. We noemen dit verschijnsel **tijdsdilatatie**. De hoeveelheid tijdsdilatatie kun je berekenen met de **Lorentz-factor** die wordt aangeduid met de Griekse letter gamma:  $\gamma$ . De formule voor tijdsdilatatie ziet er als volgt uit:

$$\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_r \tag{1}$$

Hierbij is  $\Delta t_m$  de verstreken tijd voor de mensen op de Marskolonie, terwijl  $\Delta t_r$  de waargenomen tijd is voor jou in je raket. We zeggen dat elke waarnemer die dezelfde snelheid en dezelfde bewegingsrichting heeft als jij, gebruik maakt van hetzelfde **referentiestelsel**. Zo hebben de mensen die op Mars wonen een ander referentiestelsel dan de mensen in de raket. In de speciale relativiteitstheorie noemen we een referentiestelsel van een waarnemer die een eenparige beweging uitvoert een **inertiaalstelsel**. De Lorentzfactor  $\gamma$  in formule (1) kun je uitrekenen met de volgende formule:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{2}$$

In deze formule is  $v$  de snelheid van het ene inertiaalstelsel ten opzichte van het tweede, terwijl  $c$  de lichtsnelheid is. De Lorentzfactor  $\gamma$  komt niet alleen terug in de formule voor tijdsdilatatie, maar ook in vele andere formules binnen de relativiteitstheorie. Een van die formules is de wereldberoemde formule uit de relativiteitstheorie die energie aan massa koppelt. Waarschijnlijk heb je deze wel eens zien staan in de vorm  $E=mc^2$ . Deze formule geldt in heel goede benadering voor objecten die reizen met een snelheid die veel kleiner is dan de lichtsnelheid. Voor objecten zoals jouw raket, die met meer dan de helft van de lichtsnelheid reist, geldt echter dat:

$$E = \gamma mc^2 \tag{3}$$

Hierin is  $E$  de energie van het object,  $m$  is de massa van het object en  $c$  is de lichtsnelheid.

**5.**

**A.** Reken met behulp van formule (2) uit wat de waarde van  $\gamma$  is voor de snelheden die je in opgave 4G en 4H hebt gevonden.

.....

.....

**B.** Bereken of dit klopt met de resultaten voor tijdsdilatatie die je bij 4E en 4H van de vorige opdracht hebt gevonden.

.....

.....

**C.** Wat gebeurt er met de waarde van  $\gamma$  als je de lichtsnelheid benadert?

.....

**D.** Beredeneer aan de hand van het bovenstaande nogmaals of je met de lichtsnelheid kunt reizen. Hint: gebruik formule (3).

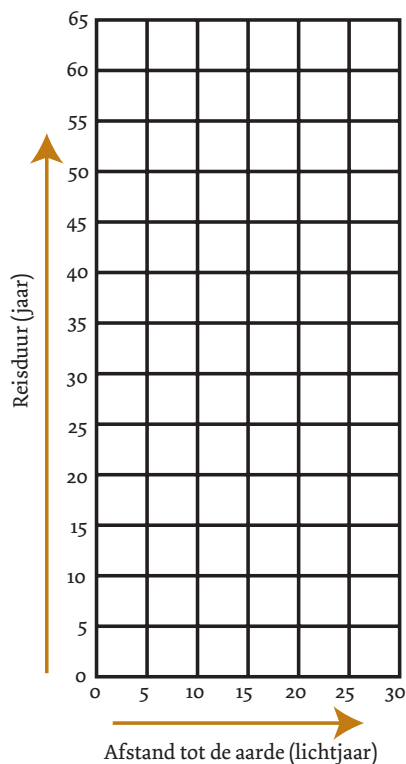
.....

.....

.....

## RUIMTETIJD

Het bestaan van tijdsdilatatie heeft niet alleen gevolgen voor het waarnemen van tijd. De gevolgen van dit verschijnsel reiken veel verder, naar de fundamenteën van tijd en ruimte. Volgens Einstein kun je namelijk niet spreken van de losse begrippen ruimte en tijd, maar alleen van **ruimtetijd**. In deze ruimtetijd kun je niet stilstaan, je reist immers altijd door de tijd. Het blijkt alleen, zoals je hebt gezien in de vorige opgaven, dat als je sneller door de ruimte reist, je automatisch minder snel door de tijd reist. Eigenlijk heeft ruimtetijd dus vier dimensies: de drie gebruikelijke ruimtedimensies, en één tijdsdimensie. Omdat dit heel moeilijk voor te stellen is, gebruiken natuurkundigen vaak een soort platte ruimtetijd. Deze heeft maar één ruimtedimensie en één tijdsdimensie. Hieronder is de ruimtetijd waar jij door reist tijdens je reis naar Gliese 667 weergegeven. Anders dan je waarschijnlijk gewend bent, staat de tijd die je onderweg bent volgens een waarnemer op aarde nu op de verticale as. Op de horizontale as staat de afstand van de aarde weergegeven.



6.

- A. Teken in het bovenstaande assenstelsel een stip op het punt waar Gliese 667 zich bevindt na 5 jaar.
- B. Teken nu waar Gliese zich bevindt na 10, 20, 40 en 60 jaar en verbind alle punten met een lijn.
- C. Bevindt Gliese zich op één plek in de ruimtetijd, of reist de ster ook? Leg je antwoord uit.



- D. Teken in het assenstelsel je reis naar Gliese 667 als je deze geheel aflegt met de snelheid die je in opdracht 4G hebt uitgerekend.
- E. Teken nu met een andere kleur de reis die een lichtstraal buiten de raket maakt die op hetzelfde moment vertrekt van de aarde.
- F. Als het goed is heb je bij opdracht 6D een rechte lijn getekend. Wat is de hoek die deze lijn maakt met de verticale as? En wat is die hoek bij de lijn in opdracht 6E?

.....

.....

De lijn die je hebt getekend in opgave 6E is een belangrijk instrument binnen de relativiteitstheorie. Deze lijn moet vanwege de tweede aanname (licht gaat even snel voor alle waarnemers) namelijk in alle referentiestelsels weergeven dat de lichtstraal met 300.000 km/s reist. We noemen deze lijn de **lichtlijn**.

- G. Kun je vanuit de oorsprong naar het gebied onder de lichtlijn reizen? Leg je antwoord uit.

.....

.....

.....

- H. Voeg aan de grafiek ook je terugreis toe. Hoe lang ben je onderweg geweest in het referentiestelsel van de aarde?

.....

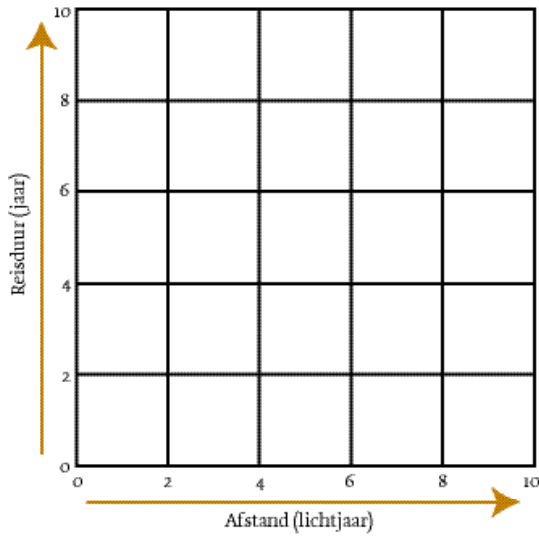
- I. Hoe lang ben je onderweg geweest in je eigen referentiestelsel? Kom je inderdaad terug binnen de levensloop die je hebt volgens opgave 3?

.....

.....

.....

Omdat waarnemers de tijd anders ervaren geeft het diagram dat je hierboven hebt getekend, en dat ook wel een **ruimtetijddiagram** wordt genoemd, alleen een goed beeld van de reis zoals die door een aardse waarnemer wordt gezien. Vanuit je raket gezien ziet de ruimtetijd er heel anders uit.



7.

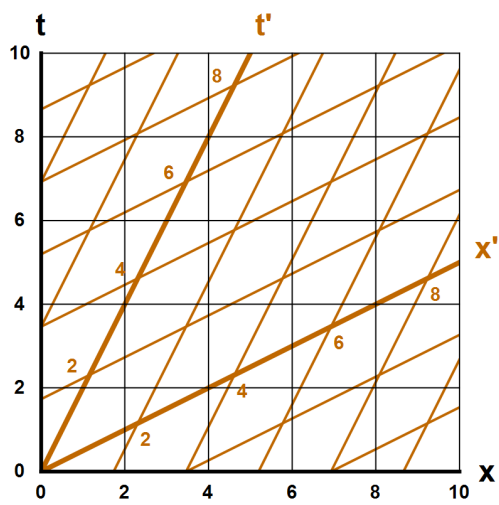
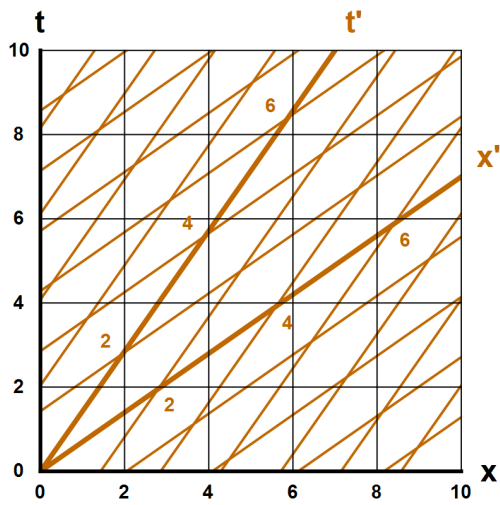
- A. Teken in het bovenstaande assenstelsel de lichtlijn.
- B. Teken in het assenstelsel de eerste tien jaar (volgens een aardse waarnemer) van je reis.
- C. Teken ook een tweede raket die tegelijk met jou van de aarde vertrekt en zich met  $0,5 c$  verplaatst.
- D. Bereken van beide raketten de afstand die ze volgens een aardse waarnemer hebben afgelegd in deze tien jaar.

.....  
 .....

E. Bereken de tijd die in deze tien aardse jaren is verstreken in beide raketten.

.....  
 .....

De assen van het ruimtetijd-diagram geven dus geen goed beeld van de afstanden en tijden die je in jouw eigen referentiestelsel in de raket meet. Het blijkt dat je dit op kunt lossen door andere, scheve, ruimte- en tijdassen in het ruimtetijd-diagram te tekenen, terwijl de grafieken die je getekend hebt onveranderd blijven. Hoe dit eruitziet is op de volgende pagina weergegeven voor referentiestelsels die onderling bewegen met  $0,5 c$  en  $0,7 c$ .



F. Bepaal welk assenstelsel bij welke snelheid hoort. Motiveer je keuze.

.....

.....

G. Teken in het assenstelsel dat de reis van jouw raket beschrijft ook de reis van een andere raket die hetzelfde traject aflegt, maar die een half jaar eerder is vertrokken.

H. Teken in het andere assenstelsel de reis van een lichtstraal die vanuit de oorsprong wordt verzonden. Wat valt je op aan de snijpunten van de lichtlijn met het scheve coördinatenstelsel? Wat betekent dit voor de bewegende waarnemer?

.....

.....

I. Bereken hoe de schaal van de assen tot stand komt.

.....

.....

.....

.....

- J. Beredeneer waardoor de hoek bepaald wordt tussen de ruimte-as van het ruimtetijd-gram van het referentiestelsel van de aarde en die van de raket.

.....

.....

.....

.....

**TOT SLOT**

Op basis van twee simpele aannames kunnen we dus al veel afleiden over de vreemde effecten die ruimtereizen met hoge snelheden zou kunnen hebben. Een daarvan is dat meereizende en stilstaande waarnemers de tijd anders ervaren, een tweede is dat de energie van snel bewegende voorwerpen sterk toeneemt. Beide effecten hangen af van de Lorentzfactor  $\gamma$ .

- 8.
- A. Kijk terug naar je grafiek en voorspelling van opgave 1C. Denk je dat je voorspelling over het breken van de lichtbarrière realistisch is?

.....

.....

.....

.....

- B. Wat zou er in plaats van snelheid op de verticale as van de grafiek die je bij opdracht 1B hebt gemaakt kunnen staan om de voorspelling realistischer te maken?

.....

.....

.....

.....