

RELATIVITEIT – VWO

Foton is een opgavenverzameling voor het nieuwe eindexamenprogramma natuurkunde.

Foton is gratis te downloaden via natuurkundeuitgelegd.nl/foton

Uitwerkingen van alle opgaven staan op natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen

Videolessen over de theorie zijn te vinden op natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen

Theorie bij dit hoofdstuk wordt behandeld in onderstaande videolessen:

[Lichtsnelheid](#)

[Speciale relativiteit](#)

[Tijddilatatie](#)

[Tweelingparadox](#)

[Lengtecontractie](#)

[Rust- bewegende massa](#)

[Relativistisch optellen](#)

[Algemene relativiteit](#)

[Gekromde tijdruimte](#)

[Equivalentieprincipe](#)

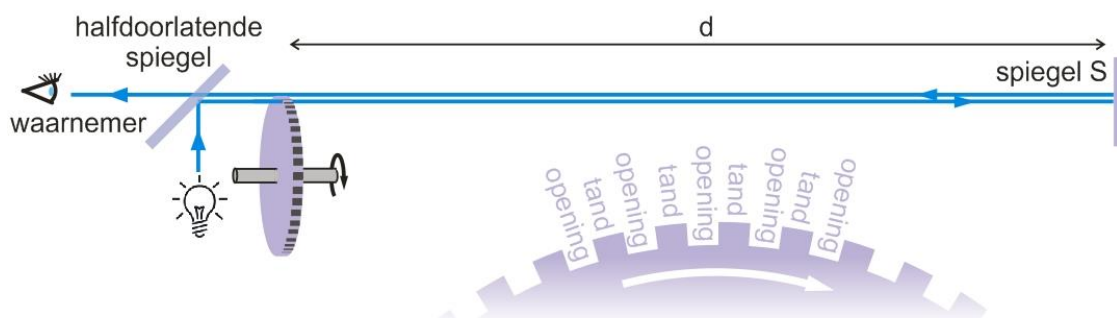


“Relativiteit” is als **keuzeonderwerp** onderdeel van het VWO schoolexamen.

Voor dit onderwerp is geen gedetailleerde landelijke stofomschrijving. Precieze invulling kan van school tot school verschillen

1 Fizeau

In 1849 bepaalde Armand Fizeau in Parijs de lichtsnelheid met een opstelling zoals hieronder: Een lichtstraal valt op een halfdoorlatende spiegel. Deze halfdoorlatende spiegel reflecteert de helft van het licht dat erop valt, de andere helft wordt doorgelaten. De gereflecteerde lichtbundel valt op de rand van een tandwiel. Als het tandwiel stilstaat, valt het licht tussen twee tanden door. Na het tandwiel valt de bundel op spiegel S die op een afstand d van 8,633 km op een heuvel in de buurt van Parijs staat. Spiegel S is zó gericht dat de lichtstraal weer terug op het tandwiel valt op dezelfde plaats waar hij vertrok. Nadat de terugkerende lichtstraal tussen de tanden van het tandwiel is doorgegaan wordt hij door de halfdoorlatende spiegel waargenomen door de waarnemer. De breedte van een tand van het tandwiel is even groot als de opening tussen twee tanden, zoals in de afbeelding hieronder schematisch is weergegeven.



Om de lichtsnelheid te bepalen wordt het tandwiel in beweging gebracht. Bij een bepaald toerental zal, nadat de bundel die door een opening tussen twee tanden doorgedaan is en gereflecteerd is door spiegel S niet meer op de opening vallen maar op de eerstvolgende tand vallen omdat het wiel een klein stukje verder is gedraaid.

- Leg uit wat de waarnemer ziet op het moment dat dit toerental bereikt wordt.
- De tijd die het licht nodig heeft om van het tandwiel naar de spiegel en terug te gaan, is dan precies gelijk aan de tijd die het tandwiel nodig heeft om de breedte van één tand (of van één opening) op te schuiven. Voor de lichtsnelheid geldt dan onderstaande formule. Leid deze formule af.
- Fizeau maakte gebruik van een tandwiel met 720 tanden. De waarnemer zag niets meer vanaf een omlooptijd van 12,6 Hz. Bereken de lichtsnelheid die Fizeau hiermee vond.
- Vergelijk je antwoord met de waarde van de lichtsnelheid in BINAS tabel 7. Hoeveel procent zat Fizeau er naast?

$$c = \frac{4 \cdot N \cdot d}{T}$$

c = lichtsnelheid ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

N = aantal tanden tandwiel

d = afgelegde afstand (m)

T = omlooptijd tandwiel (s)

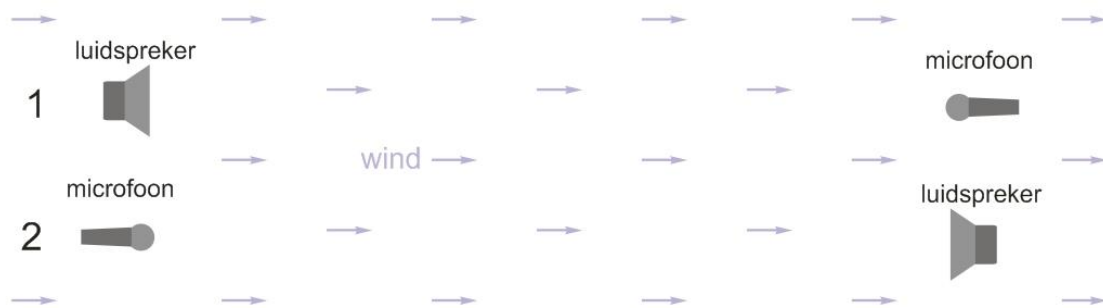
2 Michelson-Morley

Brechtje en Kamiel doen een experiment om de geluidssnelheid te bepalen. Buiten op het schoolplein plaatsen ze een luidspreker met recht daarvoor, op een afstand van enkele tientallen meters, een microfoon. Uit de tijd die het geluid over de afstand tussen luidspreker en microfoon doet bepalen ze de geluidssnelheid. Ze meten bij hun eerste experiment (experiment 1, bovenste afbeelding) een geluidssnelheid van $351 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dit is een stuk groter dan wat ze verwachtten. Tijdens hun experiment staat er een flinke wind en het vermoeden van Brechtje is dat dit de geluidssnelheid beïnvloedt. De wind waait vanaf de luidspreker in de richting van de microfoon.

- Beredeneer of dit een verklaring kan zijn voor de te hoge geluidssnelheid.
- Om te testen of het inderdaad aan de wind ligt besluiten ze een tweede experiment (experiment 2, onderste afbeelding) te doen waarbij luidspreker en microfoon van plaats verwisseld zijn. Inderdaad meten ze nu een lagere geluidssnelheid namelijk $327 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Bepaal aan de hand van de resultaten van de twee experimenten de windsnelheid.
- Eind 19^e eeuw werd gedacht dat lichtgolven, net zoals geluidsgolven, een medium nodig hadden om zich in voort te planten. Dit medium werd *ether* genoemd: Een soort oneindig lichte vloeistof die zich door het hele heelal en binnen alle doorzichtige voorwerpen zou uitstrekken. Net zoals een geluidssnelheid de snelheid ten opzichte van de lucht is zou de lichtsnelheid de snelheid ten opzichte van de ether zijn. Als de ether zou bewegen zou

dus ook de lichtsnelheid veranderen, net zoals in de proef van Brechtje en Kamiel. Stel dat de ether zich met een snelheid van 1 km/s tegen de richting van een lichtstraal in beweegt. Bereken hoeveel procent lager de lichtsnelheid zou kunnen worden als licht zich net zoals geluidsgolven zou gedragen.

- d De Amerikaanse wetenschappers Michelson & Morley probeerde door het meten van de lichtsnelheid in verschillende richtingen de beweging van de aarde door de ether aan te tonen. Alleen al door de beweging van de aarde rond de zon zou deze snelheid aanzienlijk moeten zijn. Bereken baansnelheid van de aarde om de zon.
- f Zeer tot hun verrassing maten Michelson & Morley exact dezelfde lichtsnelheid in alle richtingen. Sinds het experiment van Michelson & Morley nemen we aan dat ether niet bestaat. Het experiment vormde de aanleiding voor de speciale relativiteitstheorie van Einstein. Leg uit wat volgens deze theorie het medium van licht is.

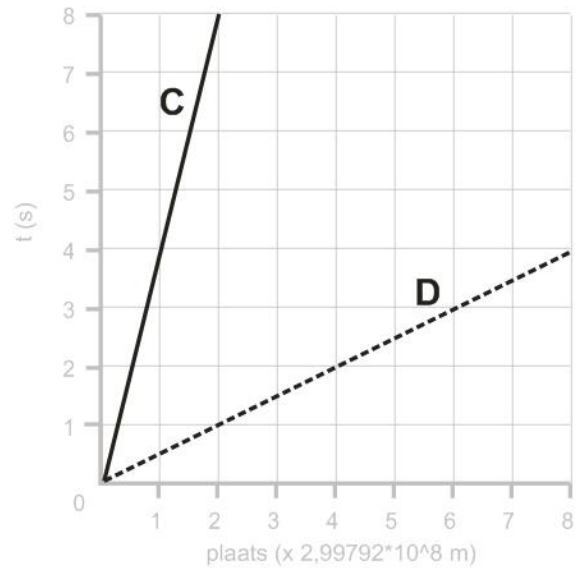
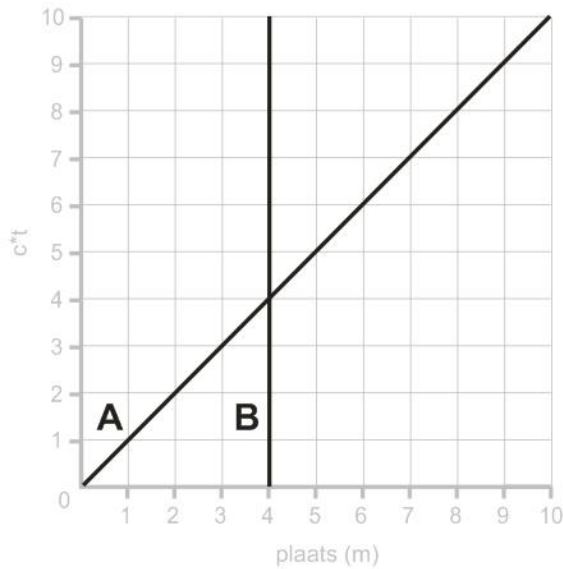


3 Ruimtetijsdiagram

In plaats van formules wordt bij de relativiteitstheorie ook vaak gebruik gemaakt van ruimtetijsdiagrammen. Dit zijn grafieken met op de ene as de tijd en de andere as de plaats. Deze zijn te vergelijken met de x,t-grafieken zoals we die van het onderwerp beweging kennen. Er zijn echter wel twee belangrijke verschillen:

- De positie en de tijd zijn omgewisseld (positie staat horizontaal, tijd verticaal)
- De schaal van de assen is zo dat de lichtsnelheid een lijn van 45° wordt.

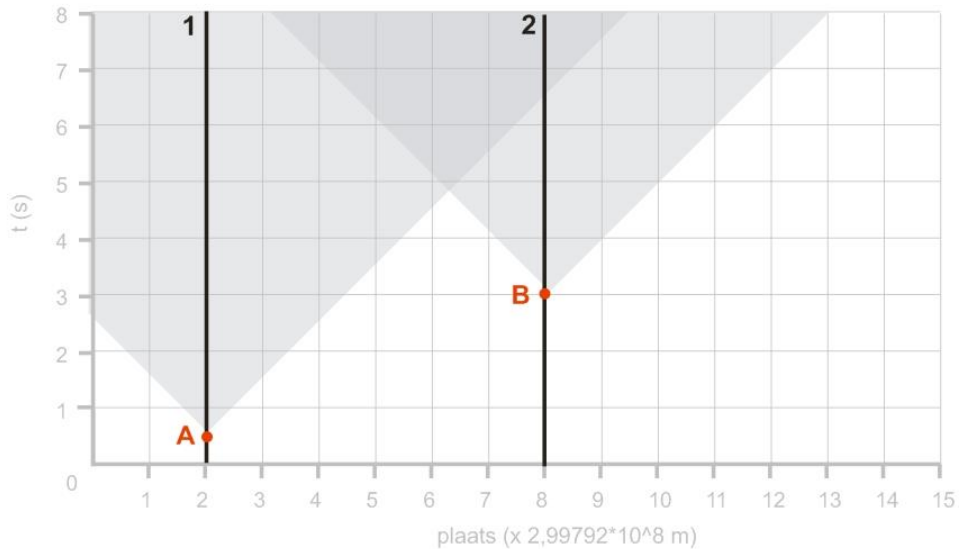
Een bewegingsgrafiek in een ruimtetijsdiagram wordt ook wel een *wereldlijn* genoemd. In onderstaande ruimte-tijsdiagrammen staan 4 wereldlijnen. Beschrijf in woorden de beweging die door de zwarte lijn wordt voorgesteld en leg uit waarom D theoretisch onmogelijk is.



4 Lichtkegel

Een gebeurtenis in een ruimte-diagram kan worden weergegeven als een punt met een bepaalde plaats en tijd. In het ruimte-tijd-diagram hieronder staan twee gebeurtenissen: Gebeurtenis A die plaatsvindt bij waarnemer 1 en gebeurtenis B die plaatsvindt bij waarnemer 2.

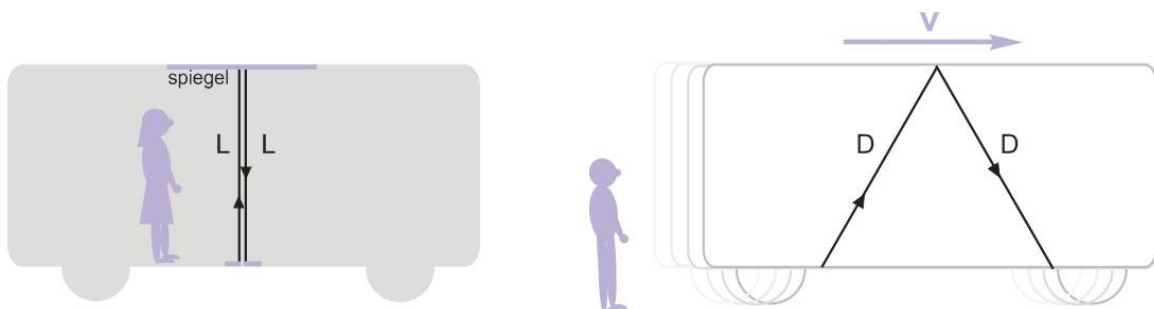
- Waarnemer 1 en waarnemer 2 staan allebei stil. Hoe is dit aan de grafiek te zien?
- Welke gebeurtenis (A of B) vindt eerder plaats?
- Waarnemer 1 en 2 kunnen elkaar in de verte zien. Bereken of waarnemer 2 gebeurtenis A ziet vóór of na gebeurtenis B.
- Bij beide gebeurtenissen is in het ruimte-tijddiagram een grijs gebied weergegeven. Dit wordt een *lichtkegel* genoemd. Leg uit wat de betekenis is van de lichtkegel.
- Precies op het moment dat bij waarnemer 2 gebeurtenis B plaatsvindt, vindt op de plaats van waarnemer 1 gebeurtenis C plaats. Teken in het diagram gebeurtenis C en de bijbehorende lichtkegel.
- Op welke plaats en tijd zijn zowel gebeurtenis A, B als C zichtbaar? Arceer dit gebied in het ruimtetijd-diagram.



5 Trein

Esmee staat in een hypermoderne supertrein en doet een experiment waarbij ze de tijd meet die een lichtstraal erover doet om vanaf de grond via een spiegel in het plafond terug naar beneden te gaan (zie linker afbeelding hieronder).

- De hoogte van de trein (L) is 3,0 m. Laat met een berekening zien dat de tijd die Esmee meet 20 ns is.
- Oscar staat naast het spoor te kijken en ziet door de glazen wanden van de trein Esmee haar experiment uitvoeren (zie rechter afbeelding hieronder). Oscar ziet de trein langsrijden met een snelheid van 60% van de lichtsnelheid. De weg die Oscar het licht ziet afleggen loopt voor Oscar schuin vanwege de snelheid van de trein. De afstand die het licht aflegt is voor Oscar langer dan de weg die Esmee het licht ziet afleggen. Oscar meet ook andere tijd voor het experiment. Hij meet dat de lichtstraal er 25 ns over doet. Bereken hoeveel afstand de trein heeft afgelegd in deze tijd.
- Bereken op basis van de door de trein afgelegde afstand en de hoogte van de trein de afgelegde weg van het lichtstraal die Oscar ziet. Gebruik hiervoor de stelling van Pythagoras.
- Laat met een berekening zien dat het antwoord op de vorige vraag ook volgt uit de door Oscar gemeten tijd. Gebruik hierbij het gegeven dat lichtsnelheid voor alle waarnemer altijd hetzelfde is.



6 Straaljager

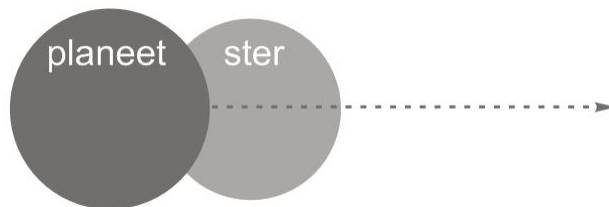
Twee klokken worden gelijk gezet. De klokken zijn nauwkeurig genoeg om een tijdsverschil van een milliseconde te kunnen meten. Een klok wordt in een hypermoderne superstraaljager geplaatst. De tweede klok blijft achter. De straaljager vliegt in 20 minuten een rondje om de aarde.

- Bereken de grootte van de snelheid van de straaljager.
- Laat met een berekening zien dat de vertraging tussen de klokken na één rondje te klein is om te meten.
- De straaljager blijft rondjes om de aarde maken. Hoeveel rondjes moet de straaljager in totaal afleggen om tussen beide klokken een tijdsverschil te kunnen meten.

7 Lengtecontractie

Een planeet lijkt vanaf aarde gezien iets groter dan de ster waar hij omheen draait. Omdat de schijnbare middellijn van de planeet iets groter is dan die van de ster zal er geen sterlicht te zien zijn als de planeet vóór de ster zou staan.

- Als de planeet te snel voor de ster langs beweegt zal de planeet niet in staat zijn de ster in zijn geheel te bedekken en blijft er gedurende de hele overgang tóch licht van de ster zichtbaar. Leg aan de hand van het begrip lengtecontractie uit hoe dit kan.
- Vanaf de aarde gezien is de middellijn van de planeet 10% groter dan de middellijn van de ster. Bereken de maximale snelheid die de planeet mag hebben om de ster nog nét in zijn geheel te kunnen bedekken.



8 Muon

Wanneer een geladen deeltje de atmosfeer binnendringt en botst op de aanwezige luchtmoleculen worden hoog in de atmosfeer verschillende deeltjes gevormd. Een van de deeltjes die hierbij ontstaat is het *muon*. Een muon beweegt met een snelheid die vrijwel gelijk is aan de lichtsnelheid. Muonen kunnen niet lang bestaan. Na een (gemiddelde) levensduur van $2,2 \mu\text{s}$ vervalt het muon in een elektron en twee neutrino's.

- Muonen ontstaan op meer dan 50 km boven het aardoppervlak. Ondanks de korte levensduur worden er tóch muonen op de grond gedetecteerd in een muondetector. Bereken hoe lang het minimaal duurt voordat een muon de afstand tot het oppervlak heeft afgelegd en laat zien dat dit eigenlijk niet kan.
- Volgens de speciale relativiteitstheorie verloopt de tijd voor een muon langzamer. Stel

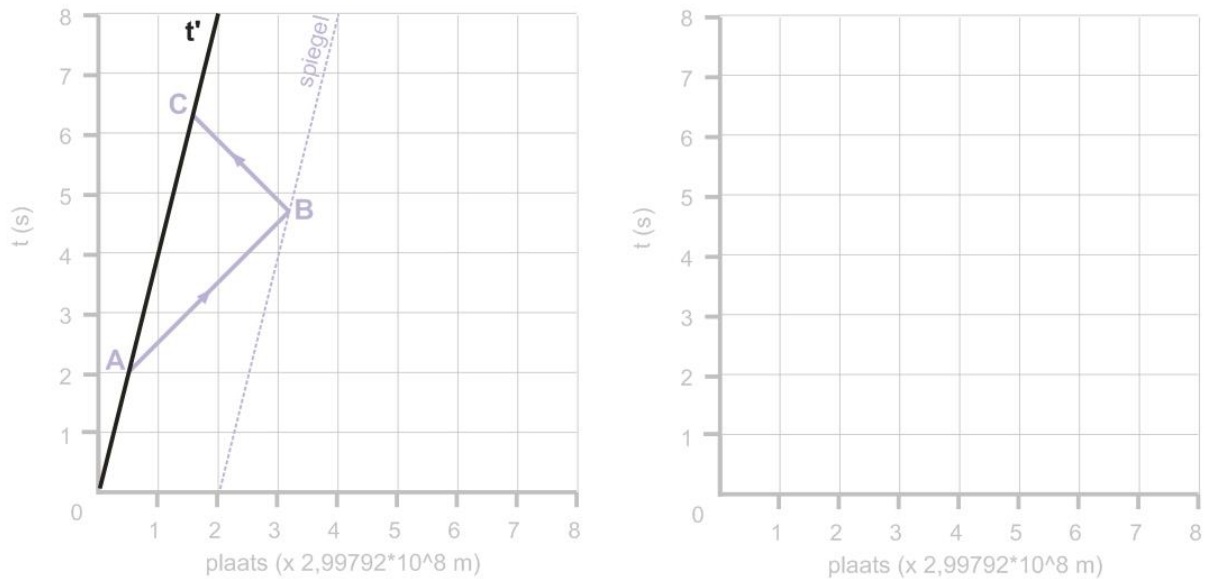
dat een muon beweegt met een snelheid die 0,008% onder de lichtsnelheid ligt. Bereken hoe lang de in de vorige vraag berekende tijd duurt vanuit het referentiestelsel van het muon.

- c Leg uit waarom het muon volgens de speciale relativiteitstheorie wél in staat is het aardoppervlak te bereiken voordat het is vervallen.
- d Ook de afstand die het muon aflegt is korter. Laat met een berekening zien dat de afstand van 50 km in het referentiestelsel van het muon slechts iets meer dan 600 m is.

9 Ruimteas tekenen

In het ruimte-tijddiagram hieronder staan horizontaal en verticaal plaats en de tijd voor een stilstaande waarnemer. In het diagram staat ook de tijdas getekend voor een bewegende waarnemer (t').

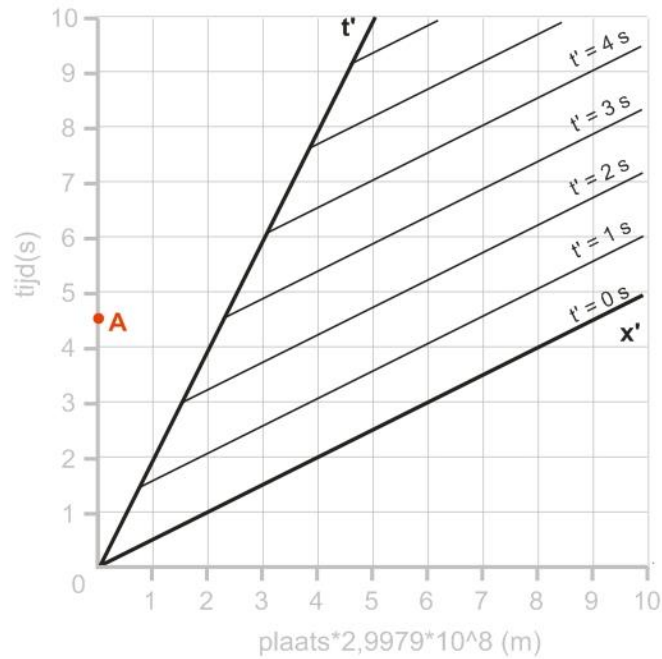
- a Ga na dat de tijdas overeenkomt met een waarnemer die zich met 25% van de lichtsnelheid beweegt.
- b De bewegende waarnemer doet een experiment waarbij hij een lichtstraal uitzendt en laat reflecteren op spiegel die op een afstandje met dezelfde snelheid meereist. De reflectie vindt plaats op een andere locatie dan die van de bewegende waarnemer maar de waarnemer kan uit de het moment van uitzenden (A) en ontvangen (C) wel beredeneren wanneer de reflectie moet hebben plaats gevonden: Precies tussen A en C in namelijk. Bepaal waar op de tijdas van de bewegende waarnemer dit moment ligt en geef het aan met het symbool B^* .
- c Volgens de bewegende waarnemer zijn B^* en de daadwerkelijke reflectie B gelijktijdig. De richting van de lijn die B en B^* met elkaar verbindt is dus ook de richting van de ruimteas. Teken de ruimteas voor de bewegende waarnemer.
- d De richting van de ruimteas is ook eenvoudiger te bepalen. Een lichtstraal vormt namelijk altijd de bissectrice van de tijdas en de ruimteas. Ga dit na voor zowel de bewegende als de stilstaande waarnemer.
- e Teken in het rechter diagram de tijd en de ruimteas voor een bewegende waarnemer die met 75% van de lichtsnelheid reist.



10 Tijddilatatie

Het langzamer verlopen van de tijd voor bewegende waarnemers kan ook zichtbaar worden gemaakt in een ruimte-tijd diagram. In het onderstaande diagram staan de tijd- en ruimteas voor een stilstaande waarnemer (de normale x- en y-as) en een bewegende waarnemer (in het zwart). Op $t = 0$ s bevinden de beide waarnemers zich op plaats $x = 0$ m en zetten hun stopwatch allebei op 0 s.

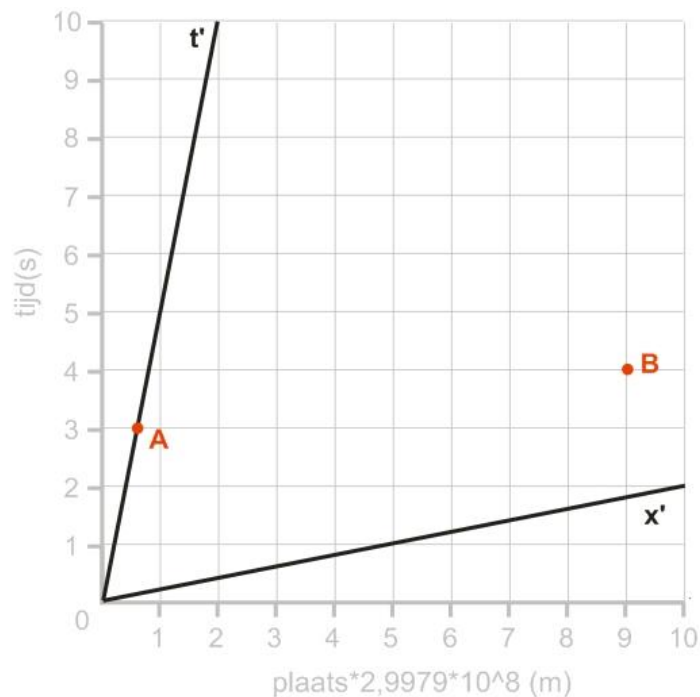
- De bewegende waarnemer beweegt met 50% van de lichtsnelheid ten opzichte van de stilstaande waarnemer. Ga dit na aan de hand van het diagram.
- Tijd en afstand kunnen we voor de stilstaande waarnemer aflezen van de x- en y-as. Lees uit het diagram af welke tijd er op de stopwatch van de stilstaande waarnemer staat als gebeurtenis A plaatsvindt.
- Omdat de tijd voor een bewegende waarnemer anders verloopt dan voor de stilstaande waarnemer loopt ook de tijdas voor de bewegende waarnemers anders (in het diagram t'). De tijden die voor de bewegende waarnemer gelijktijdig zijn lopen evenwijdig met de ruimteas en staan weergegeven als dunne zwarte lijnen. Lees uit de grafiek af welke tijd er op de stopwatch van de bewegende waarnemer staat als gebeurtenis A plaatsvindt.
- In plaats van het diagram te gebruiken hadden we dit ook kunnen berekenen met de formule voor tijddilatatie (BINAS tabel 35-E6). Laat met een berekening zien dat je op dezelfde tijd uitkomt.
- Na gebeurtenis A vindt op dezelfde plaats gebeurtenis B plaats. Volgens de bewegende waarnemer zit er 2,0 s tussen beide gebeurtenissen. Bepaal aan de hand van het diagram én met een berekening hoeveel tijd er volgens de stilstaande waarnemer tussen beide gebeurtenissen zit.



11 Gelijktijdigheid

In het ruimtetijd-diagram hieronder staan de tijd- en ruimteassen voor een stilstaande en een bewegende waarnemer. In het diagram staan twee gebeurtenissen (A en B) aangegeven.

- Bepaal uit het ruimtetijd-diagram de snelheid van de bewegende waarnemer.
- Welke gebeurtenis vindt volgens de stilstaande waarnemer als eerste plaats?
- Welke gebeurtenis vindt volgens de bewegende waarnemer als eerste plaats?
- Kan gebeurtenis B een gevolg zijn van gebeurtenis A? Leg aan de hand van wat beide waarnemers zien of gebeurtenis B een gevolg kan zijn van gebeurtenis A.



12 Snelheden optellen

Normaal gesproken mag je snelheden bij elkaar optellen en van elkaar aftrekken als ze dezelfde richting hebben. Dit gebruik je bijvoorbeeld als je wil uitrekenen wat de relatieve snelheid is tussen twee bewegende voorwerpen.

- Een bus rijdt met een snelheid van 80 km/h op de snelweg als er een auto de bus tegemoet rijdt met een snelheid van 120 km/h. Bereken de snelheid waarmee de auto en de bus elkaar naderen.
- Een hypermoderne rakettrein zoeft met een snelheid van 40% van de lichtsnelheid over een supergeleidende magneetbaan als een lichtstraal de rakettrein recht van voren tegemoet komt. Laat met een berekening zien dat, als je géén rekening houdt met de relativiteitstheorie, de lichtstraal met een snelheid op de rakettrein afkomt met $4,2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Uiteraard is het antwoord op de vorige vraag fout. Volgens de relativiteitstheorie kan een snelheid hoger dan de lichtsnelheid niet. Volgens de relativiteitstheorie geldt er een andere manier waarop we snelheden moeten optellen (zie formule hieronder). Bereken met welke snelheid de lichtstraal op de rakettrein afkomt.
- De rakettrein uit de vorige vraag nu ingehaald door een snellere rakettrein die met een snelheid van 60% van de lichtsnelheid rijdt. Bereken de snelheid waarmee de rakettrein de snellere rakettrein ziet langsrijden. (Aanwijzing: we tellen de snelheden nu niet op maar trekken ze van elkaar af. Gebruik dezelfde formule maar vul voor v niet $0,4c$ in maar $-0,4c$.)
- Laat zien dat je door het optellen van $0,4c$ bij de uitkomst van de vorige vraag weer op de oorspronkelijke snelheid van de snellere rakettrein uitkomt.

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

c = lichtsnelheid ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

w = somsnelheid ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

u = snelheid 1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

v = snelheid 2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

13 Relativistische massa

Volgens de speciale relativiteitstheorie is de massa van een deeltje afhankelijk van de snelheid. De massa die een deeltje volgens de speciale relativiteitstheorie heeft wordt ook wel de *relativistische massa* genoemd. In BINAS tabel 35-E6 staat formule om de relativistische massa te berekenen.

- Zoek in BINAS tabel 7 de rustmassa van een proton.
- Net zoals andere aspecten van de relativiteitstheorie is ook massatoename alleen merkbaar bij snelheden in de buurt van de lichtsnelheid. Laat met een berekening zien dat de massa van een proton niet verandert bij een snelheid van $5,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

- c Pas bij veel grotere snelheid begint de massa merkbaar toe te nemen. Bereken welke snelheid een proton moet hebben voor een massatoename van 1%.

14 Kinetische energie

In een lineaire deeltjesversneller worden elektronen vanuit stilstand tot een grote snelheid versneld. Dit gebeurt door de elektronen in een aantal stappen een elektrisch veld te laten doorlopen waarbij de elektronen steeds sneller gaan. Het energieverval wat de elektronen hierbij doorlopen vanaf het begin tot het moment dat de elektronen de versneller verlaten bedraagt $7,3 \cdot 10^{-14}$ J per elektron.

- a Bereken de snelheid van de elektronen als je aanneemt dat alle energie wordt omgezet in kinetische energie volgens $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Laat zien dat je op deze manier uitkomt op een snelheid hoger dan de lichtsnelheid (!).
- b Uiteraard kan een snelheid groter dan de lichtsnelheid niet. Volgens de relativiteitstheorie geldt dan ook een andere formule voor de energie van een deeltje (zie onder). In tegenstelling tot de kinetische energie in de klassieke natuurkunde is de energie niet nul voor een stilstaande massa. Bereken de met onderstaande formule de rustenergie van een elektron.
- c Bereken met onderstaande formule de snelheid van de elektronen als ze uit de versneller komen. Ga er hierbij vanuit dat de totale energie van de elektronen gelijk is aan de rustenergie plus de energie die ze er in de versneller bij hebben gekregen.
- d Leg aan de hand van de formule uit dat het onmogelijk is om elektron te versnellen tot de lichtsnelheid.

$$E_{\text{tot}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m_0 \cdot c^2$$

E_{tot} = totale energie (J)

v = snelheid (ms^{-1})

m_0 = rustmassa (kg)

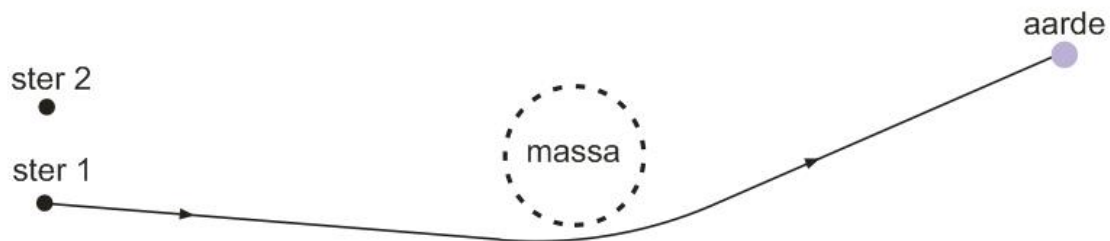
$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

15 Zwaartekracht

In de bovenste afbeelding hieronder staat wat er vanaf aarde te zien is als sterrenlicht langs een zwaar object schijnt. Te zien is dat de massa niet alleen het sterlicht blokkeert maar ook afbuigt. De achtergrond wordt door de massa sterk vervormd. Direct naast de massa lijken geen sterren meer te staan. Ook bij de zon is dit effect te zien: Als tijdens een zonsverduistering het zonlicht afgeschermd is en de sterren vlak naast de zon zijn zichtbaar zijn is te zien dat deze op een andere plaats staan dan verwacht. Bij de zon is het effect relatief zwak maar bij zwaardere objecten in het heelal is het effect veel sterker. Hoe groter de massa hoe sterker dit effect.

- a In de onderste afbeelding is te zien hoe de massa het licht van een ster afbuigt. Ster 1 staat vanaf de aarde gezien precies achter de massa. Toch is de ster vanaf aarde

- zichtbaar. Geef in een afbeelding aan in welke richting ster 1 vanaf aarde te zien is.
- b Ster 2 staat zodanig dat, als het licht niet afgebogen zou worden, de ster vlak naast de massa te zien zou zijn. Ga na welke richting de ster opschuift vanaf aarde gezien als je wél rekening houdt met het afbuigen van het licht.
- c Dat licht op deze manier wordt afgebogen is eigenlijk heel gek. Zwaartekracht werkt immers alleen op voorwerpen die massa hebben. Leg aan de hand van de formule voor relativistische massa (BINAS 35-E6) uit waarom fotonen geen massa kunnen hebben.
- d Einsteins kwam in zijn *algemene relativiteitstheorie* met een zeer radicale verklaring voor het feit dat licht tóch wordt afgebogen door zware objecten. Volgens hem bestond zwaartekracht simpelweg niet en was de formule voor gravitatiekracht niet van toepassing. Toch merken we elke dag om ons heen dat voorwerpen naar beneden vallen en de maan in een baan om de aarde draait etc.... Wat was Einsteins verklaring hiervoor?



16 Zwart gat

Een van de consequenties van de algemene relativiteitstheorie is dat in een gebied waar zwaartekracht heerst de tijd niet overal even snel loopt. De vertraging is afhankelijk van de plaats en van de versnelling die een massa zou ondervinden als deze werd losgelaten (valversnelling). In een homogeen zwaartekrachtsveld geldt hiervoor onderstaande formule. (Een homogeen zwaartekrachtsveld is een gebied waar de valversnelling overal hetzelfde is).

- a Op aarde zijn deze tijdsverschillen altijd extreem klein. Laat met een berekening zien

hoeveel % sneller de tijd verloop bovenop de hoogste berg op aarde (8,0 km) vergeleken met de tijd op zeeniveau.

- b Laat met een berekening zien dat het meer dan 30 duizend jaar duurt voordat het tijdsverschil tussen een klok bovenop de berg en een klok beneden op zeeniveau is opgelopen tot één seconde.
- c Dit soort tijdsverschillen begint pas een rol te spelen in situaties waar de valversnelling extreem hoog is. Dit is bijvoorbeeld het geval in de buurt van extreem zware objecten zoals zwarte gaten en neutronensterren. Beredeneer of de tijd sneller of langzamer verloopt aan het oppervlak van een zwarte gat.

$$t(h) = t_0 \cdot \left[1 + \frac{g \cdot h}{c^2} \right]$$

$t(h)$ = tijdsduur op hoogte h (s)

t_0 = tijdsduur op hoogte 0 (s)

g = valversnelling (ms^{-2})

$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

ANTWOORDEN VAN DE REKENOPGAVEN

Uitwerkingen en uitleg van alle opgaven zijn te vinden op natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen

1 Fizeau

- c $3,13 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$
- d 4,5% te hoog.

2 Michelson-Morley

- b 12 ms^{-1}
- c $3 \cdot 10^{-4} \%$ lager
- d $2,979 \cdot 10^4 \text{ ms}^{-1}$

3 Ruimtetijd-diagram

- a $v = c$
- b $v = 0, x = 4 \text{ m}$
- c $v = 0,25c$
- d $v = 2c$

4 Lichtkegel

- b A
- c na

5 Trein

- b 4,5 m
- c 8,2 m

6 Straaljager

- a $3,3 \cdot 10^4 \text{ ms}^{-1}$
- c 135 rondjes

7 Lengtecontractie

- b 0,42c

8 Muon

- a $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
- b $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

10 Tijddilatatie

- b 4,6 s
- c 4,0 s
- e 2,3 s

11 Gelijktijdigheid

- a 0,2c
- b A
- c B

12 Snelheden optellen

- a $200 \text{ kmh}^{-1} / 55,5 \text{ ms}^{-1}$
- c c
- d 0,26c

13 Relativ. massa

- a $1,672621777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- c 0,14c

14 Kinetische energie

- a $4,0 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ($> c$!!!)
- b $8,18710507 \cdot 10^{-14} \text{ J}$
- c 0,85c

16 Zwart gat

- a $8,73 \cdot 10^{-11} \%$