

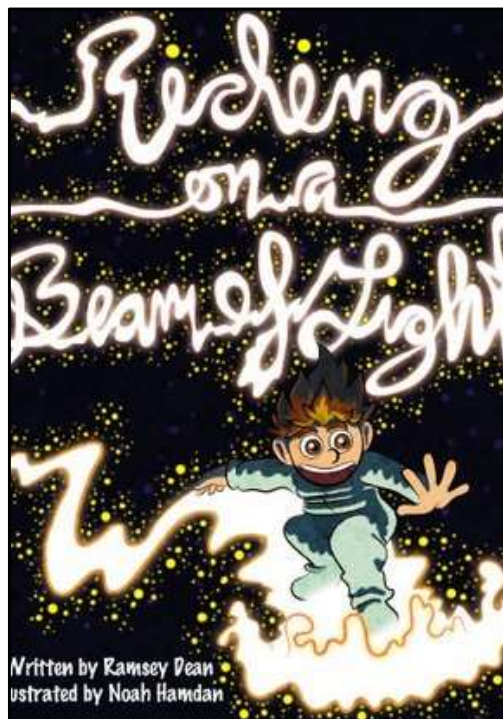
Relativistiske gedachte- experimenten

Leerlingen ondersteunen bij uitvoering en vormgeven in
de les

Floor Kamphorst, 14 december 2024
floor.kamphorst@ntnu.no

Workshop

Wie doen relativiteit als keuze-onderwerp?



Gedachte-experimenten zijn vervlochten met de oorsprong van de speciale relativiteitstheorie

Als ik een lichtstraal met snelheid c achternaeis, wat observeer ik dan? Ik zou zo'n lichtstraal als een ruimtelijk oscillerend elektromagnetisch veld in rust moeten zien. Het ziet er daarentegen uit dat zoiets niet bestaat, noch op basis van ervaring, noch volgens de Maxwell vergelijkingen.

In zijn autobiografie beschrijft Einstein dat hij het idee voor de speciale relativiteitstheorie kreeg uit het volgende gedachte-experiment. Hij vroeg zich af: "Als ik een lichtstraal volg met snelheid c , wat zal ik dan waarnemen?" In de biografie presenteert hij direct daarna het antwoord: "Ik zou zo'n lichtstraal moeten waarnemen als een ruimtelijk oscillerend elektromagnetisch veld in rust. Het lijkt er echter op dat zoiets niet bestaat, noch op basis van ervaringen, noch volgens de vergelijkingen van Maxwell."

Dit verhaal illustreert dat gedachte-experimenten een fundamenteel onderdeel zijn van de oorsprong van de relativiteitstheorie. Daarom zijn gedachte-experimenten een uitstekende manier om leerlingen kennis te laten maken met de denkwijze in de speciale relativiteitstheorie en hen vertrouwd te maken met de historische ontwikkeling van de theorie. Maar het is moeilijk om relativistische concepten te begrijpen, en bovendien is het moeilijk om zelf gedachte-experimenten uit te voeren.



Hoofdboodschap

- 1) Het redeneerproces in gedachte-experimenten blijft vaak verborgen bij hun presentatie.
- 2) Dat redeneren zou expliciet gemaakt moeten worden en leerlingen hebben ondersteuning nodig bij het zelf uitvoeren van gedachte-experimenten.
- 3) Daarmee wordt het ook mogelijk om je onderwijs te koppelen aan leerling-ideeën over centrale begrippen in de theorie.

In de workshop zal ik dieper ingaan op hoe we deze moeilijkheden kunnen aanpakken. Wat ik hoop dat jullie zullen onthouden, is dat...

- 1) Het eigenlijke redeneerproces blijft vaak verborgen wanneer gedachte-experimenten worden gepresenteerd.
- 2) Dit moeten we expliciet maken, en we moeten leerlingen ondersteunen bij het zelf uitvoeren van gedachte-experimenten.
- 3) Op die manier is het ook mogelijk om het onderwijs te verbinden met het begrip van leerlingen van centrale concepten in de theorie.

Het laatste punt is sterk verbonden met het theoretische kader waarin de activiteiten zijn ontwikkeld: dat het wenselijk is dat leerlingen zich bewust worden van hun eigen ideeën en begrip van fysieke concepten, en dat we dit als uitgangspunt moeten nemen om

de fysica te introduceren.

Leerdoel Relativiteit

«De kandidaat kan in gedachte-experimenten en toepassingen de verschijnselen tijdrek en lengtekrimp verklaren aan de hand van de begrippen lichtsnelheid, gelijktijdigheid en referentiestelsel.» (Natuurkunde VWO, Syllabus centraal examen 2024)

Het leerdoel zoals beschreven in de syllabus voor Speciale relativiteitstheorie is dat leerlingen de verschijnselen tijdrek en lengtekrimp kunnen verklaren aan de hand van de begrippen lichtsnelheid, gelijktijdigheid en referentiestelsel. Dat houdt in dat leerlingen de samenhang tussen de postulaten en de relativistische fenomenen moeten gaan begrijpen en die verbanden ook zelf actief moeten kunnen uitleggen. Om dat te doen heb je ook de begrippen gebeurtenis en waarnemer nodig.

Een gedachte-experiment (GE)

🌐 Twee lampen bevinden zich elk aan een kant van een wagen met lengte $l = 600\,000\text{ m}$. Deze wagen rijdt met snelheid $v = 0,5c$ voorbij een waarnemer. Beide lampen zenden een lichtflits uit.

Op het moment dat het midden van de wagen de waarnemer passeert, ziet deze de twee lichtflitsen gelijktijdig. Dit moment noemen we tijdspunt $t = 0$.

? Wanneer zijn de lichtflitsen uitgezonden?

Ik nodig jullie nu uit om zelf een gedachte-experiment te doen.

Reflectie

- Waar liep je tegenaan bij het uitvoeren van het gedachte-experiment?
- Hoe heb je dat opgelost?

Relativiteit is moeilijk om te gaan begrijpen

Fenomenen alleen zichtbaar als

- 2 referentiestelsels worden vergeleken
- Die tov elkaar bewegen
- Met snelheden die we uit ons dagelijks leven niet kennen
- In contexten zonder zwaartekracht of versnelling

Daarnaast moeten leerlingen redeneren met een absolute lichtsnelheid en in termen van gebeurtenissen.



Gedachte-experimenten

Ondersteunen leren door

- redeneren met een 'wat als'-scenario
- Overbruggen de kloof tussen leerlingideeën en abstracte natuurkundebegrippen
- Uitvoeren van 'experimenten' in een geïdealiseerde wereld

Maar:

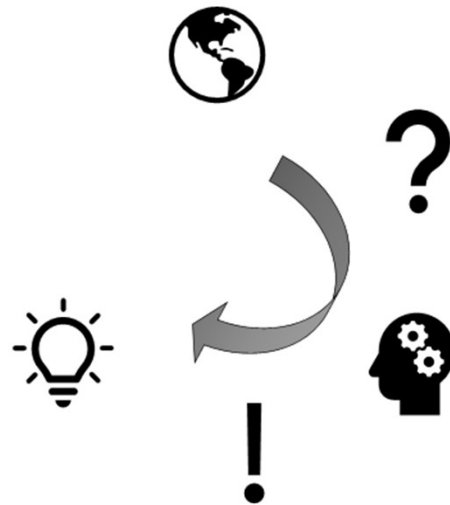
- Vereisen consistent redeneren



5 stappen in een gedachte-experiment

-  Bepalen van de theoretische basis en beschrijving van de geïdealiseerde wereld.
-  Centrale vraag stellen.
-  Gedachte-experiment uitvoeren, doorgaans door deductief redeneren vanuit de eerste twee stappen.
-  Verkrijgen van resultaten en het antwoord op de centrale vraag.
-  Reflectie op het hele gedachte-experiment en formuleren van algemene gevolgen.

Reiner & Burko (2003).



Een gedachte-experiment bestaat uit 5 stappen.

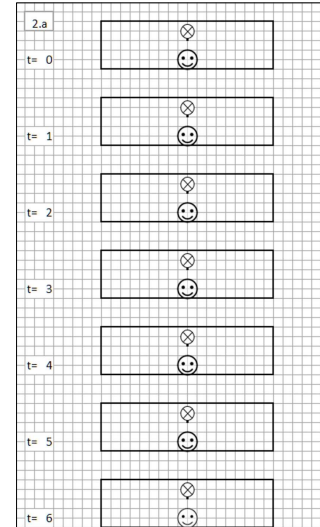
Eerst bepalen we de theoretische basis van het experiment en beschrijven we hoe de geïdealiseerde wereld eruitziet. – Als ik een lichtstraal volg met snelheid c Dan stellen we een vraag – wat zal ik waarnemen? Daarna wordt het gedachte-experiment uitgevoerd, meestal door formele deductie van de eerste stappen. Als vierde stap bedenken we de resultaten en beantwoorden we de vraag – Ik zou zo'n lichtstraal moeten waarnemen als een ruimtelijk oscillerend elektromagnetisch veld in rust. Ten slotte reflecteren we op het gedachte-experiment en formuleren we algemene implicaties – Het lijkt er echter op dat zoiets niet bestaat, noch op basis van ervaringen, noch volgens de vergelijkingen van Maxwell. In het verhaal van het experiment hebben we de derde stap overgeslagen. Dit is heel typerend voor de manier waarop gedachte-experimenten vaak worden weergegeven: Het redeneerproces wordt eruit gehaald. Het is juist dit proces dat

gedachte-experimenten zo vruchtbaar maakt voor het onderwijs.

Gebeurtenisdiagrammen

Een vereenvoudigde representatie van ruimtetijd die

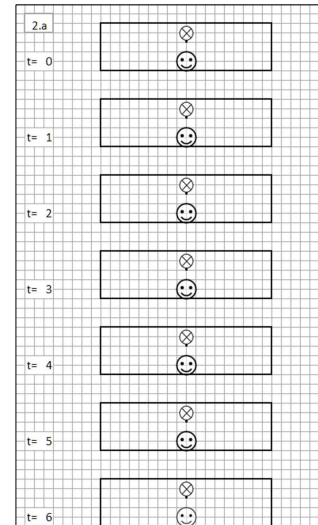
- De positie van objecten en gebeurtenissen afbeeld
- Voor opeenvolgende tijdstippen
- Vanuit een gegeven referentiekader
- Ondersteunt leerlingen met het uitvoeren van gedachte-experimenten
- En maakt redeneren zichtbaar voor leerlingen en docenten



Gebeurtenisdiagrammen kunnen leerlingen ondersteunen bij het uitvoeren van een gedachte-experiment. Het is een representatie van de ruimtetijd die de posities van objecten, de waarnemer en gebeurtenissen op opeenvolgende tijdstippen toont, vanuit een gegeven referentiesysteem. Leerlingen kunnen gedachte-experimenten uitvoeren door de positie van licht in het diagram te tekenen. Zo wordt het redeneerproces van de leerlingen zichtbaar voor zowel de leerling als de leraar.

Gebeurtenisdiagrammen

- Waarnemer: smiley
- Lamp: symbool van elektrische schakelingen
- Zelf de lichtflits in het diagram tekenen
- Nieuwe waarde en eenheid voor lichtsnelheid nodig:
- 3 hokjes per tijdstapje



In het diagram wordt de waarnemer weergegeven met een smiley, en lampen met het symbool dat bekend is uit elektrische schakelingen.

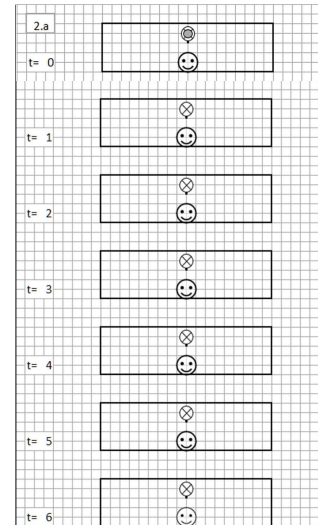
Het diagram vereist ook dat we andere eenheden gebruiken voor tijd, positie en snelheid. In plaats van seconden, spreken we over tijdstappen; afstand meten we niet in meters, maar in vakjes, en de eenheid van snelheid wordt het aantal vakjes per tijdstap.

In de diagrammen in deze workshop gebruiken we een lichtsnelheid van 3 vakjes per tijdstap. De lamp geeft bijvoorbeeld een lichtflits af op $t=0$, een tijdstap later heeft het licht een afstand van 3 vakjes in alle richtingen afgelegd, en bereikt de lichtflits de muren bij de derde tijdstap.

Gebeurtenisdiagrammen

Wat als...

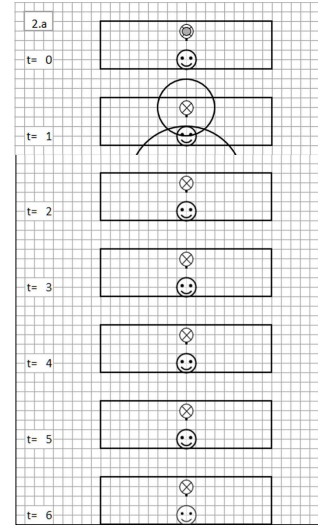
De lamp op $t = 0$ een lichtflits uitzend.
Wanneer komt deze lichtflits dan bij de
zijanten van de kamer aan?



Gebeurtenisdiagrammen

Wat als...

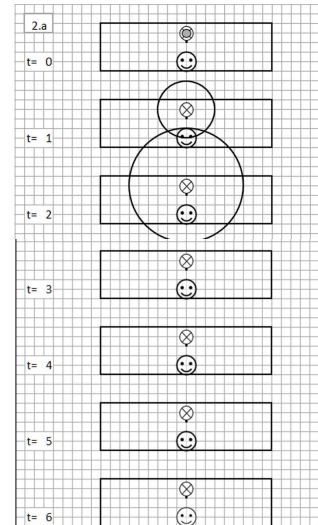
De lamp op $t = 0$ een lichtflits uitzend.
Wanneer komt deze lichtflits dan bij de
zijanten van de kamer aan?



Gebeurtenisdiagrammen

Wat als...

De lamp op $t = 0$ een lichtflits uitzend.
Wanneer komt deze lichtflits dan bij de
zijanten van de kamer aan?

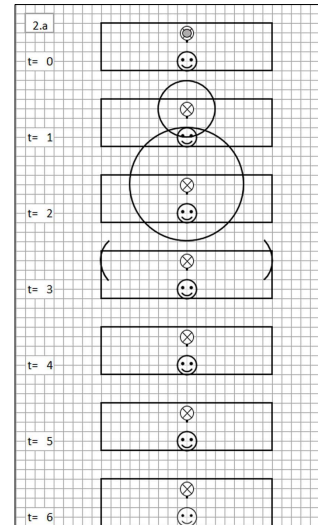


Gebeurtenisdiagrammen

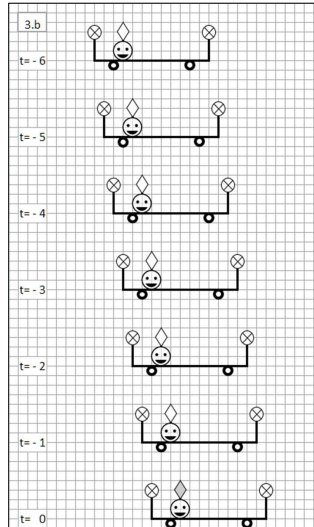
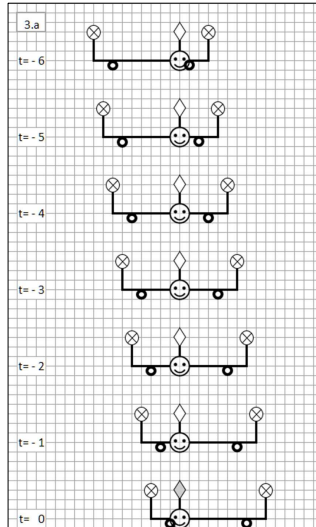
Wat als...

De lamp op $t = 0$ een lichtflits uitzend.
Wanneer komt deze lichtflits dan bij de
zijanten van de kamer aan?

Kan ook met relativistische situaties
waarbij de lamp en de waarnemer ten
opzichte van elkaar bewegen.



GE1: Bewust worden van model lichtvoortplanting



 Twee lichtflitsen worden gelijktijdig waargenomen door een waarnemer op tijdstip $t=0$. (Detector grijs)

De flitsen zijn afkomstig van lampen die op een karretje gemonteerd zijn.

Lichtsnelheid: 3 hokjes per tijdstapje.

 Wanneer zijn de lichtflitsen uitgezonden door de lampen?

 Gebruik diagram 3a en 3b om het antwoord af te leiden.

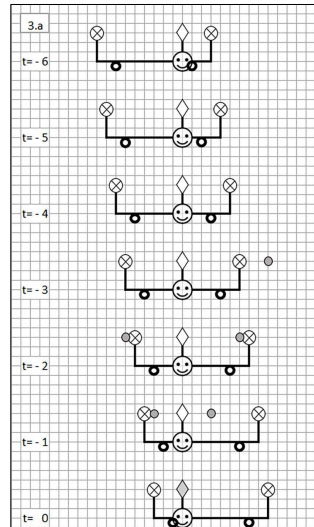
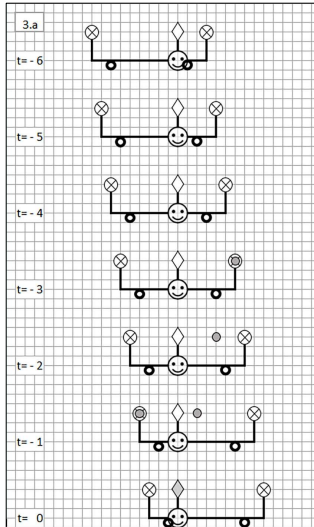
Laten we nu een variant van het eerste gedachte-experiment proberen, maar deze keer met behulp van diagrammen.

Beschrijf het gedachte-experiment.

Reflectie

- Wanneer zijn de lichtflitsen uitgezonden?
- Hoe heb je een constante lichtsnelheid van 3 hokjes per tijdstapje toegepast in de diagrammen?

GE1: Bewust worden van model lichtvoortplanting



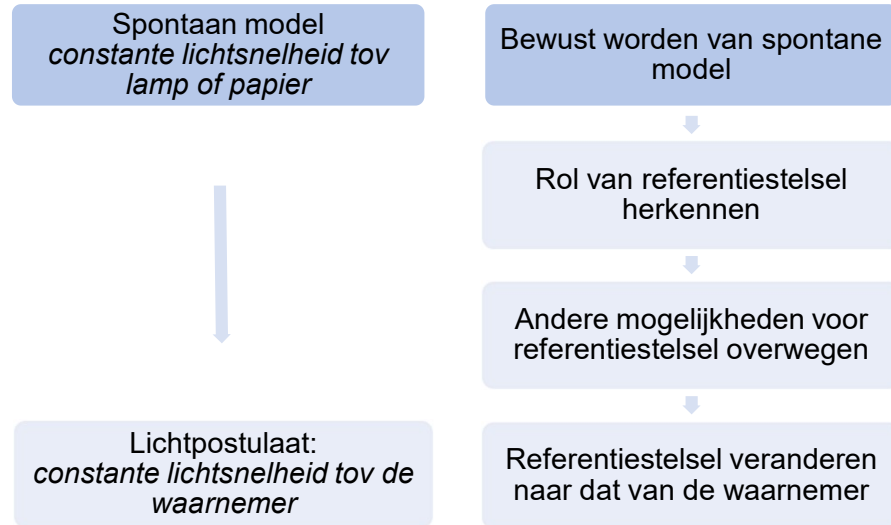
! De meeste leerlingen gebruiken een van deze twee spontane lichtvoortplantingsmodellen:

- constante snelheid ten opzichte van de lamp
- constante snelheid ten opzichte van het papier

💡 De twee spontane modellen leiden tot verschillende uitkomsten van het gedachte-experiment. Dat kan een aanleiding zijn om het lichtpostulaat te introduceren.

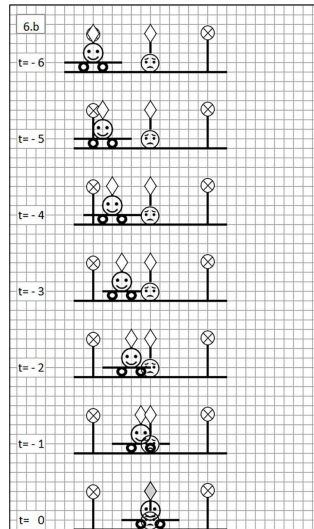
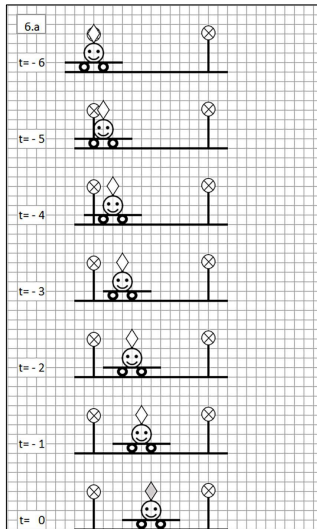
Leerlingen redeneren op verschillende manieren met een constante lichtsnelheid. Sommige leerlingen redeneren met een constante snelheid ten opzichte van de lamp, anderen gebruiken een constante snelheid ten opzichte van het papier. We kunnen aannemen dat de meeste leerlingen een vorm van een consistent model gebruiken: dat ze hetzelfde model in verschillende situaties gebruiken. En we kunnen aannemen dat er variatie is in de lichtvoortplantingsmodellen die de leerlingen in je klas gebruiken. Dit kan worden gebruikt om de vraag te introduceren hoe lichtvoortplanting plaatsvindt, en daarna het lichtpostulaat.

Lichtpostulaat introduceren



Voor leerlingen om het lichtpostulaat te gaan gebruiken, moeten ze overschakelen van een spontane lichtvoortplantingsmodel naar het postulaat. Dit betekent dat ze moeten overschakelen van een constante lichtsnelheid ten opzichte van de lamp of het papier naar een constante lichtsnelheid ten opzichte van de waarnemer. Daarom moeten leerlingen zich bewust worden van het feit dat ze een spontaan model gebruiken en de rol van het referentiesysteem daarin. Het gedachte-experiment dat we zojuist hebben gedaan, kan dit duidelijk maken. Het kan ook laten zien dat er verschillende mogelijkheden zijn voor een referentiesysteem voor een constante lichtsnelheid, en dat de andere mogelijkheden ook plausibel zijn omdat ze allemaal een consistent model vormen.

GE2: Relativiteit van gelijktijdigheid



Twee lichtflitsen worden gelijktijdig waargenomen door een waarnemer die op een wagentje staat op tijdstip $t=0$. De flitsen zijn afkomstig van twee lampen. Lichtsnelheid: 3 hokjes per tijdstapje tov de waarnemer.



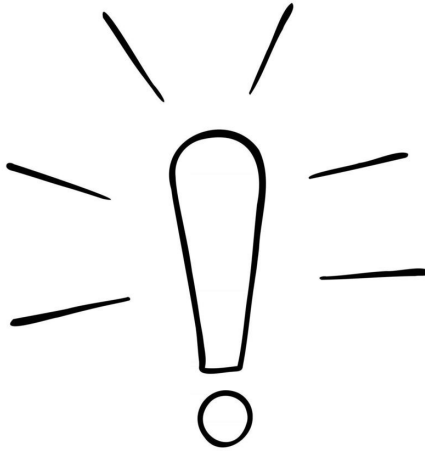
Wanneer zijn de lichtflitsen uitgezonden door de lampen?



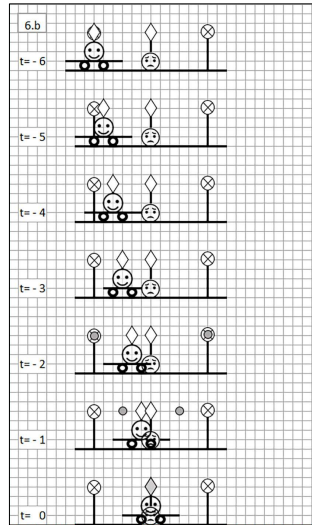
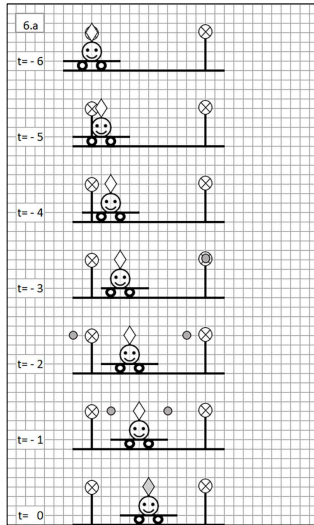
Gebruik diagram 6a en 6b om het antwoord af te leiden.

Wanneer het lichtpostulaat is geïntroduceerd, kunnen we gedachte-experimenten gebruiken om relativistische fenomenen te introduceren, zoals de relativiteit van gelijktijdigheid.

Wanneer zijn de lichtflitsen uitgezonden?



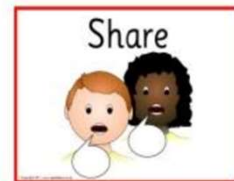
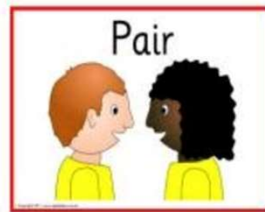
GE2: Relativiteit van gelijktijdigheid



! Voor de waarnemer op het karretje zijn de lichtflitsen uitgezonden tussen $t = -1$ og $t = -2$ voor de linker lamp en op $t = -4$ voor de rechter lamp.

Voor de waarnemer in rust zijn beide lichtflitsen op $t = -2$ uitgezonden.

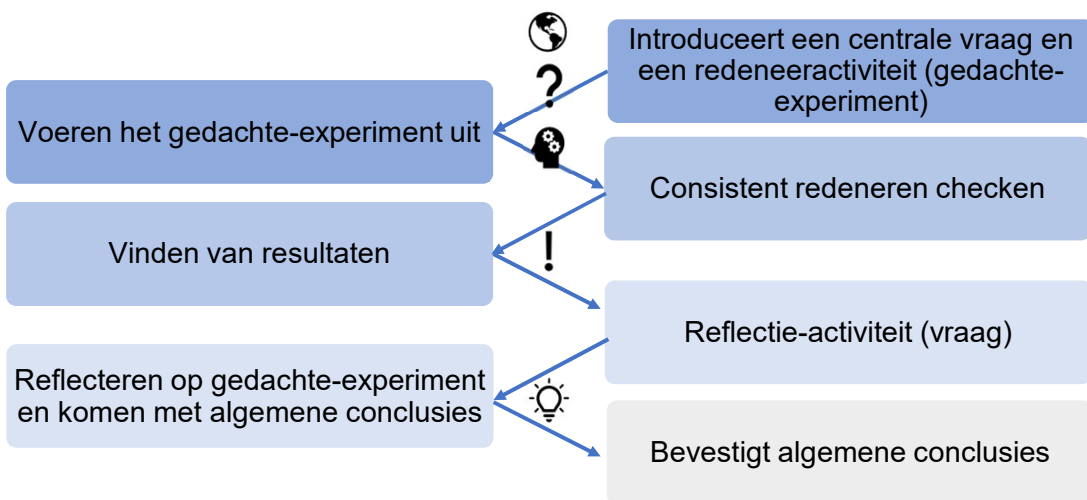
Wat betekenen deze resultaten voor wanneer gebeurtenissen gebeuren?



Gedachte-experimenten in de klas

Leerlingen

Docent ondersteund door lesmateriaal



Om gedachte-experimenten met de hele klas te doen en alle leerlingen erbij te betrekken, moet het gedachte-experiment goed gestructureerd zijn. Het is belangrijk dat alle leerlingen deelnemen aan het redeneerproces, en hetzelfde geldt voor de reflectie op de resultaten. Omdat het gemakkelijk is om kleine fouten te maken in het redeneerproces, is het belangrijk om het eerste deel van het gedachte-experiment te scheiden van het reflectiedeel, zodat leerlingen de kans krijgen om te reflecteren op de juiste resultaten.

GE3: Tijdrek



Twee waarnemers bestuderen hetzelfde proces: een lichtflits die op en neer kaatst tussen twee spiegels. De spiegels bevinden zich op een karretje, samen met een van de waarnemers. De waarnemers hebben een snelheid ten opzichte van elkaar.

Het proces is eerst weergegeven vanuit de waarnemer die in rust is ten opzichte van de spiegels. Deze waarnemer zegt dat het proces 6 tijdstapjes duurt.



Hoe lang doet de lichtflits erover om tussen de spiegels op en neer te kaatsen voor de waarnemer die de wagen voorbij ziet rijden?

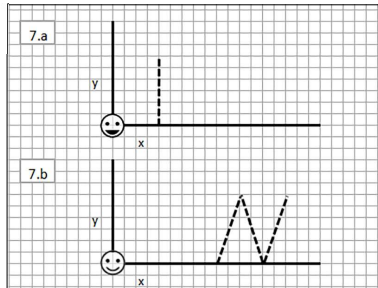


Gebruik diagram 7.b om het antwoord af te leiden.

Gebeurtenisdiagrammen kunnen ook worden gebruikt voor traditionele gedachte-experimenten, zoals het lichtklok-experiment. Leerlingen kunnen de positie van de lichtflits op de opeenvolgende tijdstappen tekenen en dit samenvatten in een xy-diagram.

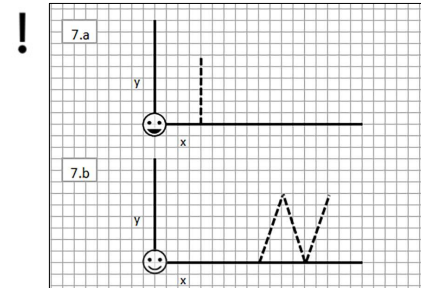
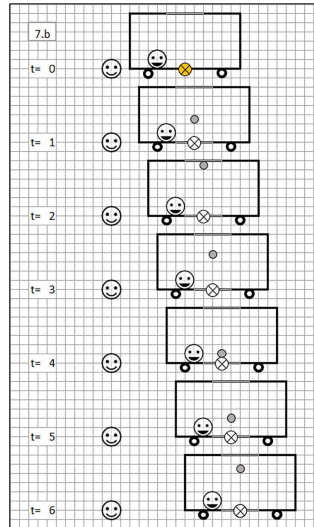
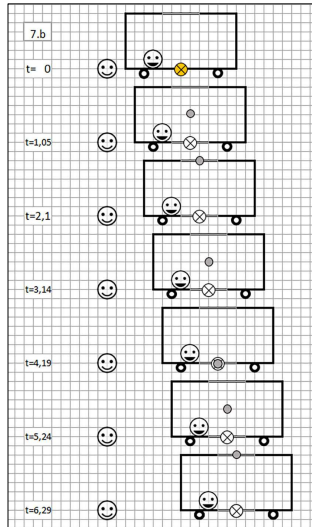
Reflectie

!



1. Wat is de tijdsduur tussen de twee gebeurtenissen volgens onderzoeker A (7.a)?
2. Meet onderzoeker B (7.b) dezelfde tijdsduur? Leg uit waarom wel/niet en wat het eventuele verschil is met onderzoeker A.
3. Wat verandert er als de relatieve snelheid tussen onderzoeker A en B toeneemt?
4. Wat verandert er als de relatieve snelheid in grootte gelijk blijft, maar in tegengestelde richting gaat?

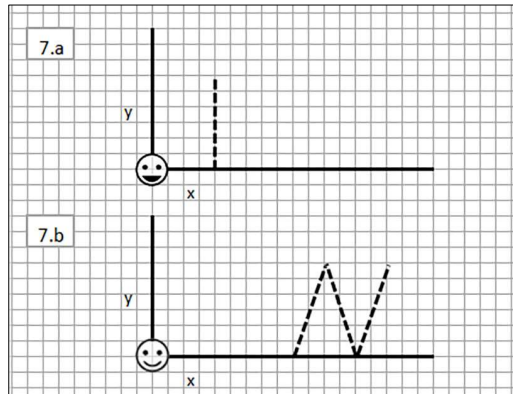
GE3: Tijdrek



! Het proces duurt langer voor de waarnemer die naar de bewegende spiegels kijkt, dan voor de waarnemer die naar de spiegels in rust kijkt.

Sommige leerlingen tekenen een lichtflits die dezelfde horizontale positie behoudt. Het gevolg is dat de flits de spiegel mist en het hele op-en-neer-proces niet plaatsvindt. Dan kan het helpen om leerlingen eraan te herinneren dat gebeurtenissen plaatsvinden in alle referentiesystemen. Het is alleen zo dat verschillende waarnemers verschillende waarden toekennen aan snelheid, positie, enzovoort. Door dezelfde situatie vanuit twee verschillende referentiesystemen te presenteren, ondersteunen we studenten met een van de aspecten die relativiteit moeilijk maken: het interpreteren van hetzelfde fenomeen vanuit meerdere referentiesystemen.

Aanknopingspunt aard van natuurwetenschappen



- Afstand licht opmeten
- Berekenen met pythagoras
- (na afleiding) berekenen met formule voor tijdrek



Hoofdboodschap

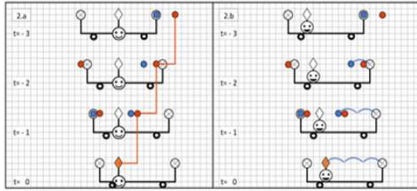
- 1) Het redeneerproces in gedachte-experimenten blijft vaak verborgen bij hun presentatie.
- 2) Dat redeneren zou expliciet gemaakt moeten worden en leerlingen hebben ondersteuning nodig bij het zelf uitvoeren van gedachte-experimenten.
- 3) Daarmee wordt het ook mogelijk om je onderwijs te koppelen aan leerling-ideeën over centrale begrippen in de theorie.



Relativiteit in de klas

Lesmateriaal ontwikkeld door Floor Kamphorst

| © freudenthal instituut | 99 views | Home |



j leerlingen ook
en van de
fenomenen
leerlingen de
liggende
vrieten
meer uitkomen
samenwerking
van Floor
nder een CC-BY-

Algemeen

Achtergrond (pdf).

Les 1 - Hoe kan je beweging beschrijven?

Over dit lesmateriaal verscheen het artikel Relativiteit in de klas (1) - Relativistisch redeneren in gedachte-experimenten, in NVOX (oktober 20

- Docenthandleiding
- Leerlingenboekje
- Powerpoint
- Uitwerkingen

Les 2 - Hoe beweegt licht?

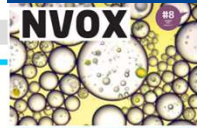
Les 3 - Wat kunnen we leren van de tekenregelvoorspelling

Les 4 - Kan een van de tekenregels worden bevestigd?

Over dit lesmateriaal verscheen het artikel Relativiteit in de klas (2) - Hk introduceer je een noodzaak voor het lichtpostulaat?, in NVOX (novembe

- Docenthandleiding
- Leerlingenboekje
- Powerpoint Les 2
- Powerpoint Les 3
- Powerpoint Les 4
- Uitwerkingen

2021-2022



Bedankt!

Kamphorst, F., Vollebregt, M. J., Savelsbergh, E. R., & van Joolingen, W. R. (2021). An Educational Reconstruction of Special Relativity Theory for Secondary Education. *Science & Education*, 1-44.

<https://www.fisme.science.uu.nl/toepassingen/28984/>

Reiner, M., Burko, L.M. (2003). On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the Consequences for Physics Education. *Science & Education*, 12(4), 365–385.

Syllabus Natuurkunde VWO, versie 4 juni 2023

