

Speciale Relativiteit in de klas - Uitwerkingen

Lesmateriaal ontwikkeld tijdens het promotieonderzoek van Floor Kamphorst, in samenwerking met Paul Alstein, Jan Dentener, Stefan van Dijk, Gerhard van Hunnik, Bart van de Laar, Sjaak Meertens, Johanna Phaf-Novozamsky, Marianne Verhaart, Bastiaan Vinke, Tienke de Vries en Nathalie van der Weide.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Bron afbeelding: pixabay.com

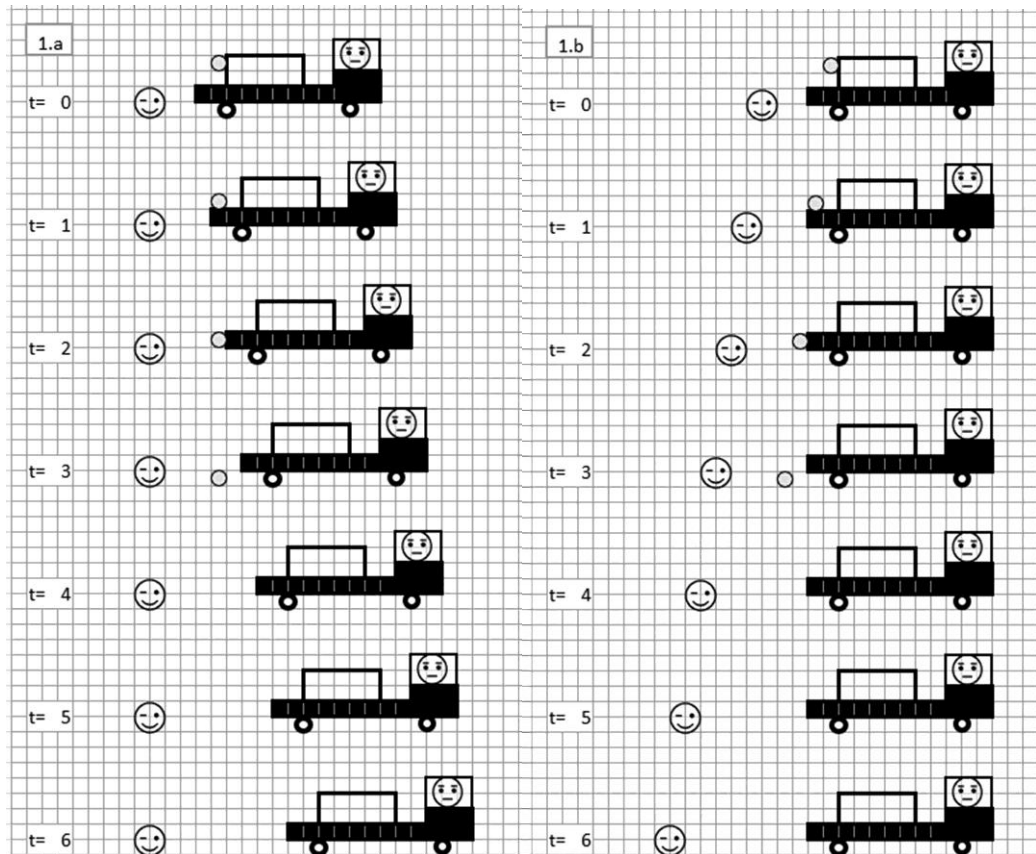


Inhoudsopgave

1. Hoe kan je beweging beschrijven?.....	2
2. Hoe beweegt licht?.....	6
3. Wat kunnen we leren van tekenregel-voorspellingen?.....	9
4. Kan een van de tekenregels bevestigd worden door experimenten om het als voortbewegingsmodel voor licht te kunnen gebruiken?.....	15
5. Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?.....	18
6. Wat zijn de gevolgen van het lichtpostulaat voor plaats en tijd?.....	22
7. Wat is er aan de hand met tijdsduur?.....	26
8. Met welke formule kunnen we de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 1 uitdrukken in de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 2?.....	29
9. Wat betekent dit allemaal voor metingen in de natuurkunde?.....	31

1. Hoe kan je beweging beschrijven?

Opdracht 1.1



1. $t = 0$
2. Ten opzichte van de persoon op de grond: 5 hokjes naar rechts (geteld vanaf midden van de waarnemer tot de loop van het geweer = rechterkant bal)
 - a. Ten opzichte van de persoon in de truck. 8 hokjes naar links
 - b. Ten opzichte van de persoon op de grond. 5 hokjes naar rechts (rechterkant bal)
3. Ten opzichte van de persoon in de truck. 11 hokjes naar links
 - a. Ten opzichte van de persoon op de grond. 0 hokjes per tijdstapje (verplaatsing is 0 hokjes: $5-5 = 0$)
 - b. Ten opzichte van de persoon in de truck. 1 hokje per tijdstapje (verplaatsing is $11-8 = 3$; tijdsduur = 3 tijdstapjes; $3/3 = 1$)



Opdracht 1.2

4. De positie van gebeurtenis 2 verschilt voor beide cameraposities
5. Vanaf de grond: horizontale snelheid is gelijk aan 0 hokjes per tijdstapje;
Vanaf de truck: de horizontale snelheid is gelijk aan 1 hokje per tijdstapje.
6. Het tijdstip van de gebeurtenissen is gelijk voor beide cameraposities.

Opdracht 1.3

1. Zie diagram 1.a bij opdracht 1.1

Vanuit referentiekader van de bal, dus de vraag is: hoe bewegen de andere objecten tov de bal.

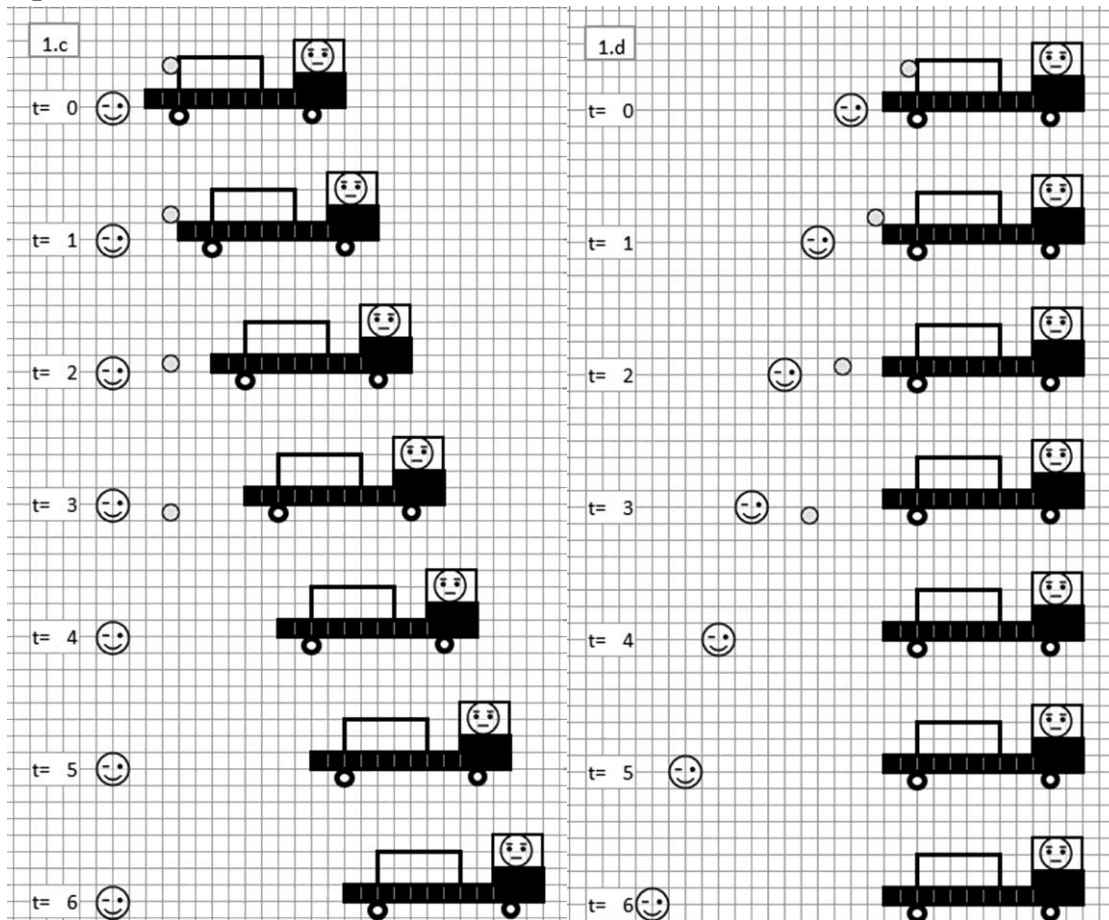
Positie gebeurtenis 1: 0 – bij de bal

Positie gebeurtenis 2: 0 – bij de bal

Snelheid truck: 1 hokje per tijdstapje omhoog, 1 hokje per tijdstapje naar rechts

Snelheid waarnemer op de grond: 1 hokje per tijdstapje omhoog.

Opdracht 1.4



1. $t=0$, bal wordt afgeschoten
2.
 - a. 5 hokjes rechts van
 - b. 8 hokjes links van
3.
 - a. 5 hokjes rechts van
 - b. 16 hokjes links van
4.
 - a. $v=0$ hokjes per tijdstapje
 - b. $v=2$ hokjes per tijdstapje

Opdracht 1.5

1. $t=2$ is de kogel afgevuurd
2.
 - a. 8 hokjes naar rechts
 - b. 0 hokjes naar links/rechts
 - c. 8 hokjes naar links
3. ?
 - a. 12 hokjes naar rechts



- b. 8 hokjes naar rechts
 - c. 0 hokjes naar links/rechts
- 4.
- a. 1 hokje/tijdstapje naar rechts
 - b. 2 hokjes/tijdstapje naar rechts
 - c. 2 hokjes/tijdstapje naar rechts

Opdracht 1.6

1. Positie van de misdaad hangt af van de waarnemer
2. Snelheid van de kogel is hetzelfde voor de waarnemers op de trein, maar anders voor de waarnemer op de grond.
3. Tijdstip van de misdaad is voor alle waarnemers gelijk.

Opdracht 1.7: Beantwoorden lesvraag

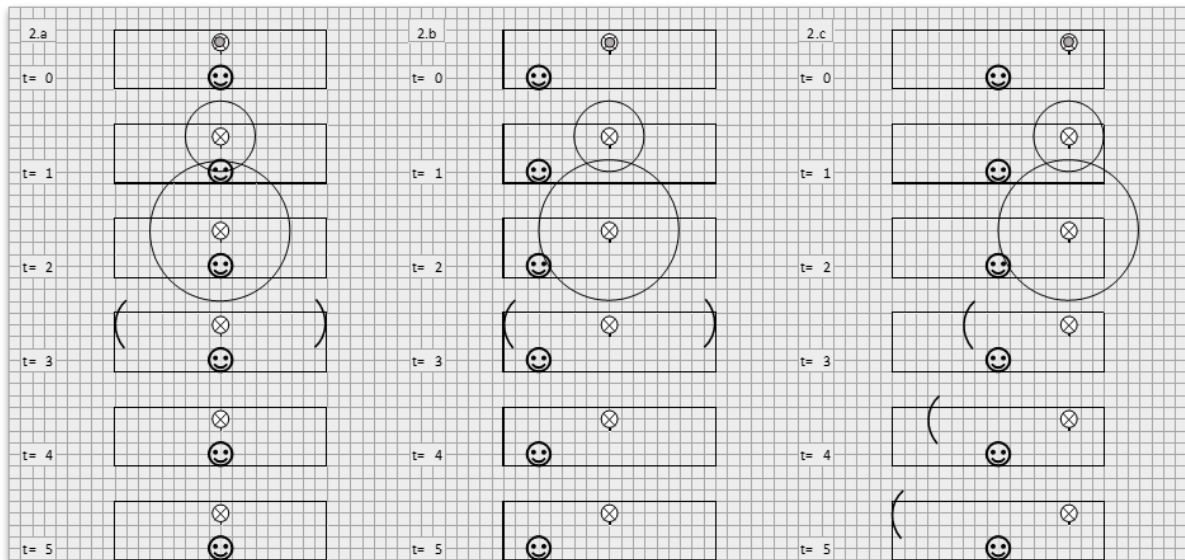
Voor 2 waarnemers (die ten opzichte van elkaar bewegen):

- Vinden gebeurtenissen voor beiden plaats
- Verschilt de snelheid van objecten
- Verschilt (mogelijk) de positie van objecten of gebeurtenissen

2. Hoe beweegt licht?

Opdracht 2.1

Tekenaanwijzing: laat het licht vertrekken uit het midden van de lamp.



Er zijn meerdere manieren om dit te tekenen: met cirkels, met streepjes of met stipjes. In principe zijn alledrie goed. Bij een 1-dimensionale opdracht zijn streepjes/stipjes wel efficiënter.

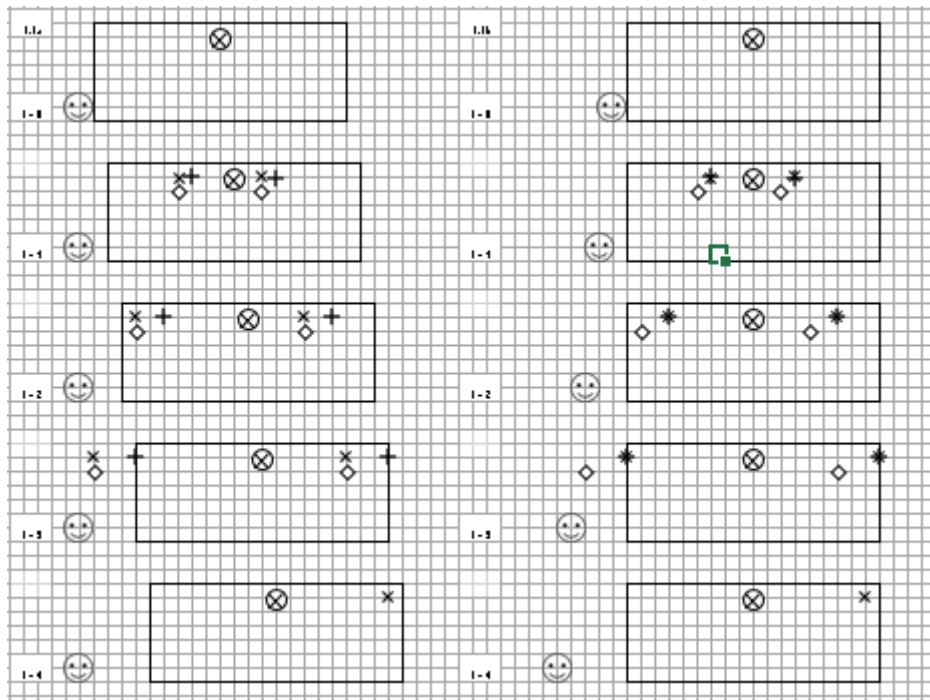
2.a licht raakt de deuren op $t=3$

2.b licht raakt de deuren op $t=3$

2.c licht raakt de rechterdeur op $t=1$ en de linkerdeur op $t=5$.

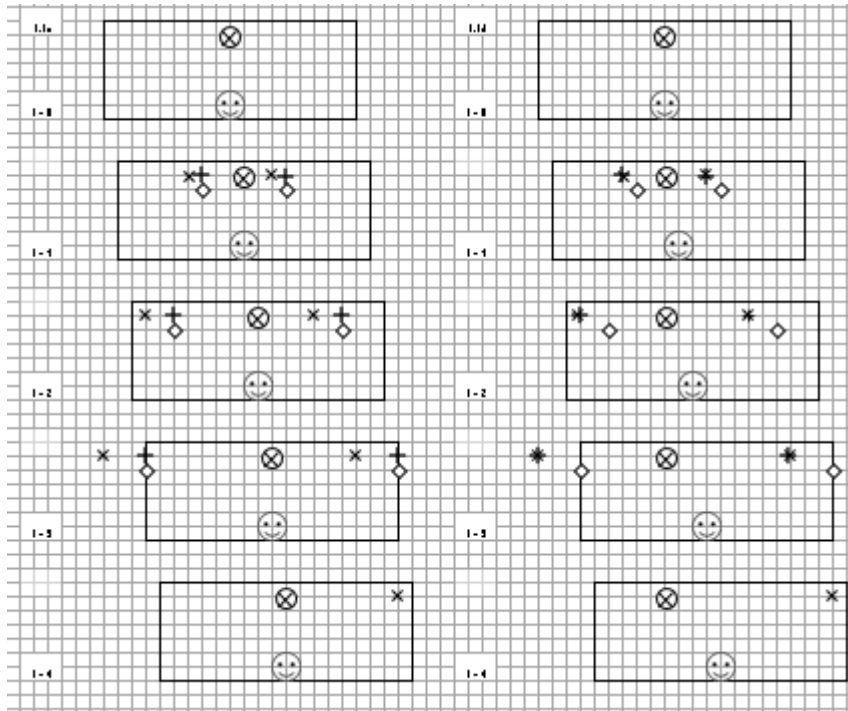
Opdracht 2.2

Er zijn drie mogelijke consistente uitwerkingen: ten opzichte van de oorspronkelijke positie van de lichtbron (golfmodel van licht - kruis); ten opzichte van de lamp (deeltjesmodel van licht - plusje); ten opzichte van de waarnemer (lichtpostulaat - ruitje). Voor het overzicht zijn de symbolen voor lichtpostulaat een regel lager getekend, maar zij bevinden zich steeds op de hoogte waarop het licht is uitgezonden.



Tijdstip dat het licht bij de deuren aankomt hangt af van het gebruikte model.

- 2.c Golfmodel & lichtpostulaat: linkerdeur tussen 2 en 3, rechterdeur tussen 4 en 5
 Deeltjesmodel: licht bereikt beide deuren op $t = 3$
- 2.d Golfmodel en deeltjesmodel: licht bereikt beide deuren op $t = 3$
 Lichtpostulaat: linkerdeur tussen 2 en 3, rechterdeur tussen 4 en 5



Tijdstip dat het licht bij de deuren aankomt hangt af van het gebruikte model.

2.e Golfmodel: linkerdeur tussen 2 en 3, rechterdeur tussen 4 en 5
Deeltjesmodel en lichtpostulaat: licht bereikt beide deuren op $t = 3$

2.f Golfmodel en deeltjesmodel: licht bereikt beide deuren op $t = 3$
Lichtpostulaat: licht bereikt beide deuren op $t = 3$

Opdracht 2.4: Beantwoorden lesvraag

Licht heeft een constante snelheid ten opzichte van iets. Dat iets kan zijn:

1. de positie waar het licht is uitgezonden/ "de achtergrond"
2. de lichtbron
3. een waarnemer

3. Wat kunnen we leren van tekenregelvoorspellingen?

Opdracht 3.1: Tekenregel 1: constante snelheid t.o.v. beginpositie/papier

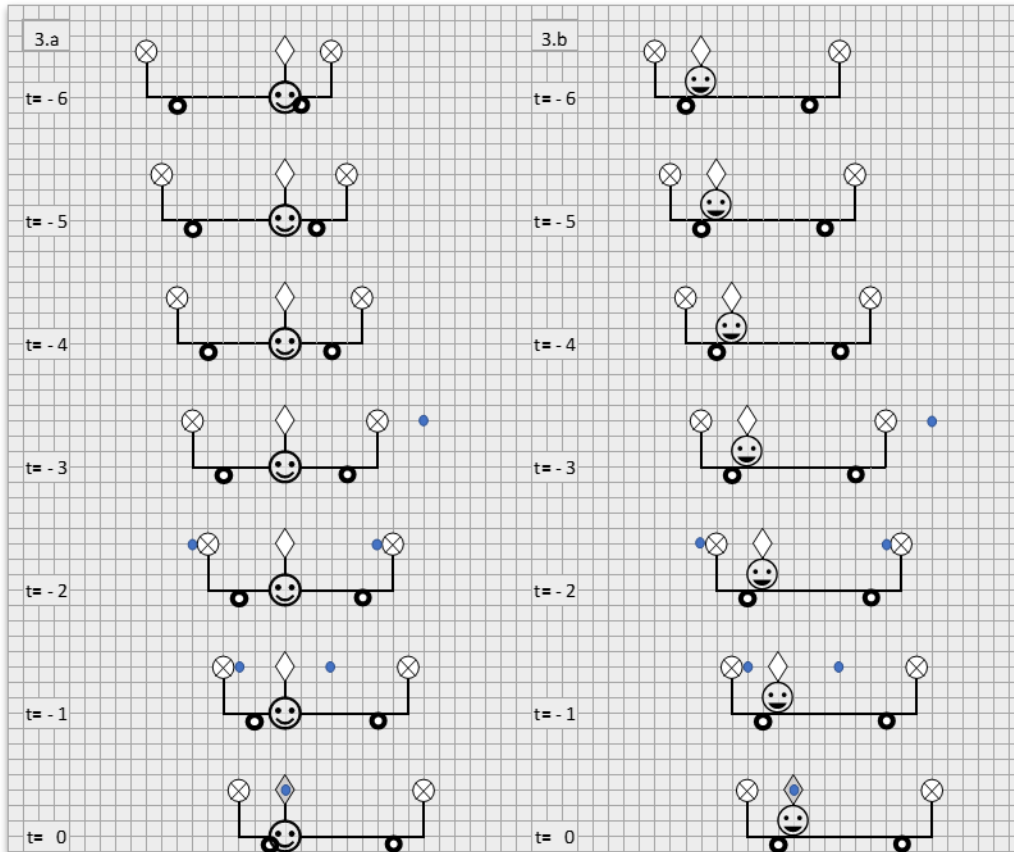
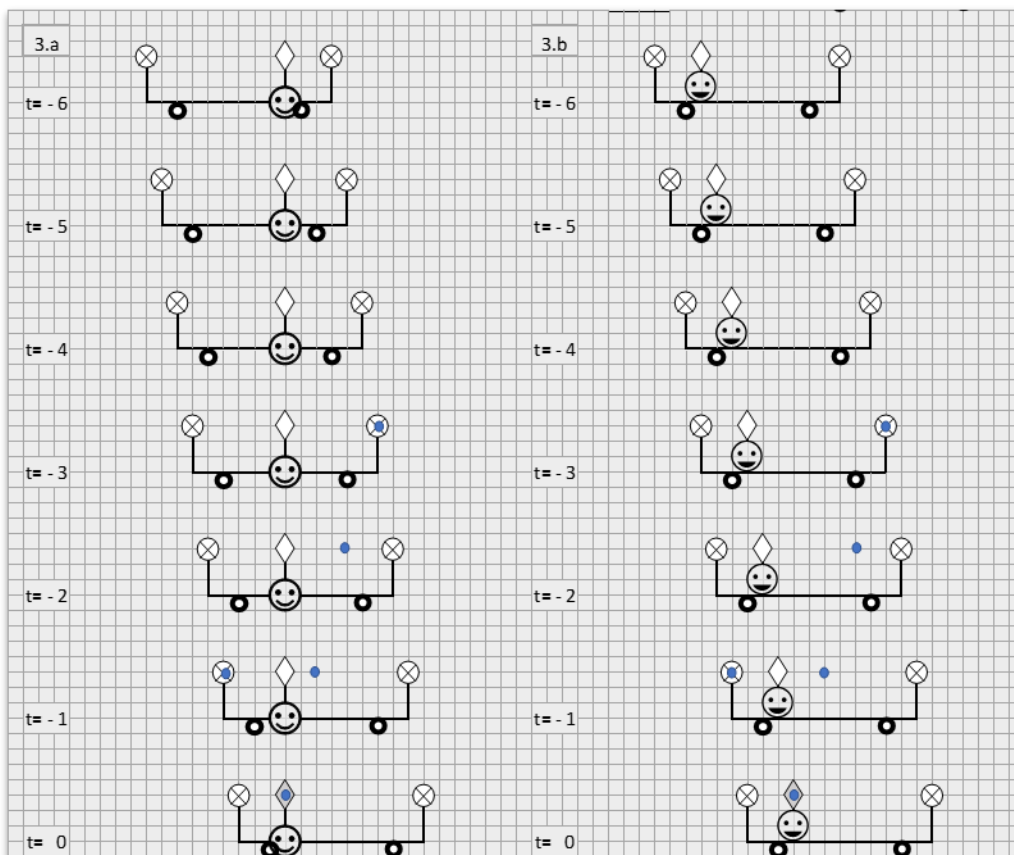


Diagram 3a

1. links tussen $t = -1$ en $t = -2$; rechts tussen $t = -2$ en $t = -3$
2. Snelheid ten opzichte van het papier en de onderzoeker 3 hokjes/tijdstapje; ten opzichte van de lampen: 2 hokjes/tijdstapje naar rechts en 4 hokjes/tijdstapje naar links.
3. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet

Diagram 3b

1. links tussen $t = -1$ en $t = -2$; rechts tussen $t = -2$ en $t = -3$
2. Snelheid ten opzichte van het papier 3 hokjes/tijdstapje; ten opzichte van de lampen en de onderzoeker: 2 hokjes/tijdstapje naar rechts en 4 hokjes/tijdstapje naar links.
3. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet

Opdracht 3.2: Tekenregel 2: Constante snelheid t.o.v. lichtbron

Diagram 3.a

1. Links $t = -1$; rechts $t = -3$
2. Snelheid ten opzichte van het papier en de onderzoeker 4 hokjes/tijdstapje naar links en 2 hokjes/tijdstapje naar rechts; ten opzichte van de lampen: 3 hokjes/tijdstapje.
3. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet.

Diagram 3.b

1. Links $t = -1$; rechts $t = -3$
2. Snelheid ten opzichte van het papier 4 hokjes/tijdstapje naar links en 2 hokjes/tijdstapje naar rechts; ten opzichte van de lampen en de onderzoeker: 3 hokjes/tijdstapje.
3. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet.

Opdracht 3.3: Verwerkingsvragen

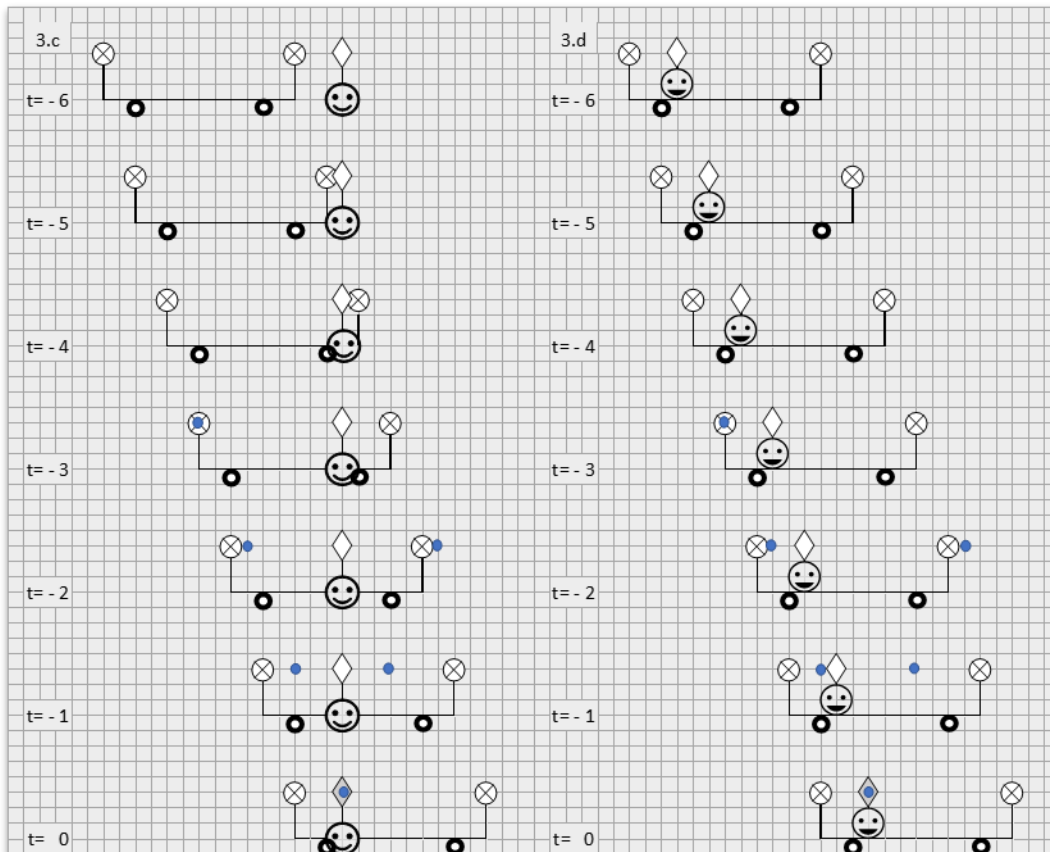
Diagram 3.a	Tekenregel 1 (tov papier)	Tekenregel 2 (tov lamp)	Diagram 3.b	Tekenregel 1 (tov papier)	Tekenregel 2 (tov lamp)
1a	3	2	3a	2	3
1b	4	3	3b	2	3
1c	3	2	3c	3	2
2a	3	4	4a	4	3
2b	2	3	4b	4	3
2c	3	4	4c	3	4

Reflectieopdracht 3.4

1. Fysisch correcte antwoord: D
2. Eigen antwoord. We willen toe naar nee.
3. Nee, want de voorspellingen zijn anders. Een meting kan hooguit één van de twee voorspellingen bevestigen.

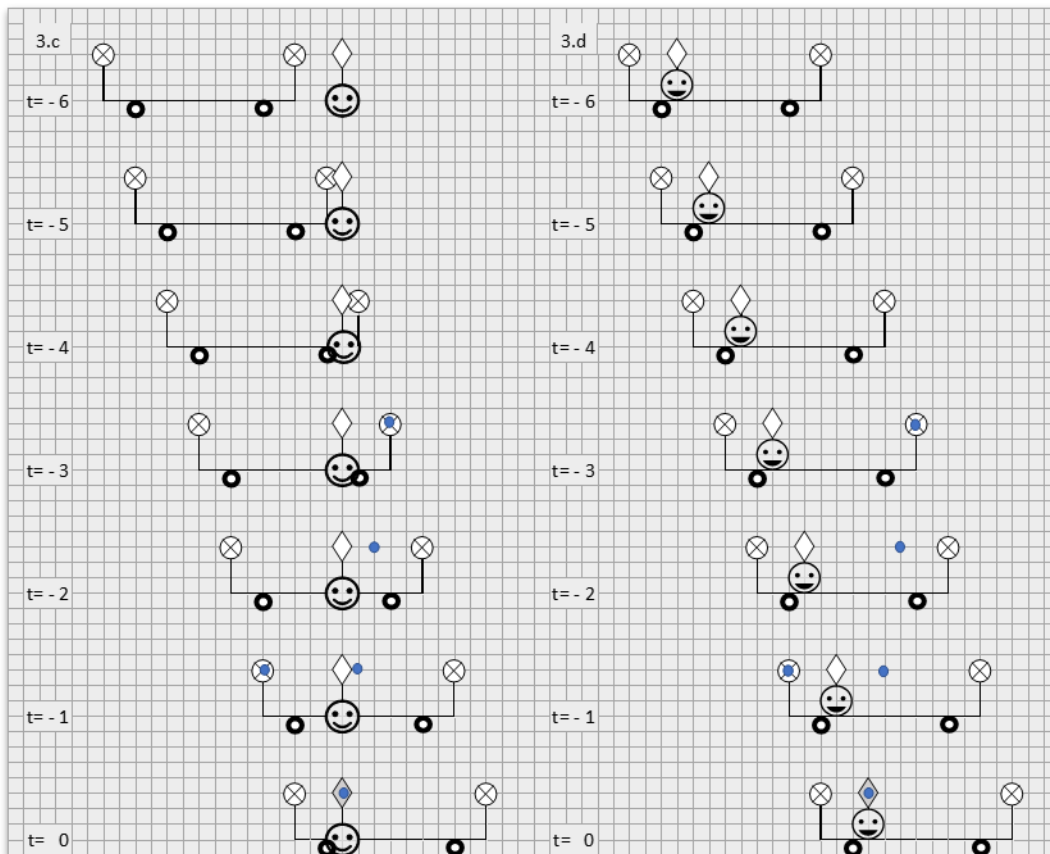
Opdracht 3.5 Extra oefenen met tekenregel 1 en 2

Tekenregel 1 : constante snelheid tov ruitjespapier

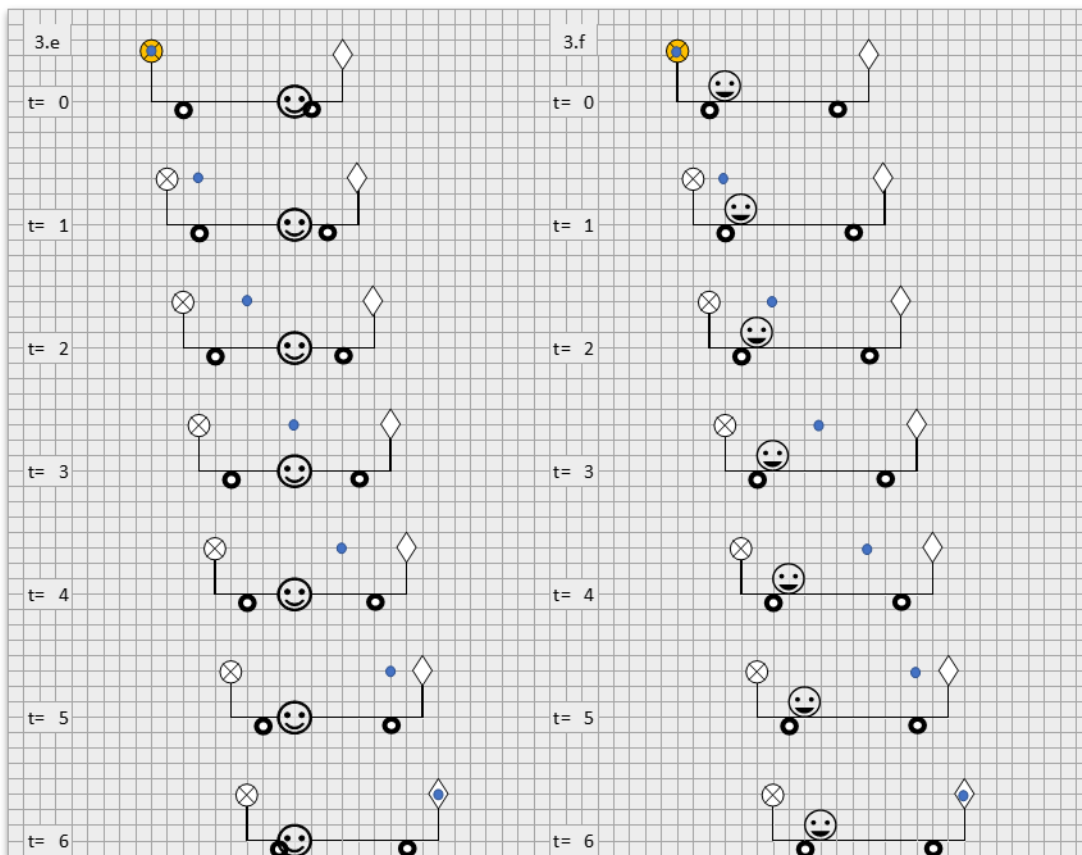


3.1

1. 3.c & 3.d $t=-3$ links en tussen $t=-1$ en $t=-2$ rechts.
2. 3.c: snelheid ten opzichte van het papier en de onderzoeker 3 hokjes/tijdstapje; ten opzichte van de lampen: 1 hokjes/tijdstapje naar rechts en 5 hokjes/tijdstapje naar links.
- 3.d: snelheid ten opzichte van het papier 3 hokjes/tijdstapje; ten opzichte van de lampen en de onderzoeker: 1 hokjes/tijdstapje naar rechts en 5 hokjes/tijdstapje naar links.
3. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet.

Tekenregel 2 : constante snelheid tov ruitjespapier

3.2

1. 3.c & 3.d Links $t= -1$; rechts $t= -3$
 2. 3.c: snelheid ten opzichte van het papier en de onderzoeker 5 hokjes/tijdstapje naar links en 1 hokjes/tijdstapje naar rechts; ten opzichte van de lampen: 3 hokjes/tijdstapje.
 3. 3.d: snelheid ten opzichte van het papier 5 hokjes/tijdstapje naar links en 1 hokjes/tijdstapje naar rechts; ten opzichte van de lampen en de onderzoeker: 3 hokjes/tijdstapje.
 4. Antwoorden voor de tijdstippen gelijk, voor de snelheid niet.
-
1. Wat is het verschil in de uitkomst? Beide tekenregels doen een andere voorspelling over het tijdstip waarop het licht is uitgezonden.
 2. Hoe kan je dat verklaren? De tekenregels staan voor verschillende modellen van het gedrag van licht.

Opdracht 3.6 Extra oefenen met tekenregel 1


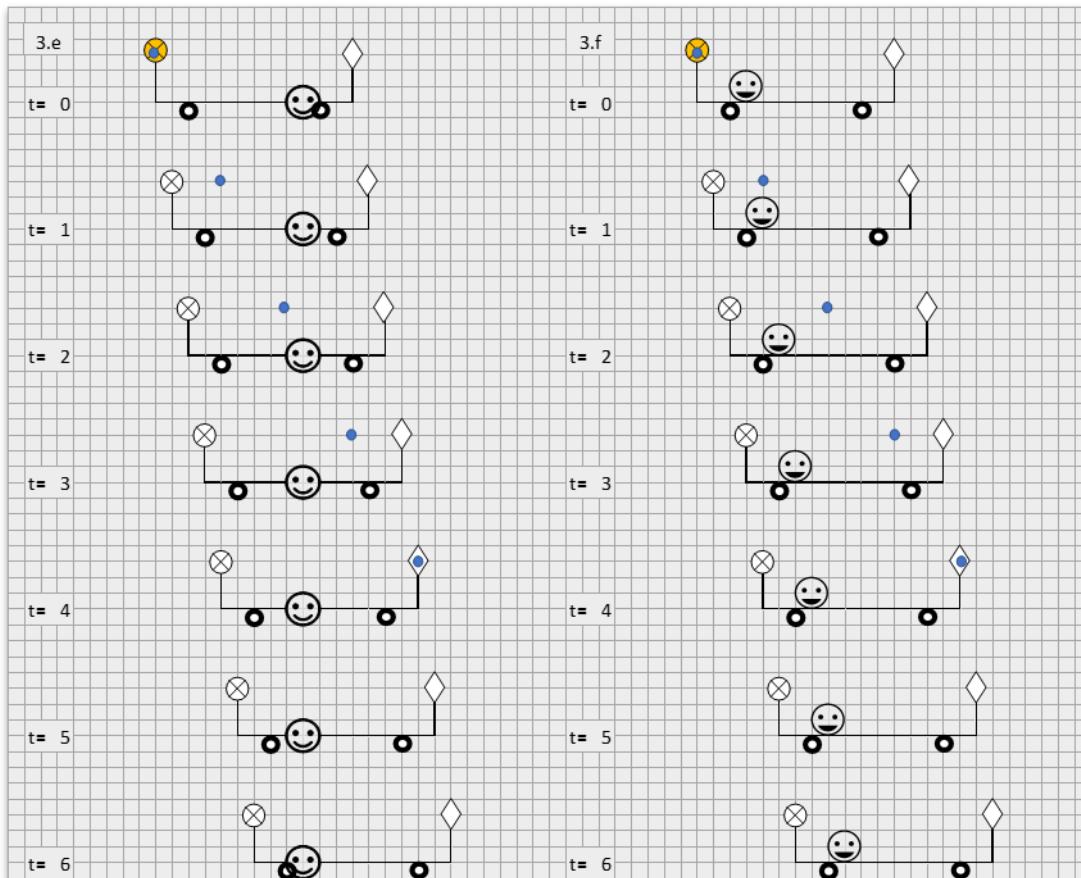
Inertiaalstelsel van de onderzoeker die naar een bewegende lichtbron kijkt (Diagram 3.e)

1. 6 tijdstapjes
2. 3 hokjes per tijdstapje naar rechts
3. evenveel tijdstapjes, maar een andere snelheid

Inertiaalstelsel van de onderzoeker die met de lichtbron meebeweegt (Diagram 3.f)

1. 6 tijdstapjes
2. 2 hokjes per tijdstapje naar rechts
3. Evenveel tijdstapjes, maar een andere snelheid

Opdracht 3.7 Extra oefenen met tekenregel 2



Inertiaalstelsel van de onderzoeker die naar een bewegende lichtbron kijkt (Diagram 3.e)

1. 4 tijdstapjes
2. 4 hokjes per tijdstapje naar rechts
3. Evenveel tijdstapjes, maar een andere snelheid

Inertiaalstelsel van de onderzoeker die met de lichtbron meebeweegt (Diagram 3.f)

1. 4 tijdstapjes
2. 3 hokjes per tijdstapje naar rechts
3. Evenveel tijdstapjes, maar een andere snelheid

Opdracht 3.8: Beantwoorden lesvraag

We hebben twee tekenregels gebruikt om voorspellingen te doen

Toepassen van deze tekenregels in dezelfde situatie levert verschillende voorspellingen op.

Deze twee voorspellingen kunnen niet allebei tegelijk door een meting bevestigd worden.



4. Kan een van de tekenregels bevestigd worden door experimenten om het als voortbewegingsmodel voor licht te kunnen gebruiken?

Opdracht 4.1: Michelson-Morley Experiment

Beweging

1. Niet
2. Wel
3. Wel
4. Diagram 3b

Het Michelson-Morley experiment in het Event Diagram

5. Gelijk aan
6. Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.
7. Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.

Geldigheid van de conclusie

8. Stilstaat
9. Beweegt
10. Beweegt

Opdracht 4.2: De Sitter Experiment

Beweging

1. Wel
2. Wel
3. Niet
4. Diagram 3a

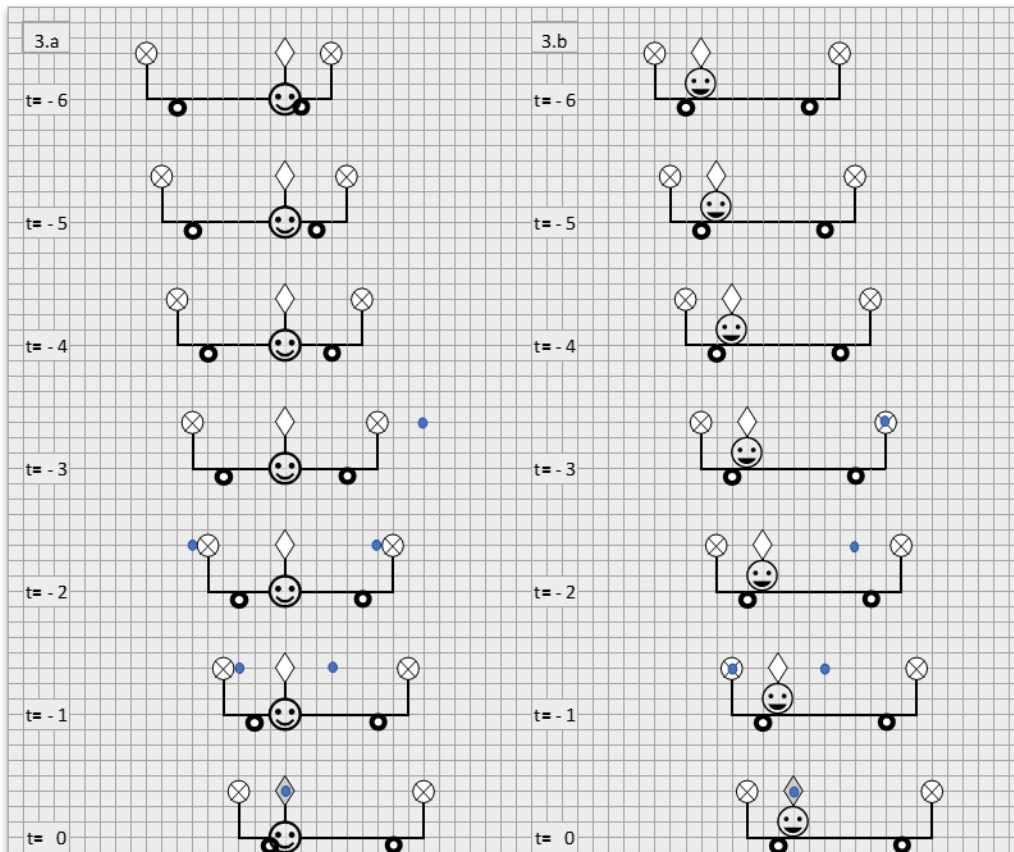
Het De Sitter experiment in het Event Diagram

5. Gelijk aan
6. Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.
7. Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.

Geldigheid van de conclusie

8. Beweegt
9. Stilstaat
10. Beweegt

Opdracht 4.3: Verwerkingsvragen



Vragen bij Diagram 3.a

1.
 - a. 3 hokjes/tijdstapje
 - b. 2 hokjes/tijdstapje
 - c. 3 hokjes/tijdstapje
2. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. 3 hokjes/tijdstapje
 - b. 4 hokjes/tijdstapje
 - c. 3 hokjes/tijdstapje

Vragen bij Diagram 3.b

1. Wat is de snelheid van het licht naar rechts?
 - a. 3 hokjes/tijdstapje
 - b. 3 hokjes/tijdstapje
 - c. 4 hokjes/tijdstapje
2. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. 3 hokjes/tijdstapje
 - b. 3 hokjes/tijdstapje
 - c. 2 hokjes/tijdstapje



Opdracht 4.4: Beantwoorden lesvraag

1. Zowel tekenregel 1 als 2 levert geen algemeen voortbewegingsmiddel voor licht op.



5. Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?

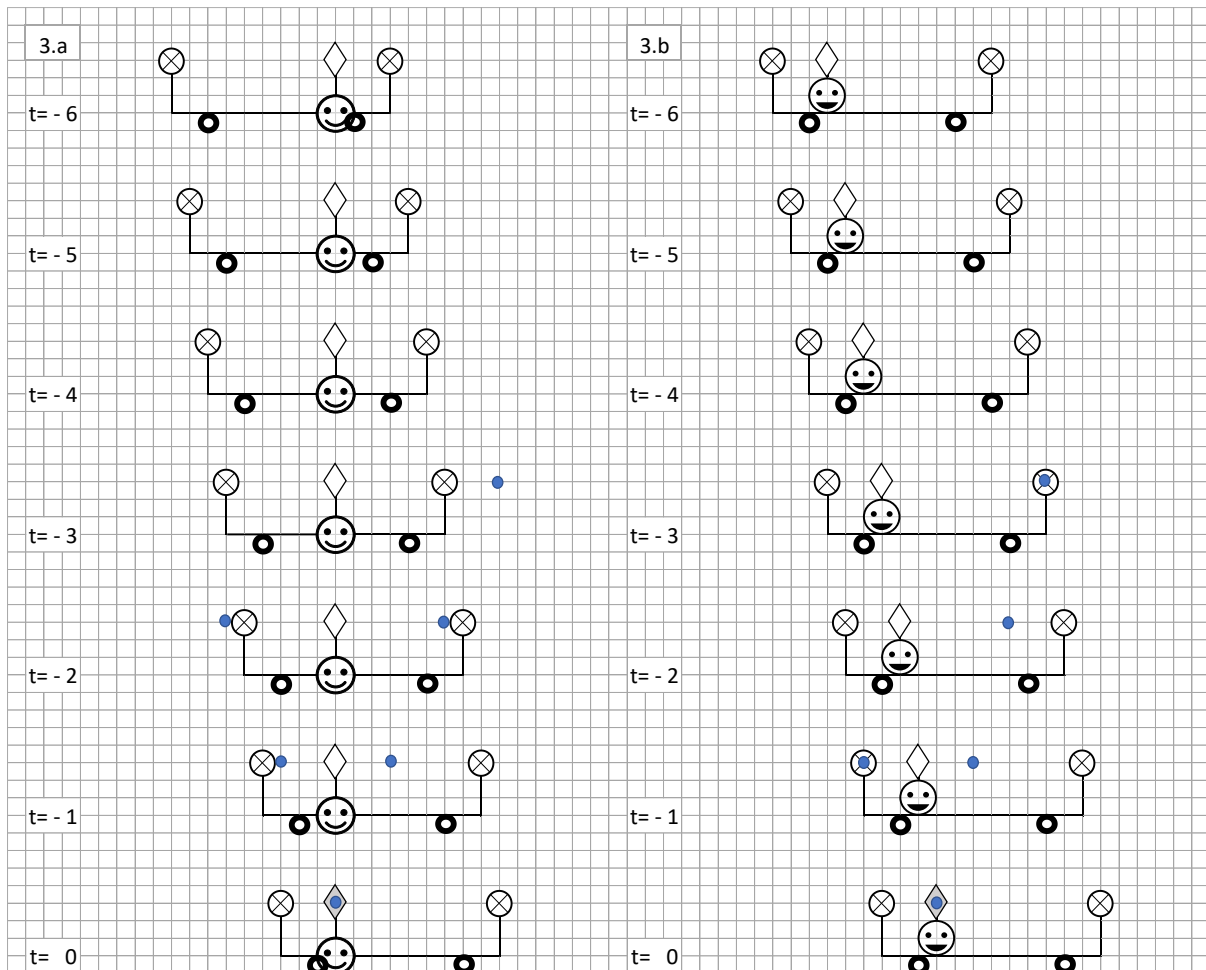
Opdracht 5.1

Michelson Morley	De Sitter
Komt overeen met Diagram 3b	Komt overeen met Diagram 3a
De lamp beweegt niet t.o.v. de waarnemer	De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de waarnemer
De waarnemer beweegt wel t.o.v. de achtergrond	De waarnemer beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond
De lamp beweegt wel t.o.v. de achtergrond	De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond
Snelheid licht t.o.v. waarnemer naar rechts: 3 hokjes per tijdstapje naar links: 3 hokjes per tijdstapje	Snelheid licht t.o.v. waarnemer naar rechts: 3 hokjes per tijdstapje naar links: 3 hokjes per tijdstapje
Snelheid licht t.o.v. lamp naar rechts: 3 hokjes per tijdstapje naar links: 3 hokjes per tijdstapje	Snelheid licht t.o.v. lamp naar rechts: 2 hokjes per tijdstapje naar links: 4 hokjes per tijdstapje
Snelheid licht t.o.v. ruitjespapier naar rechts: 4 hokjes per tijdstapje naar links: 2 hokjes per tijdstapje	Snelheid licht t.o.v. ruitjespapier naar rechts: 3 hokjes per tijdstapje naar links: hokjes per tijdstapje

Reflectieopdracht 5.2

1. Het licht beweegt met een constante lichtsnelheid van 3 hokjes per tijdstapje ten opzichte van de waarnemer.

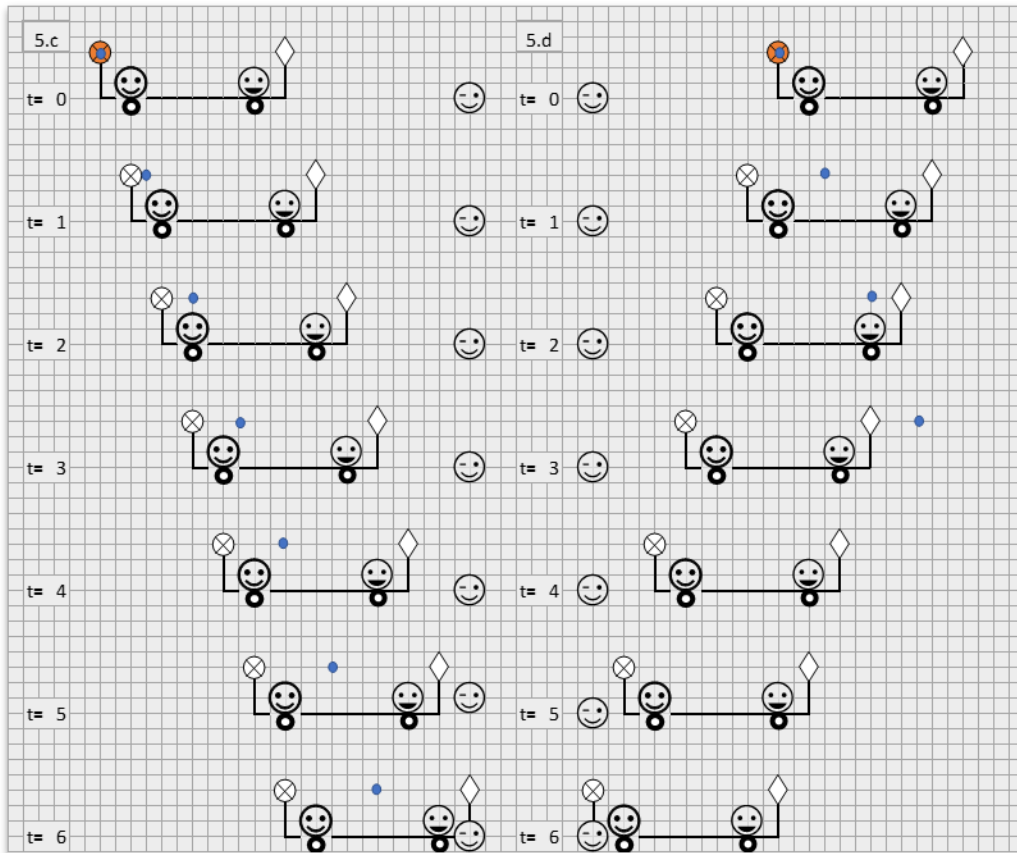
2.



3. Ja, want het antwoord komt overeen met de uitkomsten van beide experimenten.

4. Het licht beweegt met een snelheid van 3 hokjes per tijdstapje ten opzichte van de waarnemer.

Opdracht 5.4



Vanuit de toeschouwer op het perron:

1. 5c. 12 tijdstapjes; 5d. tussen 2 en 3 tijdstapjes
2. 3 hokjes per tijdstapje ten opzichte van de toeschouwer

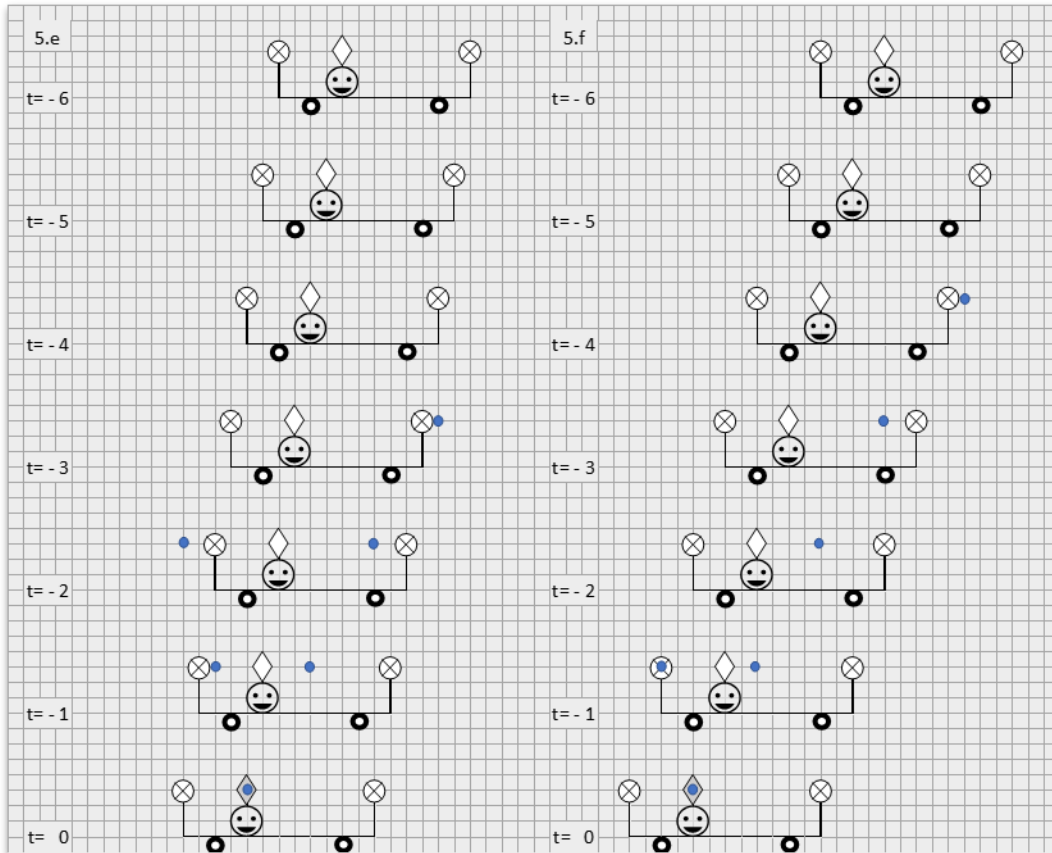
Vanuit de passagiers in de trein:

3. 5c en 5d. 4 tijdstapjes
4. 3 hokjes per tijdstapje ten opzichte van de passagiers

Aanvullen met tweede sets eds

Opdracht 5.4

Aanvullen met g en h

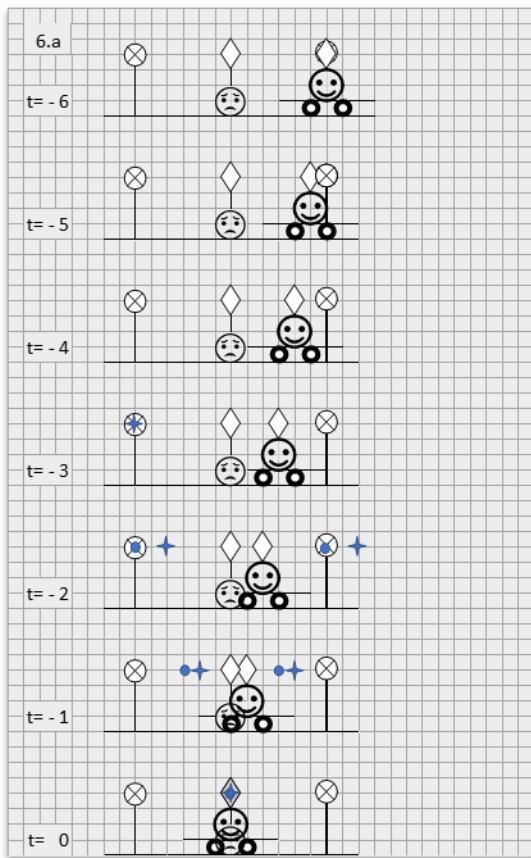


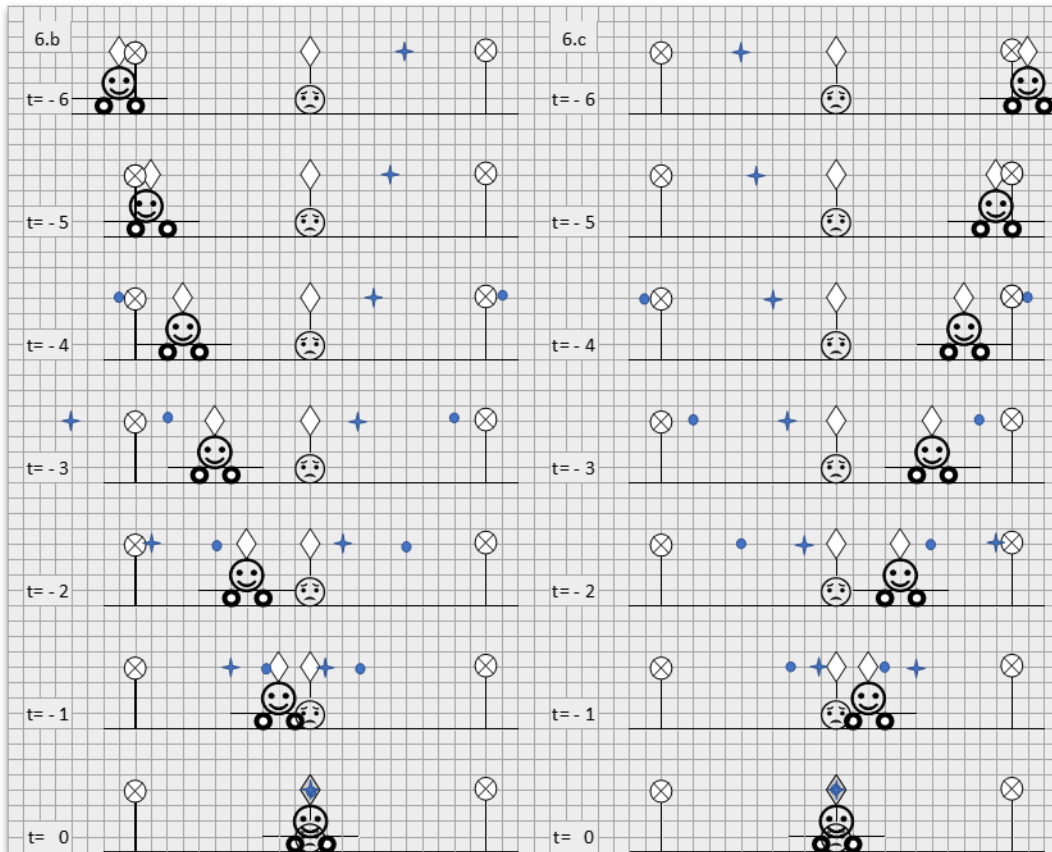
Opdracht 5.5: Beantwoorden lesvraag

1. Ja. Licht heeft een constante snelheid ten opzichte van de onderzoeker. Dit geldt voor alle onderzoekers, in alle situaties. Deze regel noemen we het lichtpostulaat.

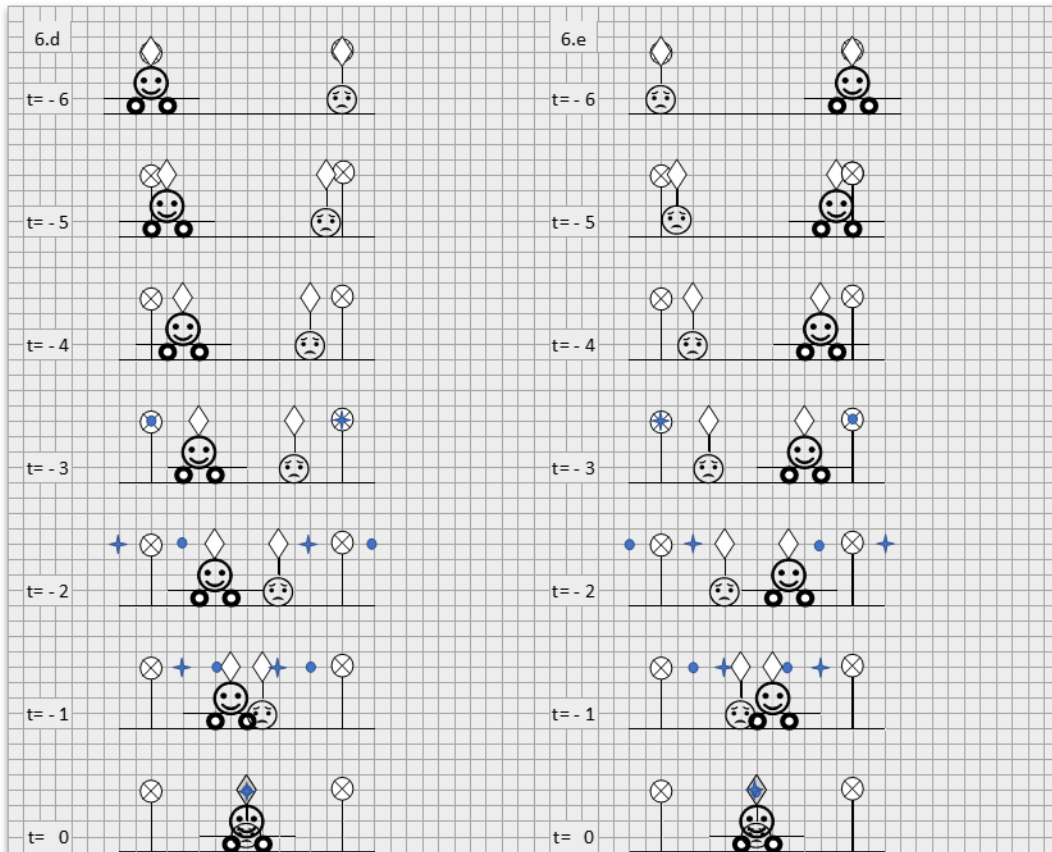
Opdracht 6.2

- a. Blij smiley: links $t = -3$; rechts tussen $t = -1$ en $t = -2$
- b. Zielige smiley: links en rechts $t = -2$





- a. Blijle smiley: links tussen $t = -2$ en $t = -3$; rechts $t = -11$
 Zielige smiley: links en rechts tussen $t = -3$ en $t = -4$
- b. Blijle smiley: links $t = -11$; rechts tussen $t = -3$ en $t = -4$
 Zielige smiley: Links en rechts tussen $t = -3$ en $t = -4$



c. Blij smiley: links $t = -1$ en $t = -2$; rechts $t = -3$
 Zielige smiley: Links en rechts $t = -3$

d. Blij smiley: links $t = -3$; rechts tussen $t = -1$ en $t = -2$
 Zielige smiley: Links en rechts tussen $t = -3$

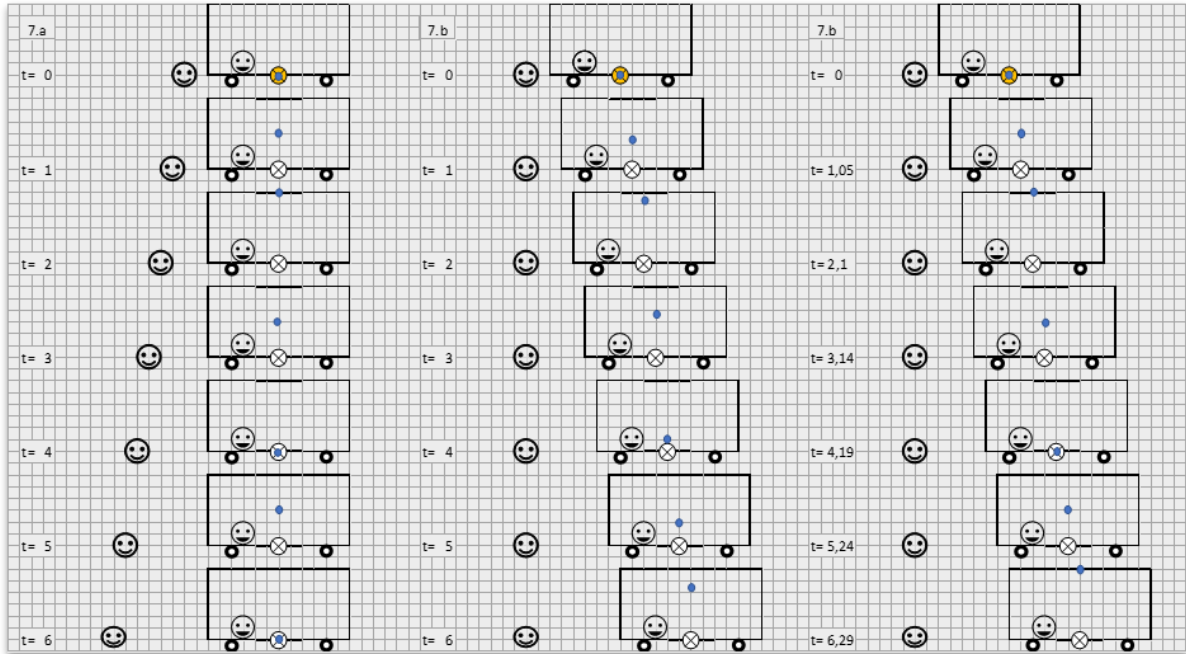
Opdracht 6.3: Beantwoorden lesvraag

Onderzoekers die ten opzichte van elkaar bewegen zijn het niet eens over de tijd en de plaats waar(op) gebeurtenissen plaatsvinden.

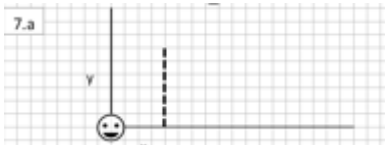
7. Wat is er aan de hand met tijdsduur?

Opdracht 7.1

1.

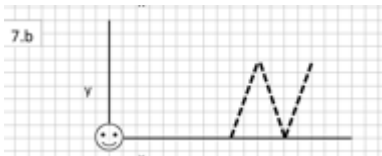


2. 4 tijdstapjes



3.

4. Zie figuur bij vraag 7.1-1



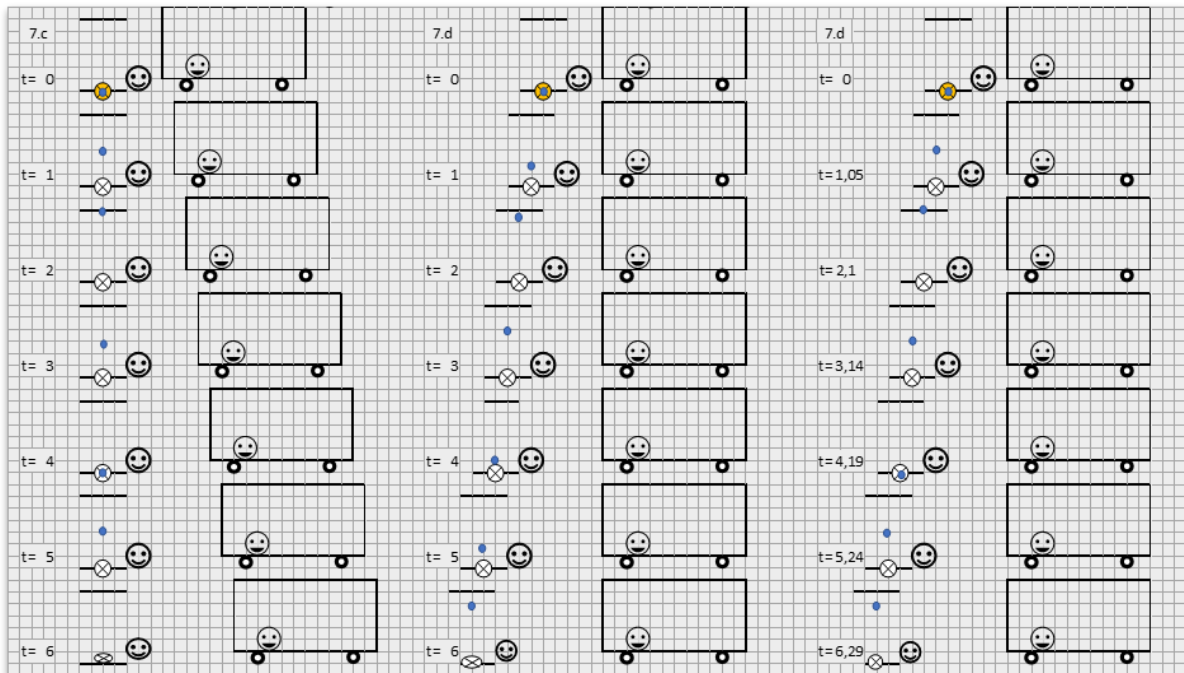
5.

Reflectieopdracht 7.2

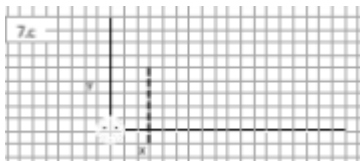
1. 4 tijdstapjes
2. Nee. De snelheid is hetzelfde (3 hokjes/tijdstapje) en de afgelegde afstand is groter. Hierdoor kom je uit op 4,22 tijdstapjes
3. Dan wordt het verschil in door het licht afgelegde afstand en daarmee het verschil in gemeten tijdsduur groter
4. Niets, want dit leidt niet tot een verandering in het verschil in afgelegde afstand

Opdracht 7.3

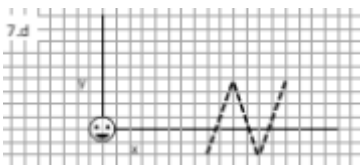
1.



1. 4 tijdstapjes
2. Teken het traject van het licht volgens onderzoeker B in de (x,y)-grafiek.



3. Zie figuur bij vraag 7.2-1



- 4.
5. Langer dan 4 tijdstapjes

Opdracht 7.4: reflectie

1. Als de relatieve snelheid toeneemt, wordt het tijdsverschil groter. Als de relatieve snelheid afneemt, wordt het tijdsverschil kleiner.
2. Dan verandert er niks. De afstand die het licht moet afleggen is dan nog steeds groter ten opzichte van de afstand bij stilstand.



Opdracht 7.5: Samenvatting

1. Ze kijken allebei naar stationaire lichtklokken.
2. Ze kijken allebei naar lichtklokken die ten opzichte van hen bewegen.
3. Als de onderzoeker die naar het tijdsinterval tussen twee gebeurtenissen kijkt die twee keer op dezelfde plek plaatsvinden Ze kijken allebei naar lichtklokken die ten opzichte van hen bewegen.
4. Als de onderzoeker die naar het tijdsinterval tussen twee gebeurtenissen kijkt die twee keer op een andere plek plaatsvinden.
5. Door na te gaan welke onderzoeker kijkt naar gebeurtenissen op dezelfde plek.

Opdracht 7.6: Beantwoorden lesvraag

1. De tijdsduur tussen twee gebeurtenissen hangt af van de onderzoeker. De onderzoeker die de tijd meet tussen twee gebeurtenissen op dezelfde plek meet een kortere tijd dan een onderzoeker die de tijd tussen dezelfde gebeurtenissen meet die op twee verschillende plekken ten opzichte van die onderzoeker gebeuren. Het verschil in gemeten tijdsduur hangt af van de relatieve snelheid tussen de twee onderzoekers.



8. Met welke formule kunnen we de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 1 uitdrukken in de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 2?

Opdracht 8.1

1. 4 tijdstapjes
2. 4,22 tijdstapjes

Opdracht 8.2

1. Kijkt naar eigen stelsel: Charles; kijkt naar bewegend stelsel: Hilde
2. Kijkt naar eigen stelsel: Lisa; kijkt naar bewegend stelsel: Klaas
3. Kijkt naar eigen stelsel: muon; kijkt naar bewegend stelsel: aarde

Opdracht 8.3

1.

$$\Delta t_b = 4,00 \text{ s}$$

$$v = 0,59 c$$

$$\Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_e$$

$$\Delta t_e = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \Delta t_b$$

$$\Delta t_e = \sqrt{1 - \frac{(0,59c)^2}{c^2}} \cdot 4,00$$

$$\Delta t_e = 3,23 \text{ s}$$

2.

$$\Delta t_e = 1,3 \text{ s}$$

$$v = 0,3 c$$

$$\Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_e$$

$$\Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,3 c)^2}{c^2}}} \cdot 1,3$$

$$\Delta t_b = 1,4 \text{ s}$$



3.

$$\Delta t_e = 2,10 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$v = 0,997 \text{ c}$$

$$\Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_e$$

$$\Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,997 \text{ c})^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_b = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

4.

$$\Delta t_e = 2,10 \cdot 10^{-6} \text{ s } v = 0,997 \text{ c}$$

$$s_e = v \cdot \Delta t_e$$

$$s_e = 0,997 \cdot 3,00 \cdot 10^8 \cdot 2,10 \cdot 10^{-6}$$

$$s_e = 6,28 \cdot 10^2 \text{ m}$$

5.

$$\Delta t_b = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ s } v = 0,997 \text{ c}$$

$$s_b = v \cdot \Delta t_b$$

$$s_b = 0,997 \cdot 3,00 \cdot 10^8 \cdot 2,71 \cdot 10^{-5}$$

$$s_b = 8,11 \cdot 10^3 \text{ m}$$

Opdracht 8.4: Beantwoorden lesvraag

$$1. \Delta t_b = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_e$$



9. Kan je nog bepalen of je beweegt?

Opdracht 9.1: Beantwoorden lesvraag

1. Er is geen meetprocedure waarmee bepaald kan worden of je in beweging bent of in rust. Dat betekent dat dit eigenlijk hetzelfde is: beweging kan je alleen bepalen ten opzichte van iets anders.