LIEVEN SCHEIRE

FYSICA

BOEIENDE STUKJES WETENSCHAP
ZOALS U ZE NOG NOOIT GESERVEERD KREEG

DEEL I: **RELATIVITEIT** 7

1.1 DE ONTDEKKING VAN DE CONSTANTE LICHTSNELHEID 13
1.2 DE PARADOXEN VAN DE RELATIVITEIT 20
1.3 DE ALGEMENE RELATIVITEITSTHEORIE 25

DEEL II: **DE ATOOMBOM** 29

2.1 KRITISCHE MASSA 33
2.2 DE GEVOLGEN VAN EEN KERNEXPLOSIE 38
2.3 MANHATTANPROJECT 40
2.4 KERNENERGIE 45
2.5 FUKUSHIMA 46
2.6 WAT IS RADIOACTIEF AFVAL? 48
2.7 STRALING 49
2.8 IONISERENDE STRALING 50
2.9 KERNFUSIE 52

DEEL III: **ANALOGE TECHNOLOGIE** 55

3.1 DE TELEFOON 59
3.2 LP'S EN CD'S 64
3.3 DE TELEVISIE 68
3.4 ELEKTRICITEIT 71
3.5 DE BLIKSEM 74

DEEL IV: **DE MICROGOLFOVEN** 79

4.1 WAAROM ALLEEN WATER 84
4.2 MICROGOLVEN 86
4.3 TOCH NIET ALLEEN WATER 89
4.4 DE MAGNETRON 90
4.5 DE UITVINDING VAN DE MICROGOLFOVEN 92
4.6 REGELBAAR VERMOGEN 93
4.7 HET GEVAAR VAN DE MICROGOLVEN 94
4.8 ANDERE ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN 97
4.9 FOTONEN 100

DEEL V: **MAAN, ZON EN RUIMTEKOLONIES** 105

5.1 MAANSVERDUISTERING 108
5.2 DE ACHTERKANT VAN DE MAAN 112
5.3 DE AMERIKAANSE LANDING OP DE MAAN, ECHT OF VALS? 116
5.4 LAGRANGEPUNTEN EN RUIMTEKOLONIES 119

DEEL VI: **METEORIETEN EN ZONNESTORMEN** 127

6.1 METEORIETINSLAGEN 130
6.2 DE ZONNESTORM 137
6.3 HET VERLOOP VAN EEN ZONNESTORM 139

DEEL VII: **MATEN EN GEWICHTEN** 143

7.1 UREN EN GRADEN 147
7.2 HET SCHRIKKELJAAR 152
7.3 DE SEIZOENEN 155
7.4 DE METER 157

DEEL VIII: **DE QUANTUMMECHANICA** 163

8.1 ELEKTRONEN 176
8.2 DE KAT VAN SCHRÖDINGER 185

DEEL IX: **TITAN** 193

9.1 DE EERSTE LANDING OP TITAN 198

DEEL X: **DE LICHTSNELHEID** 205

DEEL XI: **DE SNELHEID VAN DE LUCHT** 217

11.1 DE WIND ALS MASSABEWEGING 220
11.2 DE FYSICA VAN HETE SOEP 223
11.3 DE SNELHEID VAN GELUID 224
11.4 DE GELUIDSMUUR 226

DEEL XII: **DE SOLVAY-CONFERENTIES** 233

DEEL I

RELATIVITEIT

De relativiteitstheorie van Albert Einstein heeft de reputatie aartsmoeilijk en ondoorgrondelijk te zijn, maar de basisprincipes van de speciale relativiteitstheorie zijn dat eigenlijk niet. Die zijn voor iedereen gemakkelijk te begrijpen. Het grote probleem is dat ze compleet tegen onze intuïtie indruisen. Als je ze voor het eerst te horen krijgt, denk je meteen: dat kan niet! En toch is het zo. Dat is de eerste stap die je moet nemen om de speciale relativiteit te begrijpen: aanvaarden dat de fysische werkelijkheid soms heel anders werkt dan wat wij in ons dagelijks leven tegenkomen.

De basis van de speciale relativiteitstheorie valt samen te vatten in twee zinnen. Ben je er klaar voor? Hier komen ze:

1. Als je heel snel beweegt, gaat de tijd trager.

2. Als je heel snel beweegt, worden lengtes korter.

Voilà, dat was het.

Maar waarschijnlijk wil je iets meer uitleg. Om te begrijpen waar bovenstaande twee zinnen in godsnaam op slaan, zul je wel enkele nieuwe natuurkundige regels moeten aanvaarden. Regels waar je intuïtie zich behoorlijk tegen zal verzetten. Dat komt omdat ons aanvoelen van de werkelijkheid volledig gebaseerd is op wat wij meemaken als mens. We zijn in onze hele evolutie nooit in aanraking gekomen met snelheden van honderdduizenden kilometers per seconde, of met zwaartekrachtvelden als die van een zwart gat.

Nieuwe regels aanvaarden is dus moeilijk. Voor het eerst horen over de speciale relativiteitstheorie vergelijk ik graag met een voetbalteam dat plots op een rugbyveld terechtkomt en tegen een rugbyteam moet

spelen. Er zal grote consternatie ontstaan als de tegenstander plots met de handen aan de bal mag komen, als iemand brutaal tegen de grond wordt gewerkt zonder dat er wordt gefloten, of als een doelpunt wordt goedgekeurd als iemand óver de goal trapt. Je kunt dan ofwel heel kwaad worden, ofwel aanvaarden dat je nu op een rugbyveld staat, de regels aannemen, en meespelen. Dat geldt ook voor de regels van de relativiteitstheorie die ik straks zal uitleggen.

Maar laat ons eerst gewoon beginnen op ons natuurkundig voetbalveld, met de regels uit onze eigen leefwereld. Stel, je hebt een snelheidsmeter. Als je ergens stilstaat en er komt een auto voorbij met vijftig kilometer per uur, dan kun je dat daarmee meten. Maar wat als je zelf op een fiets zit en twintig kilometer per uur rijdt? Nu word je ingehaald door een auto die vijftig kilometer per uur rijdt en je meet zijn snelheid vanop je rijdende fiets. Wat zal er verschijnen op het scherm van de snelheidsmeter? Inderdaad, dertig kilometer per uur. Simpelweg het verschil tussen de snelheid van de auto en jouw snelheid op de fiets.

Het werkt ook in de andere richting: je fietst met twintig kilometer per uur, en een auto die vijftig kilometer per uur rijdt, kruist jou vanuit de tegenovergestelde richting. Welke snelheid zul je nu meten als je je meter op de auto richt? Zeventig kilometer per uur. In ons dagelijks leven kunnen we snelheden gewoon optellen en aftrekken. De oude vertrouwde regels van ons natuurkundig voetbalveld.

Maar stel nu dat we sneller reizen, met een raket bijvoorbeeld. En uit de andere richting komt geen auto of andere raket, maar licht. Licht verplaatst zich met een snelheid van driehonderdduizend kilometer per seconde (eigenlijk 299.792.458 meter per seconde om precies te zijn). Stel nu dat onze raket met een iets lagere snelheid vliegt, bijvoorbeeld tweehonderdduizend kilometer per seconde. Voor de duidelijkheid: dat is een technisch compleet onrealistische snelheid voor raketten, die gaan maximum rond de tien kilometer per seconde – dit is een gedachte-experiment. We vliegen dus met tweehonderdduizend kilometer per seconde en worden ingehaald door een lichtstraal die driehonderdduizend kilometer per seconde vliegt. Als ik nu vanuit mijn raket meet met welke snelheid dat licht mij passeert, wat meet ik dan?

Wat denk je, honderdduizend kilometer per seconde?

Dat is inderdaad wat je zou verwachten op basis van onze klassieke 'voetbalregels'. Maar als je het in werkelijkheid zou meten, zou het resultaat verrassend zijn: driehonderdduizend kilometer per seconde. Raar… of je nu stilstaat of heel snel meebeweegt met het licht, het blijft je passeren met diezelfde snelheid van driehonderdduizend kilometer per seconde.

Eventjes omgekeerd: we vliegen met tweehonderdduizend kilometer per seconde en een lichtstraal kruist ons vanuit de tegenovergestelde richting. We meten nu de snelheid waarmee het licht onze raket passeert. Wat denk je? Vijfhonderdduizend kilometer per seconde? Neen, dus. Ook hier zou je driehonderdduizend kilometer per seconde meten.

Of je nu heel snel naar het licht vliegt of meevliegt met het licht, het passeert je altijd en vanuit alle richtingen met dezelfde snelheid: driehonderdduizend kilometer per seconde.

De kans is groot dat jouw interne voetballer nu aan het protesteren is. Onmogelijk! Hands! Penalty! We staan nu op het natuurkundig rugbyplein van de speciale relativiteit. De regels zijn hier anders. Adem diep in en uit en aanvaard ze.

Nu geef ik grif toe dat gewoon 'aanvaarden' hier niet echt volstaat, want het lijkt ook gewoon niet te kloppen. Wiskundig komt het niet meer uit dat de snelheid van zo'n lichtstraal ten opzichte van jou hetzelfde blijft als je heel snel mee in dezelfde richting vliegt. Onze klassieke methode waarin we relatieve snelheden gewoon mochten optellen en aftrekken, werkt hier niet meer.

Dat hadden ze ook door op het einde van de 19e eeuw, toen deze eigenaardigheid van het licht werd ontdekt. Vele natuurkundigen braken zich het hoofd over dit gegeven, waaronder ook de jonge Albert Einstein.

In 1905 kwam hij met de oplossing: de speciale relativiteitstheorie. Waarom blijft de snelheid van het licht volgens hem gelijk, ook als je in dezelfde richting beweegt? Simpel: omdat bij hoge snelheden de tijd vertraagt en afstanden korter worden. Je meet snelheden, en dus ook de lichtsnelheid, in afstand per tijd: kilometer per seconde. Maar als de afstand en de tijd zelf veranderen, kan die driehonderdduizend kilometer per seconde dus mooi dezelfde blijven.

De kans is groot dat je nu stevig de wenkbrauwen fronst en moppert: 'Wat is dat nu weer voor een kermistrucje, tijd en snelheid aanpassen gewoon om de formules te doen kloppen?' Dat dachten velen met jou toen Einstein zijn theorie publiceerde. De meeste wetenschappers in zijn tijd geloofden er niets van. Meer zelfs: ze durfden hem er de Nobelprijs niet voor te geven, omdat ze dachten dat de theorie fout was. Hij kreeg de Nobelprijs voor een van zijn andere theorieën: het foto-elektrisch effect. Dat is het verschijnsel waarbij sommige metalen elektriciteit kunnen produceren als er licht op valt. De werking van zonnepanelen is hierop gebaseerd. Hoewel de relativiteitstheorie veel en veel belangrijker is dan deze theorie, durfden ze hem er dus geen Nobelprijs voor te geven omdat ze het nog niet geloofden.

In de voorbije honderd jaar is de relativiteitstheorie op honderden manieren getest en bevestigd. We kunnen er dus zo goed als zeker van zijn: hoe raar ook, deze theorie klopt.

DE ONTDEKKING VAN DE CONSTANTE LICHTSNELHEID

Licht is een golf die zich met een bepaalde snelheid voortbeweegt, zoals golven op een wateroppervlak of geluidsgolven in de lucht. Voor je kunt spreken over golven, moet er iets zijn dat golft, een drager. Zonder drager geen golven. In het luchtledige is er geen geluid omdat er geen lucht is die trilt.

Maar als je ervan uitgaat dat licht 'iets' is dat trilt, krijg je meteen een hoop tegenstrijdigheden. Het licht komt van de zon naar de aarde, door het luchtledige. Als er geen lucht is, zo dacht men vroeger, moet er iets anders zijn dat trilt. Stel: we hebben nog niet precies ontdekt wat, maar we gaan ervan uit dat het bestaat en noemen het 'de ether'. De ether moet een heel lichte materie zijn, lichter dan lucht, want de aarde beweegt zich er doorheen zonder wrijving of vertraging. Vreemd genoeg ondervindt ook de ether weinig last van de aarde die er doorheen passeert, geen draaikolk, geen werveling, niets. De ether blijft zodanig stilliggen, dat je niet anders kunt dan concluderen dat de ether bijzonder zwaar is.

De ether kan geen materie zijn zoals wij die kennen, zoveel is duidelijk. Is de ether dan misschien een soort 'ruitjespapier', een referentieraster waar we met de aarde doorheen bewegen zonder dat de materie er enige hinder van ondervindt, zoals je met een auto over een landsgrens of over de evenaar rijdt?

We weten dat de aarde rond de zon draait, dat de zon beweegt binnen onze Melkweg, en dat de Melkweg op zijn beurt ook niet stilstaat. Het enige wat echt stilstaat, dat moet dan wel de ether zijn. Vind een manier

om de snelheid van de aarde te meten ten opzichte van de ether, en je kent de exacte absolute snelheid van de aarde. Als je de beweging van de aarde ten opzichte van de ether kunt traceren, weet je precies welke weg de aarde aflegt in het heelal.

Dat is precies wat Albert Michelson en Edward Morley dachten in 1887. Met een experiment probeerden zij de objectieve beweging van de aarde te achterhalen, de beweging van de aarde ten opzichte van de ether. Stuur in twee richtingen een lichtstraal heen en terug, en kijk in welke richting het licht het snelst gaat. Michelson en Morley hadden één probleem: geen enkele chronometer was precies genoeg om het exacte moment vast te stellen waarop een lichtstraal ergens aankomt, laat staan om het tijdsverschil te meten tussen twee aankomende lichtstralen.

Daarvoor bedachten de twee een gloednieuw instrument: de interferometer. Dat is een toestel waarmee je lichtgolven kunt vergelijken. Als een lichtstraal in de ene richting sneller gaat dan in de andere, zullen de golven van beide lichtstralen een beetje verschoven zijn ten opzichte van elkaar. Dat is precies wat een interferometer zichtbaar kan maken.

Michelson en Morley ontdekten dat lichtstralen, in welke richting ze die ook uitstuurden, er altijd even lang over deden om terug te komen. Dat kon maar twee dingen betekenen. Ofwel stond de ether stil ten opzichte van de aarde, en was de aarde het enige vaste punt in het heelal, ofwel bestond er helemaal geen ether, maar was licht een golf zonder drager, met een constante snelheid.

Michelson en Morley beseften het nog niet, maar ze hadden net een van de belangrijkste mislukte experimenten uit de geschiedenis uitgevoerd. Dankzij hun onderzoek bestaat er nu een belangrijk toestel als de interferometer, en – wat nog veel belangrijker is – kwamen fysici op het spoor van een van de meest eigenaardige eigenschappen van de fysische werkelijkheid.

Intussen weten we dat ‘de ether’ niet bestaat. Er is geen ‘referentieraster’ in het heelal ten opzichte waarvan je een absolute snelheid hebt. Het enige wat bestaat zijn ‘relatieve’ snelheden: de snelheid van iets ten opzichte van een bepaald ander object. Vandaar de term ‘relativiteitstheorie’. De ether leeft wel nog voort in ons taalgebruik: ‘iets in de ether sturen’ betekent het uitzenden op radio of tv. Dat gebeurde vroeger immers via grote antennes die elektromagnetische ‘radiogolven’ uitstuurden, waarvan men dacht dat ze golfden in de ether.

Even terug naar die lichtsnelheid die constant blijft, ook al beweeg je er erg snel naartoe. Onze rekensommetjes uit het dagelijks leven, waarbij we gewoon snelheden kunnen optellen en aftrekken, kunnen we nu niet meer gebruiken. Om dat op te lossen gebruikte Einstein de wiskunde van Hendrik Lorentz, een Nederlandse natuurkundige. Met de lorentztransformaties kun je berekenen hoeveel tijd en ruimte precies veranderen als je met grote snelheid beweegt.

Op de volgende pagina staan de formules voor de lorentztransformaties. Wie ‘wiskundofobie’ heeft, mag ze gewoon overslaan. Wiskundofobie is een ongevaarlijke aandoening waarbij mensen in stand-by gaan vanaf het moment dat er ergens een formule verschijnt. Er speelt dan een wachtmuziekje in hun hoofd tot er weer gewone woorden verschijnen. Maak je geen zorgen, dit is op zich een erg eenvoudige formule waar gemakkelijk mee te rekenen valt. Je moet altijd denken: de formule is banger van mij, dan ik van de formule.

Trouwens, een wiskundige formule is een prachtig iets. Ik denk dat een formule het dichtst bij het concept ‘toverspreuk’ komt dat je in deze werkelijkheid kunt geraken: een reeks mysterieuze tekens, onleesbaar voor niet-ingewijden, die als je ze kent kennis en mogelijkheden kan verschaffen die anderen niet hebben.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad t' = \gamma \cdot t \qquad L' = \frac{1}{\gamma} \cdot L$$

v is de snelheid die we hebben ten opzichte van het andere object

c is de lichtsnelheid: 299.792.458 m/s

γ is de lorentzfactor, het getal waarmee tijden en afstanden veranderen voor het object dat beweegt met de snelheid die je in de formule invult.

De nieuwe lengte wordt een factor 1/γ korter, en de nieuwe tijd gaat een factor γ trager.

Als een voorwerp beweegt met een bepaalde snelheid ten opzichte van ons, dan kunnen we die snelheid invullen in de formule die hierboven staat, de formule van de lorentzfactor. Met die formule kunnen we achterhalen hoeveel trager de tijd gaat voor het bewegende voorwerp.

Stel dat een raket aan jou voorbijvliegt met de helft van de lichtsnelheid, dan bedraagt de lorentzfactor 1,15. Dat wil zeggen dat, als jij de klok in de voorbijvliegende raket 1 seconde ziet verder tikken, er voor jou 1,15 seconden voorbij zijn gegaan. Vliegt de raket met 0,87 keer de lichtsnelheid (ongeveer 260.000 km/s), dan is de lorentzfactor 2. Vliegt ze met 0,99 keer de lichtsnelheid, dan is hij al 7,09.

Wat betekent dat nu concreet? Stel dat iemand een ruimtereis maakt met een raket die met 0,99 keer de lichtsnelheid vliegt, terwijl de rest van de wereldbevolking gewoon op aarde blijft. Als die persoon vier jaar rondvliegt en dan terug op de aarde landt, zal hij merken dat er op aarde intussen een periode van dertig jaar is verstreken. Iedereen is hier dus dertig jaar ouder geworden, terwijl de persoon in de raket nauwelijks is veranderd.

Dat klinkt al erg vreemd, maar er is nog meer. Een ander gevolg van de relativiteitstheorie is dat voorwerpen die snel bewegen, korter worden. Hoe sneller iets beweegt, hoe korter het wordt ten opzichte van de waarnemer. Een raket die met 0,87 keer de lichtsnelheid voorbijvliegt, is de helft korter dan wanneer ze gewoon naast de waarnemer stil op de grond zou liggen. Ook dat kun je berekenen met de lorentzformule. Het is niet zo dat die raket in elkaar wordt gefrommeld. Mocht je in de raket zitten en meevliegen, dan merk je helemaal niets en blijft de lengte van de raket hetzelfde voor jou. Maar als je stilstaat en de raket passeert je, dan is hij maar half zo lang. Dat is geen gezichtsbedrog, maar een eigenschap van de ruimte. Het is echt zo. Belangrijk om weten is ook dat de raket korter is, omdat de ruimte zelf korter is. Wie in de raket zit, verkort mee en merkt dus geen enkel verschil.

Bon, er wordt wel eens gezegd dat mannen die te snel rijden met hun patserauto kortere piemels hebben. Volgens de relativiteitstheorie blijkt dat alvast te kloppen.

Je zou ook kunnen concluderen dat een ruimtereis het ideale valentijns-geschenk is voor getrouwde koppels: je partner wordt dunner, blijft langer jong, en je bent ze ook gewoon dertig jaar kwijt.

BEWEGEN MET LICHTSNELHEID

Hoe dichter de snelheid van een voorwerp de lichtsnelheid benadert, hoe groter de lorentzfactor wordt. Als je de lichtsnelheid zelf invult in de formule, wordt de factor zelfs oneindig. Daardoor kan geen enkel voorwerp met massa de lichtsnelheid bereiken. Als je al een bepaalde snelheid hebt, wordt de benodigde energie om nóg sneller te kunnen gaan steeds groter naarmate je dichter bij de lichtsnelheid komt. Om de lichtsnelheid te kunnen bereiken, is de nodige energie letterlijk 'oneindig'.

Deeltjes zonder massa kunnen wel aan de lichtsnelheid bewegen. Meer zelfs: ze kunnen niet anders. Fotonen hebben geen massa, dus licht gaat altijd met de lichtsnelheid.

Voor het gemak zijn we uitgegaan van twee verschillende werelden: de wereld die wij kennen, en een wereld waarin snelheden van honderdvijftigduizend kilometer per seconde geen uitzondering zijn. De ene wereld vergeleken we met een voetbalveld, waarin wij als voetballers perfect weten wat we moeten verwachten. Die andere wereld met de 'relativistische snelheden' was dan het rugbyveld, waar we toch even moeten wennen aan de nieuwe regels. Maar er zijn eigenlijk geen twee werelden.

De relativiteitstheorie geldt niet alleen bij zeer hoge snelheden, maar ook bij snelheden die wij gewoon zijn, zoals bijvoorbeeld: vijftig kilometer per uur. Het enige verschil is dat als een auto een fietser inhaalt, de gebruikte snelheden zodanig klein zijn (in vergelijking met de lichtsnelheid), dat de lorentzfactor die je met dat snelheidsverschil bekomt, heel dicht bij 1 ligt. Vul zelf maar eens vijftig kilometer per uur in (0,014 kilometer per seconde) en bereken γ. Dat is zo goed als 1. Dus, gaat de tijd trager als je in een vliegtuig met negenhonderd kilometer per uur vliegt? Ja. Maar zo onmerkbaar weinig dat je er nooit iets van voelt. Een atoomklok echter, die miljardsten van een seconde kan meten, merkt het wel. In 1971 werden in het Hafele-Keating-experiment verschillende atoomklokken met vliegtuigen rond de wereld gevlogen, en daarna vergeleken met atoomklokken die ter plaatse waren gebleven. Wat bleek? Er was effectief een tijdsverschil tussen de klokken, en dat kwam perfect overeen met het voorspelde tijdsverschil door de relativiteitstheorie.

Einstein was geniaal. Hij was 26 jaar oud toen hij dit alles bedacht: vier briljante theorieën in vier takken van de fysica, terwijl hij niet eens een positie had aan een universiteit. Hij had gewoon een bureaujob in een patentenbureau. Gelukkig woonde hij samen met een briljante wiskundige en natuurkundige: zijn eerste vrouw Mileva Marić, met wie hij zijn theorieën kon bespreken en uitwerken.

DE LICHTSNELHEID: C

De lichtsnelheid is dus 299.792.458 meter per seconde. In de natuurkunde schrijven we dat met de letter c. Als je in een natuurkundige formule die c ziet staan, staat die voor 299.792.458 meter per seconde. Bijvoorbeeld in $E = mc^2$.

Maar eigenlijk is deze natuurkundige grootheid veel belangrijker dan enkel de snelheid van het licht. Je zou kunnen zeggen dat c de maximum toegelaten snelheid is in het heelal, niet enkel voor materie maar ook voor kracht, energie... Eigenlijk is het de maximum toegelaten snelheid voor gelijk welke invloed.

De gevolgen van een gebeurtenis kunnen zich maximum met de snelheid c verspreiden doorheen het heelal. Licht is zo een gevolg. Als je op een bepaalde plek een lamp aansteekt, is het licht dat je ziet op een andere plek een gevolg daarvan. Die 'invloed' reist dus door het heelal met de snelheid c. Maar dat geldt bijvoorbeeld ook voor zwaartekracht.

De aarde staat op acht lichtminuten van de zon. Het licht van de zon doet er acht minuten over om tot bij ons te geraken. Maar ook de zwaartekracht van de zon doet er acht minuten over. Stel dat de zon op dit moment plotseling zou verdwijnen, dan zal de aarde nog acht minuten in haar baan om de zon blijven, en pas daarna rechtdoor beginnen vliegen.

De term 'lichtsnelheid' is dus eigenlijk te specifiek voor zo'n algemeen geldende maximumsnelheid. Alsof je de snelheidslimiet in de bebouwde kom de 'Ford Fiesta-snelheid' zou noemen, terwijl ze ook voor alle andere auto's geldt.

1.2 DE PARADOXEN VAN DE RELATIVITEIT

Als je in bepaalde situaties de regels van de relativiteitstheorie wilt toepassen, kom je soms een schijnbare tegenspraak tegen; iets dat eigenlijk niet lijkt te kunnen. We noemen dat een 'paradox van de relativiteitstheorie'. Deze paradoxen zijn geen 'fouten in de theorie'. Ze tonen namelijk niet aan dat de theorie zichzelf tegenspreekt, maar wel dat de relativiteitstheorie gevolgen heeft die in tegenspraak zijn met wat we intuïtief als 'logisch' ervaren.

DE RAKET IN DE SCHUUR

Stel dat je een raket hebt van twaalf meter lang die kan versnellen tot 0,87 keer de lichtsnelheid (ongeveer 260.000 km/s). Met die snelheid is de lorentzfactor 2, dus afstanden die met die snelheid bewegen ten opzichte van ons zijn maar half zo lang.

Je hebt ook een schuur van tien meter lang, met vooraan en achteraan een grote poort. Als de poorten open staan, kun je met de raket door de schuur vliegen. Er is nog iets bijzonders aan deze poorten: als je op een knop duwt, gaan ze gedurende één miljardste van een seconde dicht, en daarna direct weer open.

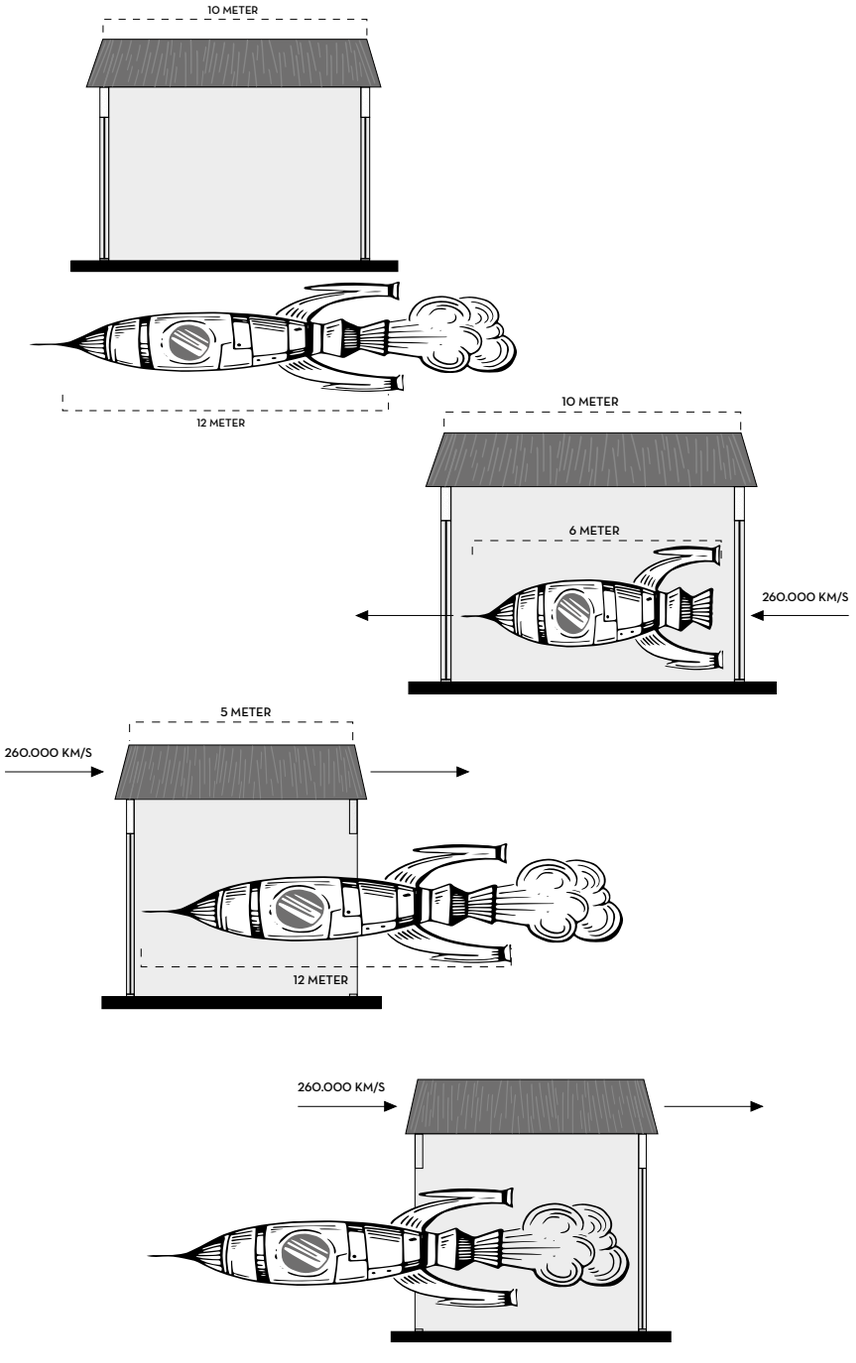
We vragen aan een testpiloot om met de raket door de open poorten van de schuur te vliegen, met tweehonderdzestigduizend kilometer per seconde. Als wij naast de schuur staan, is die raket voor ons korter geworden, door de regels van de relativiteitstheorie. Voor ons is hij maar zes meter lang. Dat wil zeggen dat er vanuit ons standpunt een moment

is dat de raket geheel in de schuur past. Als we op dat moment op de knop duwen, hebben we dus gedurende een miljardste van een seconde een raket van twaalf meter lang opgesloten in een schuur van tien meter lang. Dat is bizar, maar het is nog geen paradox.

Laat ons diezelfde situatie eens bekijken vanuit de ogen van de piloot. Hij zit stil ten opzichte van de raket, dus die blijft voor hem twaalf meter lang. Maar voor hem komt de schuur voorbijgeraasd met tweehonderdzestigduizend kilometer per seconde. Voor de piloot is de schuur dus geen tien meter lang, maar… vijf meter lang. Dat is gek, want wij hebben op een knop geduwd, en dan zijn die poorten dicht- en opengegaan met de raket midden in de schuur. Vanuit het standpunt van de piloot lijkt dit niet te kunnen.

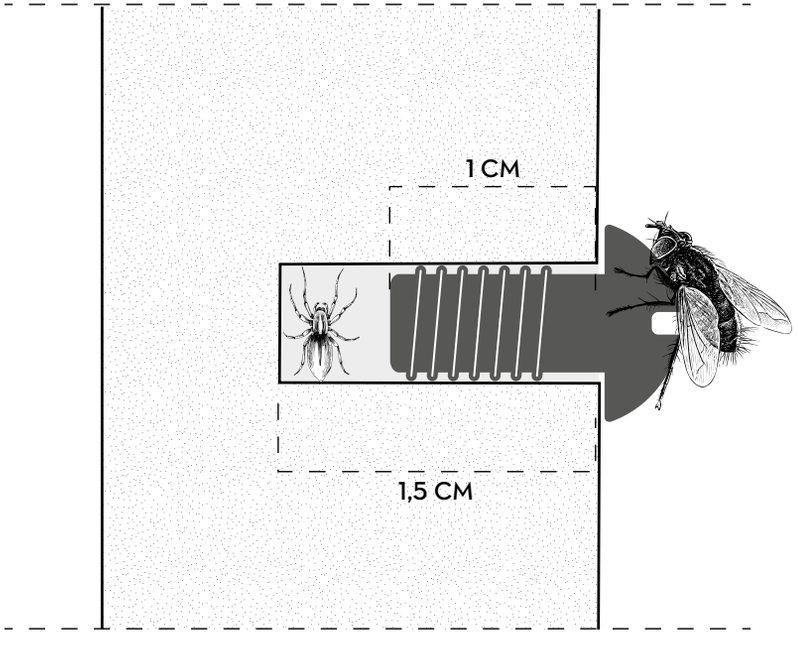
De oplossing voor deze paradox? Eigenlijk zijn we nog een derde effect van de relativiteitstheorie vergeten vermelden, naast de tragere tijd en kortere lengtes: dingen die gelijktijdig gebeuren voor iemand die stilstaat, gebeuren niet gelijktijdig voor iemand die heel snel beweegt. Voor ons waren de beide poorten tegelijkertijd dicht, voor de piloot niet. Die zag de voorste poort dichtgaan net voor hij erdoor ging, en even later pas de achterste poort wanneer hij er net door was, en de kop van de raket al een eindje uit de voorste poort stak.

Daarom heet het 'relativiteit'; je moet alles bekijken relatief ten opzichte van de waarnemer.



DE SPIN EN DE VLIEG

In een muur zit een gaatje en daarin leeft een spin. Het gaatje is anderhalve centimeter diep. We hebben ook een spijkertje dat precies in het gaatje past, tot op een diepte van een centimeter. Verder geraakt het niet, want het eindigt op een kopje dat breder is dan het gaatje. De spin zit in de laatste halve centimeter van het gaatje, en heeft dus geen last van het spijkertje. Nu komt er een vlieg voorbij met een snood plan: ze wil de spin pletten. Dat lijkt niet te lukken met het spijkertje, want het geraakt niet diep genoeg in het gaatje.



Maar wat als de vlieg een aanloop neemt, en samen met het spijkertje naar de muur vliegt met tweehonderdzestigduizend kilometer per seconde? Ten opzichte van de vlieg is het gaatje nu geen anderhalve centimeter diep meer, maar slechts 0,75 centimeter! Hoera, denkt de vlieg, die spin gaat eraan. Maar wat ziet de spin? Die ziet een vlieg en een spijkertje op zich afkomen. Die bewegen zo snel dat ze voor de spin korter

geworden zijn. Het spijkertje is voor de spin niet één, maar slechts een halve centimeter lang. Ha, denkt de spin, mij kan niets gebeuren in mijn gaatje van anderhalve centimeter diep.

Alweer: een schijnbare paradox. Wordt de spin nu verpletterd of niet? Achteraf kan ze niet zowel dood als levend zijn. Dat mag enkel in de quantummechanica, en dat is voor een volgend hoofdstuk.

Het antwoord: de spin is dood. Vanuit het oogpunt van de vlieg was dat al zo. Maar wat gebeurt er vanuit het oogpunt van de spin? De vlieg gaat met de spijker richting het gaatje tot de kop van de spijker de zijkant raakt. Dat is het signaal voor de spijker om te stoppen met vliegen. Maar dat signaal, die 'invloed', kan maar met de snelheid van het licht doorgegeven worden aan de rest van de spijker. En die vliegt zelf al met 87 procent van de lichtsnelheid. Dus vooraleer de 'invloed' van de kop van de spijker het uiteinde van de spijker heeft ingehaald, heeft die genoeg tijd gehad om toch nog tot de bodem van het gaatje te geraken en de spin te verpletteren.

En eigenlijk gebeurt er nog meer: vanuit tweehonderdzestigduizend kilometer per seconde tot stilstand komen is een gigantische afremming. Bij heel grote versnelling (en dus ook afremmen, wat een 'negatieve versnelling' is) treedt er een nieuwe relativiteitstheorie in werking: de algemene relativiteitstheorie, die Einstein publiceerde in 1916.

1.3 DE ALGEMENE RELATIVITEITSTHEORIE

De speciale relativiteitstheorie gaat over de dingen die gebeuren als je met hoge snelheid beweegt ten opzichte van elkaar, duizenden tot honderdduizenden kilometer per seconde. Ze werd door Einstein gepubliceerd in 1905. Ze gaat ervan uit dat we geen onderscheid kunnen maken tussen beweging en rust: als ik beweeg ten opzichte van jou, kun jij evengoed zeggen dat jij beweegt en ik stilsta. Alles beweegt 'relatief' ten opzichte van elkaar, er is geen absoluut nulpunt. Het enige wat wel vastligt, is de constante snelheid van het licht in vacuüm, die hetzelfde is voor alle waarnemers.

In 1916 publiceerde Einstein echter nog een relativiteitstheorie: de algemene relativiteitstheorie. Hier gaat het niet enkel over hoge snelheden, maar ook over versnelling, dus verandering van snelheid, en over grote zwaartekracht. Bij versnelling en zwaartekracht treden er nog hele andere effecten op, zoals kromming van de ruimte. Bij grote versnelling en grote zwaartekracht gaat de tijd ook trager. Aan de rand van een zwart gat is de zwaartekracht zodanig groot dat de tijd er stilstaat.

De algemene relativiteit is wiskundig een stuk ingewikkelder dan de speciale, dus ze past helaas niet in dit boekje. Maar we krijgen er wel dagelijks mee te maken: de gps-satellieten die rond de aarde draaien, voelen op die hoogte een lagere zwaartekracht dan wij hier op aarde. Het gevolg is dat voor deze klokken de tijd sneller loopt. Het verschil is heel erg klein, maar de elektronica van gps-systemen rekent zodanig snel dat ze er wel last van hebben. De klok van een gps-satelliet wordt constant bijgesteld volgens de regels van de algemene relativiteit, anders zou het gps in onze auto of op onze telefoon ons vele kilometers verkeerd lokaliseren.