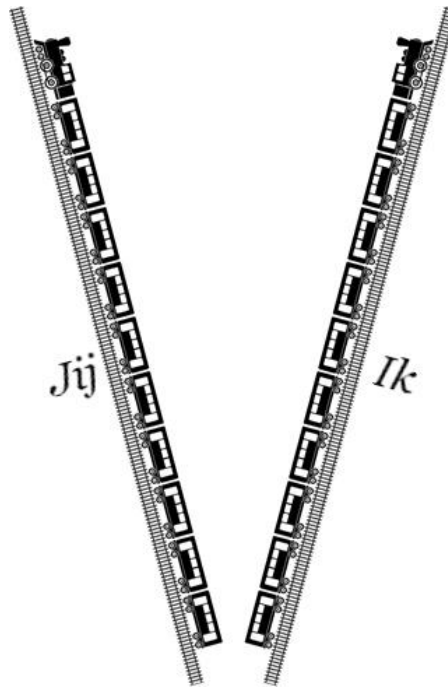


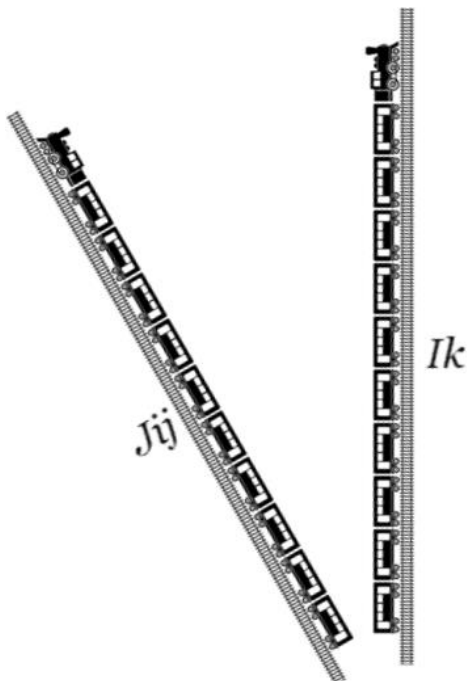
Inleiding

Op 't spoor

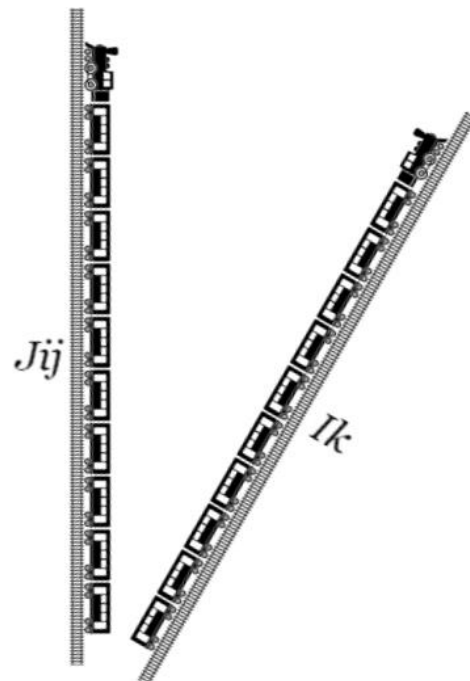
Stel dat er twee spoorlijnen zijn die scheef uit elkaar lopen en dat op elke spoorlijn een trein rijdt. Die twee treinen zijn even lang en ze rijden met dezelfde *snelheid*. Uiteraard zitten wij elk in één van die treinen en we kunnen gewoon met elkaar communiceren.



Natuurlijk zeg ik dan dat jij scheef rijdt:



terwijl jij zult zeggen dat ik scheef rijd:



en we zeggen allebei dat we zélf precies recht vooruit rijden,
waarbij we allebei ook nog eens een keertje helemaal gelijk hebben.

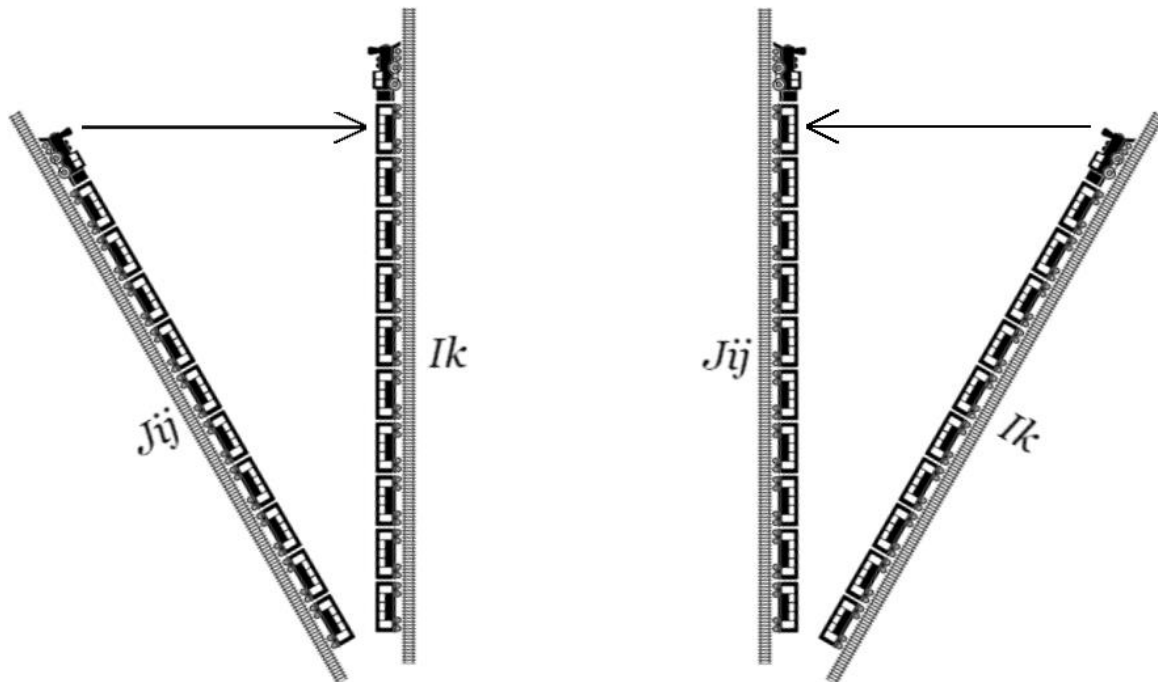
De ánder rijdt scheef!

Veronderstel nu eens dat wij om een of andere reden (die op zichzelf niet belangrijk is) absoluut níét kunnen zien dat we scheef rijden. Maar we rijden wel degelijk scheef. Het is dus *onzichtbare scheefheid*. We zien niet dat het scheef is, maar dat is het wel.

En je weet toch wel dat je, als je bijvoorbeeld een scheve stok wilt tekenen, een korter lijntje moet zetten? Als je ergens scheef tegenaan kijkt is het korter. Met onze treinen is dat natuurlijk precies net zo. We kunnen weliswaar niet zién dat we schééf rijden,

maar volgens míj is jóúw trein korter dan de mijne:

en volgens jóú is míjn trein korter dan de jouwe:



We gebruiken allebei onze eigen trein als liniaal in de *preciesrechtvooruitrichting* en meten allebei dat de ándere trein korter is dan de éígen trein!

En natuurlijk is volgens míj jouw hele spoorlijn korter dan de mijne, terwijl dat volgens jóú precies andersom is. Dus als jíj na enige *tijd* zegt: *Zo, al weer een kilometer*, dan zal ík zeggen dat dat niet waar is en dat jij minder hebt gereden in die betreffende *tijd*. Oftewel: volgens míj rijdt jóúw trein langzamer dan de míjne. En op precies dezelfde manier zul jíj zeggen dat míjn trein langzamer rijdt dan de jóúwe. In de éígen *preciesrechtvooruitrichting* gemeten rijdt de ándere trein langzamer. En doordat de *scheefheid* onzichtbaar is, is dat voor ons allebei de échte *snelheid* van de andere trein.

Deze *onzichtbare treinscheefheid* waarbij we zélf precies recht vooruit rijden noem ik:

treindilatatie:

onzichtbare treinscheefheid waardoor de ándere trein korter is en langzamer rijdt.

Relativiteit

Quid est ergo tempus?

Si nemo ex me quærat, scio; si quærenti explicare velim, nescio.

Wat is eigenlijk tijd?

Als niemand het me vraagt, weet ik het; maar als ik het wil uitleggen, weet ik het niet.

(Aurelius Augustinus Hipponensis, AD354-430, Confessiones 11.14.17)

Time is what keeps everything from happening at once.

(uit: *The Time Professor* van Ray Cummings, 1921)

Tijd manifesteert zich door de opeenvolging van *gebeurtenissen*. We méten *tijd* door het tellen van aaneengesloten opeenvolgende *gebeurtenissen* waarvan we veronderstellen dat die allemaal even lang duren (bijv. *aardasomwentelingen*). Zo'n *gebeurtenis* is dan een *tijdeenheid*. Op deze manier kunnen we een *gebeurtenis* verder onderverdelen in *subgebeurtenissen* (bijv. *klokwijzeromwentelingen*) en zo'n *subgebeurtenis* is dan een kleinere *tijdeenheid*. En dat kunnen we steeds herhalen. Als we een (*sub*)*gebeurtenis* niet verder detailleren beschouwen we hem als een *fundamentele tijdeenheid*.

eenheid	aantal	subeenheid	
<i>week</i>	7	<i>etmaal</i>	(aardasomwenteling)
<i>etmaal</i>	2	" <i>dacht</i> "	(kleinewijzeromwenteling)
" <i>dacht</i> "	12	<i>uur</i>	(grotewijzeromwenteling)
<i>uur</i>	60	<i>minuut</i>	(secondewijzeromwenteling)
<i>minuut</i>	60	<i>seconde</i>	(serie "atoomtikken")
<i>seconde</i>	9 192 631 770	" <i>atoomtik</i> "	(fundamenteel)
" <i>atoomtik</i> "	1	<i>periode van de straling die overeenkomt met de overgang tussen de twee hyperfijn niveaus van de grondtoestand van het caesium-133 atoom. Dit is de officiële definitie volgens het S.I. en deze periode beschouwen we als heel erg fundamenteel van telkens dezelfde duur.</i>	

En nou weten we nog steeds niet wat *tijd* nou eigenlijk precies is. En eh, wat is *afstand* eigenlijk? We méten die op soortgelijke wijze d.m.v. *dingen* i.p.v. *gebeurtenissen*. Maar wat het is? Zou *afstand* wel bestaan als we die op geen enkele manier zouden kunnen meten? Volgens René Descartes zou er zelfs geen *ruimte* zijn als er geen *dingen* waren. En *snelheid* is *afstand* gedeeld door *tijd*, dus weten we ook helemaal niet wat *snelheid* nou eigenlijk precies is. Ai, alweer een illusie armer...

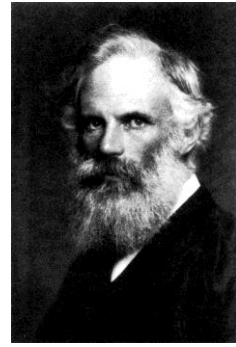
Lichtsnelheid

In 1881 werd een vreemde ontdekking gedaan betreffende de *lichtsnelheid* en in 1887 werd dat experiment (de proef van Michelson en Morley) veel nauwkeuriger herhaald. Wat die ontdekking precies was is nu even niet relevant, maar feit is dat men het niet begreep. Men ging op zoek naar een verklaring. Men zocht als het ware de weg er naartoe. En die vond men niet.

Maar de Ierse fysicus George Francis FitzGerald alsmede prof. Hendrik Antoon Lorentz (één der Nederlandse Nobelprijswinnaars) vonden onafhankelijk van elkaar (in 1889 resp. 1892) wel het allerlaatste stukje van die weg. Het móést wel zus of zo zijn anders zou het niet kunnen wat er was ontdekt. Wát ze hadden gevonden komt straks pas.



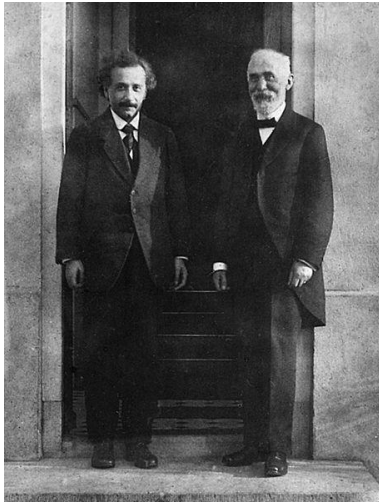
Hendrik Antoon Lorentz



George Francis FitzGerald

Einstein

En in 1905 kwam er ene Albert Einstein ten tonele, op de foto staat hij samen met prof. Lorentz. En Einstein dacht er verstandig aan te doen om zich niet in dat moeras te begeven waar die onvindbare toegangsweg zou moeten liggen. En dat was inderdaad verstandig.



Die vreemde ontdekking betreffende de *lichtsnelheid* is nu eenmaal een feit en feiten liegen niet. Einstein ging dat als uitgangspunt gebruiken. Hij vroeg dus niet: *Hoe komt dat?* maar: *Wat betekent het?* En met die vraag zette hij zijn brein aan het werk.

En het heeft hem vervolgens vele hoofdbrekens gekost om tot een heel belangrijk besef te komen. Namelijk het besef dat dé *tijd* (let op de nadrukkelijk beklemtoonde accentuering van het woord dé) niet bestaat.

Hè? Nee! Ja! Het universum heeft géén "masterklok". Het is níét zo dat er één absolute universele grootheid bestaat die we als dé *tijd* kunnen beschouwen. In plaats daarvan heeft élk ding zijn éígen *tijd*. Ook jij en ik. Wij hebben allebei onze eigen *tijd*. *Tijd* is dus niet absoluut, maar relatief. We móéten voortaan praten in termen van jóúw *tijd* en míjn *tijd*. En dus niet meer dé *tijd*.

Tijd is relatief. Jóúw tijd, míjn tijd. Niet dé tijd.

En in het dagelijks leven hier op aarde lopen jouw en mijn *tijd* gewoon keurig mooi gelijk, dus we merken er normaal gesproken helemaal niets van dat we elk onze eigen *tijd* hebben.

Voor het verdere begrip is het belangrijk dat je dit goed tot je neemt. ~~Dé~~ *tijd*. Jóúw tijd, míjn tijd!

Richting

Heb jij ook het idee dat *tijd* op de één of andere manier een *richting* heeft? Alleen kunnen we die *richting* niet aanwijzen, hij is onzichtbaar. Maar we gaan wel ergens naar toe, toch?

En nu lopen jouw en mijn *tijd* doodgewoon in dezelfde (onzichtbare) *richting*, dus hebben wij een identieke tijdbeleving. Alsof we een gezamenlijke *tijd* hebben. En die noemen we dé *tijd*. Maar dat is gezichtsbedrog. We hebben feitelijk elk onze eigen *tijd* en die lopen gewoon gelijk.

Wel net zo en evenveel maar níét hetzelfde.

Als de weerlicht

Een bliksemschicht gaat met pakweg de helft of driekwart van de *lichtsnelheid*. Laten wij dat ook eens gaan doen. We passeren elkaar met een dergelijke ontzaglijke *snelheid*. Alle flitspalen slaan op tilt. En in gedachten verlaten we de aarde, we vliegen elk in ons eigen raketje door de ruimte. Van míj uit gezien zit ik gewoon stil in mijn raketje en jíj komt gierend hard voorbij. Vanuit jóúw perspectief zit jij zelf gewoon stil in jouw raketje en kom ík met diezelfde *snelheid* voorbij. Het moge duidelijk zijn dat we volkomen gelijkwaardige waarnemers zijn en allebei, vanuit ons eigen perspectief, evenveel gelijk hebben.

En nou gaat er bij die ontzaglijk grote *snelheid* die we in het dagelijks leven natuurlijk nooit zullen meemaken iets gebeuren waar je waarschijnlijk nog nooit van gehoord hebt. Jouw en mijn *tijd* gaan op een of andere manier scheef uit elkaar lopen! En hoe groter onze onderlinge *snelheid* is, hoe schever dat zal zijn. En me dunkt dat dat *onzichtbare scheefheid* is. Maar als ik vanuit míjn *tijd* scheef tegen jóúw *tijd* aankijk zie ik jóúw *tijd* langzamer gaan! En als jíj vanuit jóúw *tijd* scheef tegen míjn *tijd* aankijkt zie jíj míjn *tijd* langzamer gaan! We zien allebei dat de ándere *tijd* langzamer gaat dan de éígen *tijd*! Dit verschijnsel heet

tijddilatatie:

onzichtbare tijdscheefheid waardoor de ándere tijd langzamer gaat.

Tijddilatatie: in de eigen tijd gemeten zie je de andere tijd langzamer gaan.

Treindilatatie: in de eigen trein gezeten zie je de andere trein langzamer gaan.

Tweelingparadox

Je kunt bedenken dat dit bij een tweede ontmoeting tegenstrijdig wordt: de tweeling Jantje en Miepje wordt bij de geboorte gescheiden en Miepje gaat op reis met zeer grote *snelheid* zodat Jantje bij haar alles langzamer ziet gaan, bijvoorbeeld in het halve tempo. Als Jantje twintig is komt Miepje terug en zij is dan dus slechts tien. Maar vanuit háár perspectief was Jántje toch op reis en ging zíjn *tijd* in het halve tempo? Hij is dan volgens Miepje bij haar terugkomst toch pas vijf? En Jantje kan natuurlijk niet zowel twintig als vijf zijn. Dit staat bekend als de *tweelingparadox*. Uiteraard gaf Einstein daar wel degelijk een oplossing voor (de asymmetrie ontstaat doordat alleen Miepje versnelt en afremt), maar daar ga ik het nu nog niet over hebben.

We beperken ons voorlopig tot de situatie van constante *snelheid*. Dan zijn zowel de waarde als de richting van de *snelheid* onveranderlijk en dan ontmoeten we elkaar dus hooguit één keer.

Resumé

Dé *tijd* bestaat niet; in plaats daarvan hebben wij elk onze eigen *tijd*. *Tijd* is relatief. In het dagelijks leven merken we daar niets van, maar als we elkaar met hééél grote *snelheid* passeren gaan jouw en mijn *tijd* ten opzichte van elkaar *onzichtbaar scheef* lopen. Daardoor zie we állebei dat bij de ánder álles langzamer gaat. Dat heet **tijddilatatie** en dat is het allerbelangrijkste aspect van Einsteins relativiteitstheorie. En hoe groter onze onderlinge *snelheid*, hoe groter de **tijddilatatie**, de *onzichtbare tijdscheefheid*.

Stel dat er een heks hééél snel voorbij komt vliegen, dan zie ik háár *tijd* langzamer gaan dan de mijne, dus in míjn *tijd* zie ik álle processen bij haar langzamer verlopen. Klok, hartslag, spijsvertering, etc.

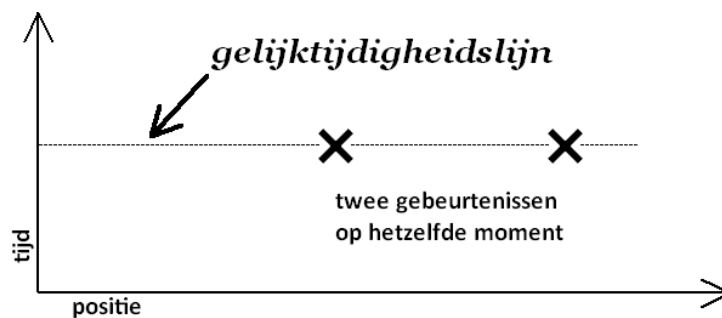
Een snelle heks is langzaam.

Wat houdt dat nou in?

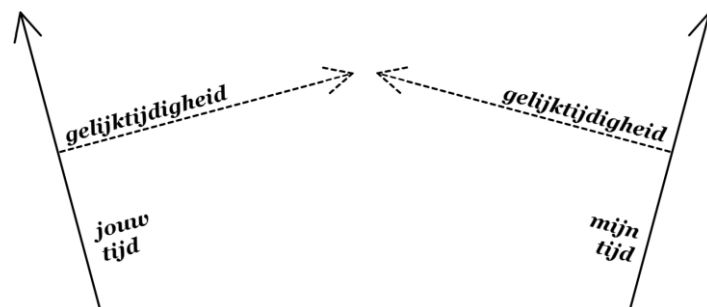
Hoe zou je nou die **tijddilatatie** ervaren? Wel, het begint zich voor onze zintuigen te manifesteren boven pakweg 10% van de *lichtsnelheid* en die noem ik c , van het Latijnse *celeritas* = *snelheid*. Onze onderlinge snelheid noem ik v , van het Latijnse *velocitas* = *snelheid*. Bij $v = \frac{1}{4}c$ zien we bij elkaar een zogeheten *tijdrek* van ca. 3%. Bij $v = \frac{1}{2}c$ is dat ruim 15%. Bij $v = \frac{3}{4}c$ is het een factor anderhalf, bij $v = 87\%c$ een factor 2 en bij $v = 97\%c$ een factor 4. Hoe dichter v bij c ligt, hoe langzamer we bij elkander alle processen zien verlopen, en bij precies $v = c$ staat in míjn *tijd* gemeten bij jóú alles stil. Daar heb jij overigens niets van in de gaten. Jij ziet bij míj alles langzamer gaan, en bij $v = c$ zelfs stilstaan. Het scenario is immers volkomen symmetrisch tussen jou en mij.

Tegelijk?

Uit de volgende afbeelding blijkt dat *gelijktijdigheid* als het ware loodrecht op de *tijd* staat:



En als er nou sprake is van **tijddilatatie** doordat wij elkaar met hééél grote *snelheid* passeren gaan jouw en mijn *tijd* dus *onzichtbaar scheef* lopen:



En dus vallen jóúw en míjn *gelijktijdigheid* nu ook niet meer samen! Wij zijn het niet meer eens over het al dan niet tegelijkertijd plaatsvinden van twee gebeurtenissen. En ook dát effect neemt toe met v . Het is immers een direct gevolg van de **tijddilatatie**. En ditzelfde geldt natuurlijk ook voor die voorbijrazende heks. We zijn het niet eens over *gelijktijdigheid* en we hebben allebei gelijk. Elk in onze eigen *tijd* gemeten.

Bezemplengte

Nou wil ik, terwijl de heks voorbij raast, weten hoe lang haar bezem is. Ik heb een klok en een liniaal ter beschikking die beide níét met de heks meebewegen. Daarmee kan ik meten welke *afstand* zij in een bepaalde *tijd* aflegt, dus ik weet haar *snelheid*. En ik kan ook op een vaste positie klokken hoeveel *tijd* er zit tussen de passages van het voor- en achtereinde van haar bezem, dus kan ik de *bezemplengte* bepalen. Maar dan zegt de heks dat mijn meting niet deugt. Dankzij de **tijddilatatie** zegt zij dat mijn klok verkeerd loopt, dus ik meet niet dezelfde *bezemplengte* als zij. Maar zelf zit ze op dat ding dus meet ze vast wel de goede *lengte*. Omdat die bezem ten opzichte van haar in rust is heet dat de *rustlengte*.

Ze zal me helpen, zegt ze. Haar bezem heeft een koplamp en een achterlicht en die zal ze in het voorbijgaan even tegelijk laten flitsen. Als ik dan de posities van die twee flitsen bepaal weet ik de juiste *bezemplengte*:



Daar komt ze! Daar is ze! Daar gaat ze!

En dan word ik boos op haar. Want ze zou die flitsen toch tegelijk geven? En dat heeft ze potverdorie helemaal niet gedaan! Wederom zijn we het dus niet eens over de *lengte* van haar bezem. Maar zij zit nog steeds op die bezem en meet dus de juiste *lengte*.

Ik zal het dus toch zelf moeten doen. Ik bepaal op één enkel tijdstip de positie van haar beide bezemuiteinden en om dat aan haar kenbaar te maken geef ik op precies dat moment op elk van die twee posities een lichtflits. Zo, nou heb ik tenminste de goede *bezemplengte* gemeten en dat zal ze weten. Maar de heks zit mij uit te lachen. Ze heeft gezien dat ik helemaal niet op één enkel moment heb gemeten. Ze zag die flitsen beslist niet gelijktijdig. Ze beticht mij van een systematische meetfout.

Kortom, we worden het nooit meer eens over de *bezemplengte*. Direct gevolg van de **tijddilatatie** en het daaruit voortvloeiende verschil in *gelijktijdigheid*. Om een lang verhaal kort te maken: ik meet een kortere bezem dan zij zelf. En hoe groter haar *snelheid* is, hoe groter die verkorting is voor de stilstaande waarnemer.

Overigens is zij zélf, van buik tot rug, in precies dezelfde verhouding ook gecontraheerd. Maar daar heeft ze zelf niets van in de gaten, die contractie bestaat alleen voor míj, de stilstaande waarnemer.

Gecontraheerde heks:



Een snelle heks is langzaam en ze heeft een korte bezem.

Die verkorting heet **Lorentzcontractie** of **Lorentz/Fitzgerald-contractie**. En dat is precies wat beide heren hadden gevonden. het laatste stukje van de weg naar die vreemde ontdekking betreffende de *lichtsnelheid*. Bewegende dingen moesten volgens hen korter worden. Anders konden ze die ontdekking niet begrijpen. Maar ze begrepen niet hoe dat dat kwam. Einstein wel.

En hoe groter de *snelheid*, hoe groter de **Lorentzcontractie**, totdat bij $v = c$ de bezem voor de stilstaande waarnemer helemaal tot nul is gecontraheerd. En dan is er bij haar ook geen enkele progressie meer in de *tijd*, zoals de stilstaande waarnemer het meet. Voor de heks zelf is er niets aan de hand. Zij heeft haar eigen *tijd* en haar bezem heeft voor haar de *rustlengte*.

Deze **Lorentzcontractie** is dus een rechtstreeks gevolg van de **tijddilatatie**, de onderlinge *onzichtbare tijdscheefheid* tussen *jóuw* en *míjn tijd* die optreedt bij heel grote onderlinge *snelheid*. Dé *tijd* bestaat niet, *tijd* is relatief. En in het dagelijks leven merken wij daar met onze eigen zintuigen helemaal niets van.

We hebben elk onze *éígen* perceptie van *lengte*. Behalve *tijd* is ook *afstand* relatief en door de **Lorentzcontractie** kijk ik als het ware ook scheef tegen de bezem aan. Maar in welke *richting* is die dan scheef? Nou, dat is in de *onzichtbare richting* van de *tijd*. Het *lengteverlies* komt terug als een *tijdverschil*.

Topsnelheid

De bezem wordt dus korter naarmate de heks sneller voorbijkomt, en bij de lichtsnelheid is deze helemaal nul geworden. **En omdat een bezem niet korter kan zijn dan nul, kan die heks niet sneller dan het licht!**

*Eigenlijk komt dat doordat in de omrekenformule voor **tijddilatatie** en **Lorentzcontractie** een wortel voorkomt en bóven de lichtsnelheid zou dat dan de wortel moeten zijn uit een negatief getal. Dat is onmogelijk want kwadraten zijn altijd positief.*

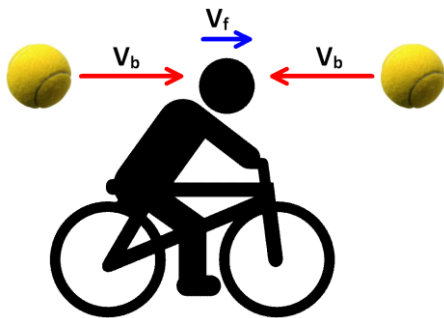
Für Überlichtgeschwindigkeiten werden unsere Überlegungen sinnlos; wir werden übrigens in den folgenden Betrachtungen finden, daß die Lichtgeschwindigkeit in unserer Theorie physikalisch die Rolle der unendlich großen Geschwindigkeiten spielt.

Voor snelheden boven de lichtsnelheid worden onze overwegingen zinloos; we zullen overigens in de volgende beschouwingen vinden dat de lichtsnelheid in onze theorie natuurkundig de rol der oneindig grote snelheden speelt.

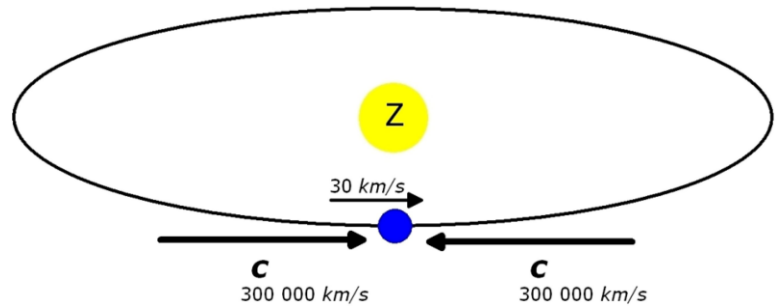
Aldus Einstein zelf.

De vreemde ontdekking

En wat was nou die vreemde ontdekking betreffende de *lichtsnelheid*? Wel, ondanks de beweging van de aarde om de zon werd áltijd in álle richtingen precies dezelfde *lichtsnelheid* gemeten. En dat is dus anders dan wanneer je bijvoorbeeld al fietsend een balletje tegen je voor- of achterhoofd krijgt gegoid. De klap van voren is dan immers harder dan die van achteren.



Van voren hardere klap dan van achteren.



Vooruit, achteruit, loodrecht: zélfde lichtsnelheid. Ook als de aarde over 1/2 jaar de andere kant op gaat.

Hoe raar het ook lijkt, we méten áltijd in álle richtingen precies dezelfde *lichtsnelheid* ondanks de beweging van de aarde om de zon. En zolang je blijft denken in termen van dé tijd kom je daar nooit uit.

Einstein

Albert Einstein gebruikte het feit dat we steeds dezelfde *lichtsnelheid* meten als uitgangspunt:

Wir setzen noch der Erfahrung gemäß fest, daß die Größe

$$\frac{2 \overline{AB}}{t'_A - t_A} = V$$

eine universelle Konstante (die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume) sei.

We stellen nog overeenkomstig de ervaring vast, dat de grootheid (formule) = V een universele constante (de lichtsnelheid in de lege ruimte) zij. (Einstein gebruikte de V voor de lichtsnelheid).

Met *ervaring* bedoelt hij natuurlijk die vreemde ontdekking. Eigenlijk staat er dus: *Als we altijd dezelfde waarde meten is het kennelijk een natuurconstante.*

Dit heet het **tweede postulaat van Einstein:**
de lichtsnelheid is een natuurconstante.

En als er een tweede postulaat is dan ligt het voor de hand dat er ook een eerste is. Jij weet uit eigen ervaring dat je in een rijdende auto dingen precies net zo moet doen als bij stilstand en de feitelijke *snelheid* doet er niet toe. Mits er strak constant wordt gereden, ook qua richting. Bijvoorbeeld verkeersdrempels, door de bocht scheuren of keihard remmen verstoren dat. Ook zouden we in de restauratiewagon van een hogesnelheidstrein gewoon een bord soep kunnen leeglepelen zonder te knoeien, zolang die trein maar strak constant rijdt. En zonder turbulentie doe je in een vliegtuig, dat nog veel sneller gaat, ook alles net zo. De natuurwetten gaan als het ware met je mee.

Dat is het

eerste postulaat van Einstein:

bij constante snelheid gelden voor jou en mij dezelfde natuurwetten.

Voor beide postulaten geldt:

Ex observatis phaenomenis immediate deductum est.

Het is rechtstreeks afgeleid uit waargenomen verschijnselen.

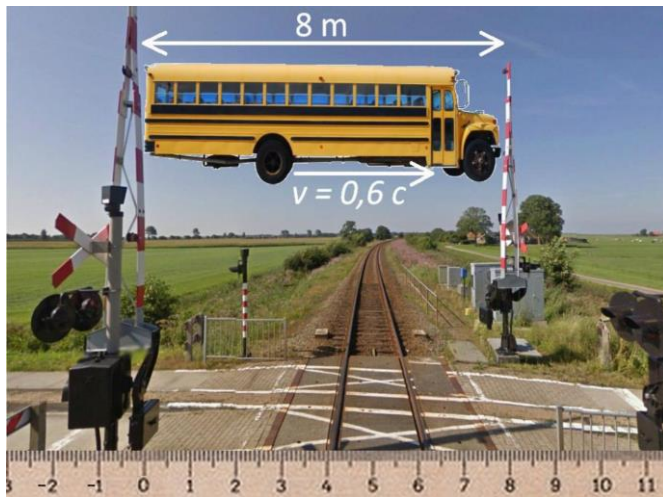
En deze postulaten zijn de enige niet verder herleidbare uitgangspunten, de rest van de theorie is van het kaliber *één plus één is twee*. Natuurlijk is het tweede postulaat te beschouwen als een natuurwet die uiteraard onder het eerste postulaat valt! Dus voor jou en voor mij geldt altijd dezelfde *lichtsnelheid*, die nu immers een *natuurconstante* is. Oók als wij dezelfde lichtstraal opmeten terwijl we elkaar met grote *snelheid* passeren. En nu je de **tijddilatatie** en de **Lorentzcontractie** eenmaal kent, hoef je dat niet meer raar te vinden, maar Einstein kwam helemaal zelf op dat idee!

Als gevolg van de **tijddilatatie** en de **Lorentzcontractie** betichten wij elkaar van systematische meetfouten en dat is tussen jou en mij volkomen symmetrisch. Daardoor compenseren onze zogenaamde meetfouten elkaar volledig en geldt voor ons beiden dezelfde *lichtsnelheid*.

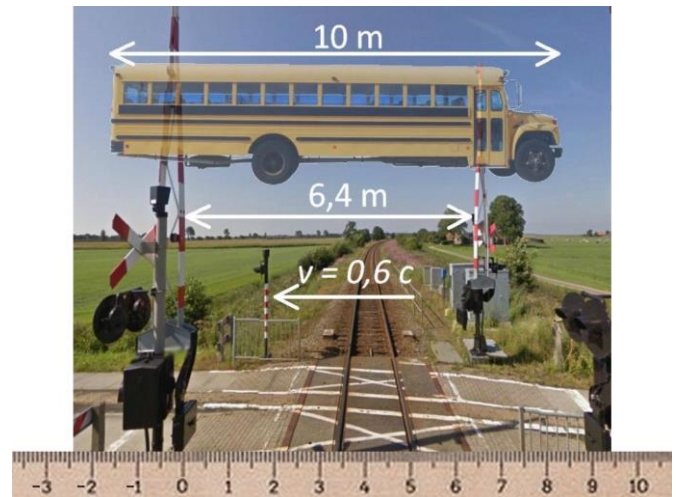
Door slim gebruik te maken van de *lichtsnelheid* als natuurconstante kun je een klok ontwerpen. En met zulke op de *lichtsnelheid* gebaseerde klokken meten wij dan niet meer dezelfde *tijd* als we elkaar heel snel passeren. Wel dezelfde *lichtsnelheid*, niet dezelfde *tijd*. Dat betekent dat **dé tijd** dus niet bestaat, maar dat we elk onze eigen *tijd* hebben. Met als gevolg de **tijddilatatie** en de **Lorentzcontractie**. En we zijn het niet meer eens over de *gelijktijdigheid* van gebeurtenissen. En dat manifesteert zich pas boven pakweg 10% van de *lichtsnelheid*. Maar met gevoelige apparatuur is het ook bij lagere *snelheden* heel goed meetbaar!

Gesnopen?

En nu even een testje of je het echt hebt begrepen. Stel, jij bent buschauffeur en ik spoorwagewegwachter. Jouw bus is 10 m lang en mijn slagbomen staan 8 m uit elkaar. Maar jij lust er wel pap van en je rijdt met $v = 60\%c$. Dan is de **Lorentzcontractie** gelijk aan een factor 0,8. Ik zie jou dus aankomen met een kort busje van 8 m en ik kom op het lumineuze idee om mijn slagbomen eventjes **tsjakka!** neer en op te doen. Busje vangen heet dat. Gaat precies goed. Geen schade. Jouw bus is voor mij écht maar 8 m lang. Maar hoe is dat in jouw beleving? Jouw bus is voor jou gewoon 10 m lang en jij ziet mijn overweg op je afkomen en die zal met $v = 60\%c$ onder jouw bus door schieten. Door de **Lorentzcontractie** met een factor 0,8 staan voor jou de slagbomen slechts 6,40 m uit elkaar. En die gek in dat spoorwagewegwachtershokje doet... Wat?



Zo zie ik het: bus en bomen beide 8 m.
Tsjakka!



Zo zie jij het: bus 10 m, bomen 6,40 m.
Oeps?!

Zie je overigens dat jouw korte busje van 8 m in het linkerplaatje eivormige wielen heeft? Zal ie in 't echt ook hebben hoor! En jij ziet vanuit jouw lange bus van 10 m mijn wereld gecontraheerd.

Eérsst nadenken, dan pas verder lezen voor de oplossing.

Goed nagedacht?

Wij zijn het niet eens over *gelijktijdigheid*. Jij ziet eerst de boom die in de plaatjes rechts staat vlak vóór de bus neer en op gaan terwijl de andere nog naast de bus is, en daarna, als die eerste boom reeds naast de bus is, zie je de andere boom, die dus in de plaatjes links staat, vlak achter de bus neer en op gaan. Wat jij aan *overweglengte* kwijtraakt krijg je terug als een *tijdsverschil*.

Praktijk

- Met de modernste generatie atoomklokken is de **tijddilatatie** aangetoond bij *loopsnelheid* (5 km/h).
- André Kuipers heeft door de *snelheid* van het ISS in het half jaar dat hij er verbleef een tijdwinst gemaakt: hij is ca. 5 milliseconde minder verouderd dan wanneer hij op aarde zou zijn gebleven. Hij is als het ware versneld naar de toekomst gegaan (hij speelt de rol van Miepje in de eerder genoemde *tweelingparadox*, wij zijn Jantje).
- De GPS-satellieten hebben een *omlooptijd* van precies twaalf uur en bewegen daardoor (op ca. 20 189 km hoogte) met een kleine 4 kilometer per seconde. Als de in die satellieten aanwezige atoomklokken niet voor **tijddilatatie** waren gecorrigeerd had GPS een verloop gehad van ruim twee kilometer per dag ofwel 90 meter per uur! Maar in werkelijkheid is de nauwkeurigheid van GPS zodanig dat het er in open veld (dus zonder storende invloed door gebouwen of wat dan ook) in 95% van de *tijd* minder dan 8 meter naast zit wat betreft de horizontale positie. De hoogte geeft het minder nauwkeurig. De satellietposities zijn bekend met een afwijking van minder dan 25 cm.

Optellen van snelheden

Door de **tijddilatatie** kun je snelheden niet meer zo maar optellen. We gaan even terug naar het spoor. Deze keer is het slechts één spoorlijn. Ik sta op het perron en jij zit in een voorbijdenderende trein. De machinist heeft er wel zin in: dat ding rijdt met pakweg $v = \frac{3}{4}c$. En achter in die trein heb jij zojuist een balletje voorwaarts gegooid en dat vliegt met bijv. $\frac{5}{8}c$ door de trein naar voren. Maar dat is ín de trein gemeten. De *intern* gemeten *balsnelheid*. Dankzij de **Lorentzcontractie** is de trein voor mij echter korter

en wat voor jou een seconde is duurt door de **tijddilatatie** voor mij langer, en met een kortere *afstand* gedeeld door een langere *tijd* meet ik als stilstaande waarnemer buiten de trein dus een dubbel lagere *snelheid*. De door mij waargenomen *extern* gemeten *balsnelheid* is natuurlijk wel groter dan de *treinsnelheid*, maar minder dan de som van *treinsnelheid* en *intern* gemeten *balsnelheid*. Het is zelfs altijd kleiner dan de *lichtsnelheid* want sneller dan het licht bestaat niet.

Heel grote *snelheden* kun je dus niet meer gewoon bij elkaar optellen. Einstein geeft hiervoor een simpele formule. Als we alle *snelheden* uitdrukken als *nul komma zoveel* keer de *lichtsnelheid* (die we dan dus feitelijk als snelheidseenheid gebruiken - prachtig! een natuurconstante als eenheid!) dan is de resulterende *snelheid* gelijk aan: *som gedeeld door [één plus product]*. In het dagelijks leven ligt dat product zo dicht bij nul dat die noemer gewoon één is en dan blijft over: de som der *snelheden*, zoals we gewend zijn.

§ 5. Additionstheorem der Geschwindigkeiten.
(...)
(formule)

Aus dieser Gleichung folgt, daß aus der Zusammensetzung zweier Geschwindigkeiten, welche kleiner sind als V , stets eine Geschwindigkeit kleiner als V resultiert.

§ 5. Optellingstheorema der snelheden.
(...)
(formule)

Uit deze vergelijking volgt, dat uit de samenstelling van twee snelheden, die kleiner zijn dan V , steeds een snelheid kleiner dan V resulteert.

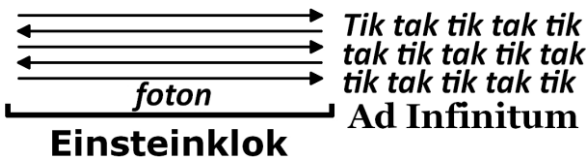
Aldus Einstein zelf.

Nogmaals de lichtsnelheid

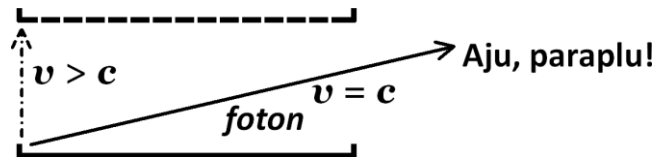
En nu je weet dat de *lichtsnelheid* een natuurconstante is het volgende. Ik heb een liniaal met aan de uiteinden twee exact uitgelijnde spiegeltjes en daartussen gaat een foton (lichtdeeltje) heen en weer. En dat blijft het doen tot in het oneindige. Dat heet een Einsteinklok.

Stel nu dat ik jou sneller dan het licht zou zien passeren. Dan zie jij mij met die *snelheid* voorbijkomen. Mét mijn Einsteinklok, want die heb ik in mijn hand, dus hij is voor mij niet in beweging en hij doet het gewoon zoals ik net heb beschreven. En dat foton dat ad infinitum in mijn Einsteinklok tussen die twee spiegeltjes heen en weer gaat, doet dat - omdat het nu eenmaal licht is - met de *lichtsnelheid*, het kan niet anders.

En die *lichtsnelheid* is voor jou precies net zo groot als voor mij, dat volgt uit Einsteins postulaten. Dus zoals jij het ziet kan dat foton mij doodgewoon niet bijhouden, want ik ga volgens jou sneller dan het licht. Jij ziet dus het foton uit mijn Einsteinklok ontsnappen. Huh?



Zo zie ik mijn Einsteinklok



En dit zie jij

Jij ziet het eruit vliegen terwijl ik zie dat precies datzelfde foton in precies dezelfde klok oneindig heen en weer blijft gaan. Dat is een contradictie. De aanname dat onze *snelheid* groter is dan de *lichtsnelheid* kan dus niet correct zijn. **Dus kun je niet sneller dan het licht.** Q.E.D.

Dit heet een *bewijs uit het ongerijmde: aanname leidt tot onmogelijkheid, dus aanname fout.*

Dat je niet sneller kunt dan licht volgt dus direct uit Einsteins postulaten: *de lichtsnelheid is een natuurconstante met voor jou en mij precies dezelfde waarde.* En dát is overeenkomstig het experimentele resultaat: we méten altijd dezelfde *lichtsnelheid*, ondanks de variabele beweging van de aarde om de zon.

Foton

Een foton is een lichtdeeltje. Zeg maar een heel kort stukje lichtstraal. Van één golflengte. En het is licht, dus gaat het per definitie met de *lichtsnelheid*. Het foton kan niet anders. En nu sta jij naar bijvoorbeeld de poolster te kijken (weet je die te vinden?). Er is een foton helemaal vanaf de poolster naar jouw oog gereisd, en daar heeft het - in jóúw *tijd* gemeten - 323 jaar over gedaan. Zover weg is de poolster. Drie biljard kilometer.

En dat foton heeft jouw oog op zich zien afkomen met de *lichtsnelheid*. Dat moet wel, wat zo hard gaat het foton nu eenmaal. En met de *lichtsnelheid* is die hele afstand van drie biljard kilometer door de **Lorentzcontractie** voor het foton tot helemaal *nul* gecontraheerd! En door de **tijddilatatie** staat de *tijd* van het foton voor jou helemaal stil. Een eindige *fotontijd* is voor jou dan oneindig, en wat voor jou eindig is is dan voor het foton helemaal *nul*! Wat voor jou dus 323 jaar is (de reis van het foton) is in de beleving van het foton doodgewoon *nul*. Het foton ziet jouw oog *nul afstand* afleggen in *nul tijd*. Het foton is de ultieme fysische nul.

Vanuit jóúw perspectief:

1. de poolster produceert een foton;
2. het foton vertrekt van de poolster;
3. het foton reist met $v = c$ naar jouw oog;
4. het foton arriveert bij jouw oog;
5. jouw netvlies absorbeert het foton.

En die reis van drie biljard kilometer duurt 323 jaar, in jóúw *tijd* gemeten.

In de beleving van het foton:

1. het foton ontstaat op de poolster;
2. het foton ziet de poolster verdwijnen;
3. de afstand tot jouw oog schiet met $v = c$ aan het foton voorbij;
4. jouw oog arriveert bij het foton;
5. het foton komt jammerlijk ten einde.

En dat gebeurt - in deze volgorde - allemaal in *nul tijd* want die afstand is tot helemaal *nul* geLorentzcontraheerd! Voor het foton wel te verstaan. Alsof je een boek helemaal platdrukt tot hartstikke *nul*. Maar de bladzijden blijven wel op volgorde.

Het foton beleeft alles dus - in de juiste volgorde - in *nul tijd*. En het ervaart *nul afstand*. Het reeds geciteerde: *time is what keeps everything from happening at once* (wat ten onrechte ook aan Einstein wordt toegeschreven) geldt dus niet voor een foton. Dat heeft *nul tijd* beschikbaar en ziet derhalve alles wel degelijk ineens gebeuren, maar wél in de goede volgorde. Het foton heeft eigenlijk geen *tijd*- of ruimtebeleving. Een foton is per saldo alleen maar energieoverdracht. Meer niet.

Tot zover Einsteins eerste artikel betreffende de relativiteitstheorie.

Materie en energie

Einsteins eerste artikel over de relativiteitstheorie verscheen op 26 september 1905 in *Annalen der Physik* en 's anderen daags, op 27 september, lag zijn volgende artikel reeds op de mat. Zo ziet het laatste nippertje eruit. Anders had de allerberoemdste formule ter wereld hoogstwaarschijnlijk op iemand anders' naam gestaan.

Massa & beweging

Sir Isaac Newton is met zijn *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* een van de belangrijkste grondleggers van de natuurkunde. De hedendaagse schoolboeken over natuurkunde zijn gestoeld op dit *Magnum Opus* van Newton. Het werk begint met een aantal definities.

Definitie 1 betreft de *Quantitas Materiæ = Hoeveelheid Materie*.

In de toelichting daarop zegt hij dat hij dát bedoelt met de term *massa*.

Definitie 2 betreft de *Quantitas motus = Hoeveelheid beweging*.

Dat is volgens deze definitie de combinatie van *massa* en *snelheid*. En volgens de toelichting is de totale beweging gelijk aan de som der bewegingen van de afzonderlijke delen. In de Nederlandstalige natuurkunde heet deze grootheid *impuls* en in het Engels *momentum*. Ik zal het hier gewoon *beweging* noemen. Niet te verwarren met *snelheid*. *Beweging* is de combinatie van *massa* en *snelheid*. Een ding met meer *snelheid* heeft meer *beweging*, maar een ding met meer *massa* ook. In een rotsblok zit meer *beweging* dan in een kiezelsteentje dat zich met dezelfde *snelheid* verplaatst.

Energie

Laten we nog eens het balletje beschouwen dat jij door de voorbijdenderende trein heen hebt gepleurd. Dat heeft een *massa* en een *snelheid*, dus ook een *hoeveelheid beweging*. Er is dan ook *bewegingsenergie* ingestopt. Dat heb jij gedaan. En de machinist. En voor een stilstaande waarnemer loopt de brandstoftank van een voertuig net zo ver leeg als voor een meerdende waarnemer, beiden lezen op de brandstofmeter hetzelfde getal, dus *energie* is niet gevoelig voor ***tijddilatatie***.

Maar voor mij, de stilstaande waarnemer op het perron, is als gevolg van de ***tijddilatatie*** en ***Lorentzcontractie*** de *extern* gemeten *balsnelheid* kleiner dan de som van de *treinsnelheid* en de *intern* gemeten *balsnelheid*. Dus de *bewegingsenergie* komt voor mij niet volledig tot uiting in de *snelheid*. Dan kan het alleen nog maar in de *massa*, want *beweging* is de combinatie van *massa* en *snelheid* en meer opties zijn er niet. Voor de stilstaande waarnemer manifesteert een deel van de *bewegingsenergie* zich dus als *massa*! Einstein vond hiervoor de misschien wel allerbekendste formule van de hele wereld:

$$E = mc^2$$

Dit betekent dat *massa* en *energie* eigenlijk hetzelfde is! *Massa* (of beter gezegd: *materie*) is daardoor te beschouwen als gecondenseerde (verdichte) *energie*. De omrekeningsfactor is het kwadraat van de *lichtsnelheid*. En het tegenovergestelde kan ook: *massa* kan worden omgezet in *energie*, en dán komt die factor c^2 tevoorschijn. Dat is 89 875 517 873 681 764 m²/s², ongeveer een 1 met zeventien nullen! Je hebt vast geen flauw idee hoeveel dat is, hè? Wel, da's keiveel! Honderd biljard.

De zon

Men had nooit begrepen waar de zon al zijn energie vandaan haalde, maar Einstein zag het licht! In de zon vindt kernfusie plaats, het samensmelten van lichte atoomkernen, en daarbij treedt een zogeheten *massadefect* op. Dat betekent dat er doodgewoon *massa* verdwijnt. En die verdwenen *massa* straalt de zon uit in de vorm van... *licht!* *Energie* dus. De sterkte van de zonnestraling net buiten de atmosfeer is 1361 W/m^2 en de afstand tot de zon is ca. 150 miljoen km. Daarmee kunnen we uitrekenen dat het *massadefect* van de zon ruim 4 miljard kilogram (4 miljoen ton) per seconde bedraagt...

Kernenergie

In een kerncentrale worden grote, zware atoomkernen als het ware gekleefd en ook daar treedt een massadefect op. Helaas betreft het gevaarlijk radioactief spul. Maar dáár wil ik het nu helemaal niet over hebben. Op onderstaande sleutelhanger die ik in 1989 heb gekregen bij een bezoek aan de kerncentrale te Borssele staat iets dat een indruk geeft van wat die $E = mc^2$ nou behelst.



10 g verrijkt $\text{UO}_2 \cong 1000 \text{ kg steenkool}$.

Dat zwarte dingetje is 10 gram verrijkt uraniumoxyde. Het is ca. $0,8 \text{ cm}^3$ en levert evenveel *energie* als een ton steenkool of 1500 liter benzine. Overigens is dat dingetje radioactief, maar de inkapseling in kunststof is afdoende om de sleutelhanger veilig in de broekzak te kunnen dragen, vlak naast een tweetal dingen die bij voorkeur niet moeten worden blootgesteld aan straling...

Atoombom

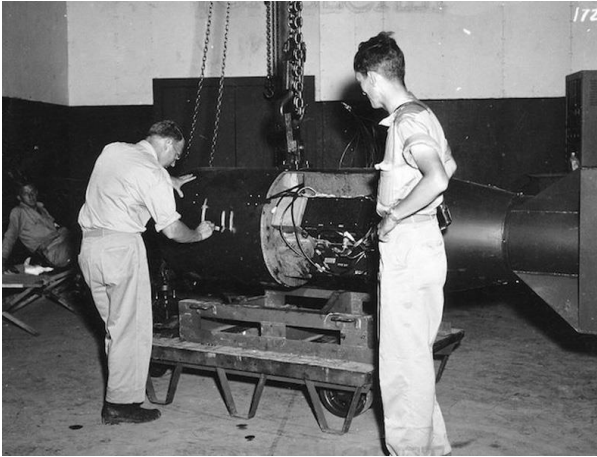
Tja. Ook te danken aan $E = mc^2$.

Had I known that the Germans would not succeed in producing an atomic bomb, I would not have lifted a finger.

Albert Einstein discussing the letter he sent Roosevelt raising the possibility of atomic weapons. from "Atom: Einstein, the Man Who Started It All", Newsweek Magazine (10 March 1947).

Als ik had geweten dat de Duitsers er niet in zouden slagen om een atoombom te maken, dan had ik geen kik gegeven.

Little boy (jochie):



De échte bom die op Hiroshima is gedropt.

Bevatte 64 kg uranium (past in een bal van 18 cm) waarvan 800 gram (een golfbal) feitelijk geploft. Massadefect $\approx 0,75$ g. Explosieve kracht: ca. 25 huizen massief vol dynamiet!
78 000 onmiddellijke doden, instantaan verdampt.

Fat man (dikzak):



De échte bom die op Nagasaki is gedropt.

Bevatte 6,2 kg plutonium (past in een bal van 8,5 cm) waarvan 1 kg (een borrelglas) feitelijk geploft. Massadefect ≈ 1 g. Explosieve kracht: ca. 33 huizen massief vol dynamiet!
"Slechts" 39 000 onmiddellijke doden.
Doel werd 5 km gemist door het weer.

Recapitulatie

- *Tijd* is relatief. Jóúw *tijd*, míjn *tijd*, maar niet **dé** *tijd*. En jóúw en míjn *tijd* kunnen *onzichtbaar scheef* lopen. Dat heet **tijddilatatie** en het treedt merkbaar op als wij elkaar hééél snel passeren (het begint bij pakweg 10% van de *lichtsnelheid*). Daardoor zien we állebei dat bij de ánder álles langzamer gaat. Die *tijdrek* wordt groter naarmate onze onderlinge *snelheid* groter is. Bij de *lichtsnelheid* staat - in de éígen *tijd* gemeten - de *tijd* van de ander helemaal stil.
- Door de **tijddilatatie**, de *onzichtbare tijdscheefheid*, zijn we het niet meer eens over *gelijktijdigheid*.
- Ook worden bewegende dingen korter. Dat heet **Lorentzcontractie**. Die is groter naarmate de *snelheid* groter is en bij de *lichtsnelheid* is alles in de bewegingsrichting gecontraheerd tot helemaal *nul*.
- En omdat een ding niet korter kan zijn dan *nul* is sneller dan het licht onmogelijk.
- En doordat de wederzijdse "meetfouten" waarvan we elkaar betichten elkaar compenseren geldt voor jou en mij altijd precies dezelfde *lichtsnelheid*, ook als het dezelfde lichtstraal is.
- Dat laatste ontdekte men eind 19^e eeuw: we méten altijd dezelfde *lichtsnelheid*.
- En bij elke *snelheid* moet je alle dingen op dezelfde manier doen, dat weet je uit eigen ervaring.
- Daarop kwam Einstein met zijn postulaten:
 1. Bij constante *snelheid* gelden voor jou en mij dezelfde natuurwetten (het *relativiteitsprincipe*);
 2. De *lichtsnelheid* is een natuurconstante.
- Van daaruit kwam hij tot het besef dat **tijd** relatief is. Dát is m.i. het allerbelangrijkste aspect van de

relativiteitstheorie = relatievetijdstheorie.

Verder manifesteert *energie* zich door de **tijddilatatie** en de **Lorentzcontractie** als *massa*. Ofwel: *massa* is gecondenseerde *energie*. Daar halen de zon en de sterren alsmede de kerncentrale en de atoombom hun *energie* vandaan.

Natuurconstante

N.B. in zijn artikel over $E = mc^2$ laat Einstein het 2^e postulaat alweer los, wat hij in een voetnoot verduidelijkt:

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwell'schen Gleichungen enthalten.

Het daar gebruikte principe van de constantheid van de lichtsnelheid is natuurlijk in de vergelijkingen van Maxwell vervat.

Niet dat de *lichtsnelheid* ineens geen natuurconstante meer zou zijn, maar het is niet nodig dat te postuleren omdat het volgt uit de zogeheten vergelijkingen van Maxwell (die behelzen een volledige beschrijving van het elektromagnetisme waaruit blijkt dat licht in feite een elektromagnetische golf is).

In Maxwells formule voor de *lichtsnelheid* komt de onderlinge *snelheid* tussen waarnemer en lichtbron niet voor. En je kunt ook geen *snelheid* hebben t.o.v. het vacuüm. Daardoor heeft de *lichtsnelheid* dan vanzelfsprekend altijd dezelfde waarde. **Uit de Maxwellvergelijkingen volgt dat de *lichtsnelheid* feitelijk een eigenschap is van de lege ruimte, het vacuüm, en niet een eigenschap van het licht!** Vergelijk het met een straat waarop alle auto's 50 rijden. Is dat een eigenschap van die auto's of van die straat? Wedden dat er een bordje-50 staat? Daarmee is het een eigenschap van de straat, niet van de auto's.

Dan resteert als uitgangspunt het eerste postulaat ofwel het relativiteitsprincipe:

bij constante snelheid gelden voor jou en mij dezelfde natuurwetten.

Algemene relativiteit

In de volgende 10 jaar heeft Einstein zijn theorie gecompleteerd. Hij moest daarvoor eerst een onderdeel van de wiskunde tot zich nemen dat hij nog niet had geleerd. Tensorrekening en Riemannse meetkunde. Pittige wiskunde die je voorstellingsvermogen tart. Maar dáár ga ik het niet over hebben.

Snelheidsverandering

Eigenlijk is die *constante snelheid* wel een forse beperking, toch? We versnellen en vertragen toch aan één stuk door? De ene *bewegingsverandering* na de andere. Als je opstaat uit je stoel is dat al een *bewegingsverandering*. Gaan lopen is een *bewegingsverandering*. En weer stoppen ook. Einstein wilde van die beperking van *constante snelheid* af en deed dat op de simpele manier: hupsakee, weg ermee! Wat we tot nu hebben behandeld was in de loop der jaren door "de mensen" *relativiteitstheorie* genoemd (het oorspronkelijke artikel was anders getiteld). Hij hernoemde die theorie tot ***speciale relativiteitstheorie*** en kwam vervolgens met de ***algemene relativiteitstheorie*** op de proppen. Daarin laat hij de eis van *constante snelheid* los in het

(algemene) relativiteitsprincipe:

voor jou en mij gelden dezelfde natuurwetten.

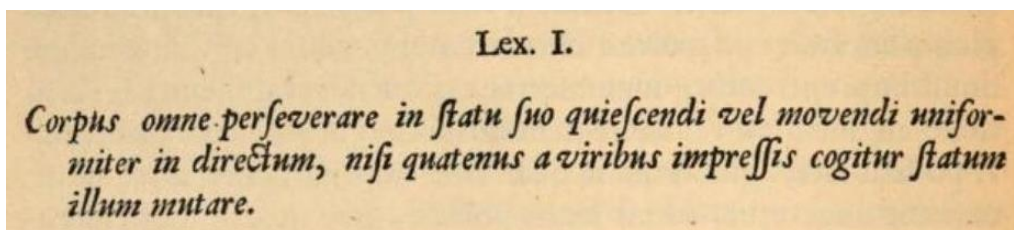
Nu is *snelheidsverandering* niet meer in strijd met het uitgangspunt. En de *speciale relativiteitstheorie* blijft onverminderd van kracht, dus de *lichtsnelheid* is nog steeds wel degelijk een natuurconstante, hoewel niet meer als zodanig gepostuleerd.

Het relativiteitsprincipe is Einsteins uitgangspunt dat de natuur zich aan jou precies net zo manifesteert als aan mij. Wij zijn dus volkomen gelijkwaardige waarnemers en we hebben allebei evenveel gelijk.

Traagheid

Materie is het *spul* waar de hele natuur uit voortkomt. Het woord komt van het Latijnse *mater* = moeder. Het is het *spul* waaruit atomen bestaan, de elementaire deeltjes. Definitie 1 van Newton stelt dat *massa* een *hoeveelheid materie* is. Definitie 3 van Newton stelt dat *materie* de aangeboren kracht ("vis insita") heeft om *weerstand* te bieden tegen *verandering* van *beweging*. Deze *weerstand* tegen *bewegingsverandering* heet *traagheid*.

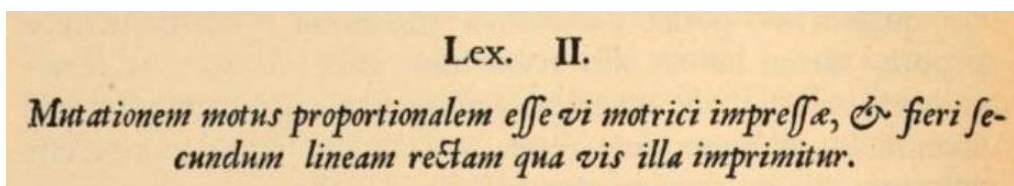
Daaruit volgt dan de eerste wet van Newton:



Wet I. Elk lichaam volhardt in zijn toestand van rust of gelijkmatige rechtlijnige beweging, behalve voor zover het door een daarop uitgeoefende kracht wordt geacht die toestand te veranderen.

Dit staat ook bekend als de *traagheidswet*.

Alsmede zijn tweede wet:



Wet II. Verandering van beweging is evenredig met de uitgeoefende drijvende kracht, en zal volgens de rechte lijn zijn waarlangs deze kracht wordt uitgeoefend.

Deze ken je wellicht als: *kracht* is *massa* maal *versnelling* ($F = m \cdot a$).

Zwaarte

En op een dag zat Newton in de tuin, vol overpeinzingen, en hij zag een appel uit de boom vallen. Maar die hing eerst stil. Dat was dus een neerwaartse *bewegingsverandering*. Er werkte dus conform de tweede wet die hierboven staat een neerwaartse *kracht* op die appel! Dat kan alleen maar betekenen dat de aarde aan die appel trekt. Dus oefenen *massa's* een aantrekkende *kracht* op elkaar uit. De *zwaartekracht*! We noemen die kracht *gewicht* en dat is een gevolg van de *zwaarte* van de *massa*. Dat laatste is de eigenschap dat *massa's* elkaar aantrekken.

Massa

Massa (een *hoeveelheid materie*) heeft dus twee fundamentele eigenschappen: *traagheid* en *zwaarte*. Door de *traagheid* biedt *massa* dus *weerstand* tegen *bewegingsverandering* en voor dat laatste is een evenredige *kracht* nodig. En door de *zwaarte* oefenen *massa's* een aantrekkende *kracht* op elkaar uit. Die laatste *kracht* heet *gewicht*.

- *massa* is *hoeveelheid materie* (alsmede *gecondenseerde energie*);
- *traagheid* is een eigenschap van *materie*: het verzet tegen *bewegingsverandering*;
- *zwaarte* is een eigenschap van *materie*: het feit dat *hoeveelheden materie* elkaar aantrekken;
- *gewicht* is die aantrekkende *kracht* tussen twee *hoeveelheden materie*.

G-kracht

- Heb jij ook wel eens in een snel vertrekkende of stoppende lift het gevoel gehad dat je even wat zwaarder of lichter was? Stel dat de lift omhoog versnelt, dan ben je even wat zwaarder. Dan is het net alsof je binnenin de lift als het ware naar beneden wordt getrokken. Maar in werkelijkheid dúwt de liftbodem jou versneld omhoog. Jouw eigen *traagheid* verzet zich tegen de daardoor veroorzaakte *bewegingsverandering* en dat erváár jij als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.
- Als je in de auto tijdens het wegsurten in de rugleuning wordt gedrukt dan voel je dat als een soort horizontaal *gewicht*. Alsof de auto rechtop zou staan op zijn achterbumper. Jij wordt als het ware achterwaarts in de leuning getrokken. Maar in werkelijkheid dúwt die leuning jou versneld vooruit. Jouw eigen *traagheid* verzet zich tegen de daardoor veroorzaakte *bewegingsverandering* en dat erváár jij als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.
- Een auto die nogal hard door de bocht gaat verricht een zijdelingse *bewegingsverandering* maar jouw eigen *traagheid* verzet zich daartegen en wil rechtdoor. Je voelt een zijdelings horizontaal *gewicht*. Alsof de auto op zijn kant zou liggen. Jij wordt als het ware opzij tegen het portier "de bocht uit" getrokken door de *centrifugale (middelpuntvliedende) kracht*. Maar in werkelijkheid dúwt het portier jou de bocht ín met een *centripetale (middelpuntzoekende) kracht*. Jouw eigen *traagheid* verzet zich tegen de daardoor veroorzaakte *bewegingsverandering* en dat erváár jij als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.

Deze *kracht* als gevolg van *versnelling* en *traagheid* noemen we ook wel *G-kracht*. Dat betekent gewoon dat je zoveel keer je eigen *gewicht* ervaart. *G-kracht* is een traagheidseffect. Het is het verzet tegen *bewegingsverandering* en dat erváár je als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.

Gewicht

- Als je op een stoel zit, voel jij dan dat de aarde - middels de *zwaartekracht* - aan je trekt? Of voel je in feite met je bips een omhoog gerichte *kracht* die belemmert dat je in vrije val naar het middelpunt van de aarde gaat? Jawel, die stoel belemmert de vrije val middels een naar boven gerichte *kracht* en dat erváár jij als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.
- Tijdens een vrije val voel je helemaal niet dat de aarde aan je trekt. Je maakt ook een (kleine) vrije val als je gewoon een sprongetje maakt, met beide voeten van de grond. Zolang je "in de lucht hangt" voel je niet dat de aarde aan je trekt. Als je je ogen dicht houdt heb je er zelfs geen idee van of je nog naar boven aan 't gaan bent of alweer omlaag. Pas als je weer op de grond komt voel je weer iets,

probeer het maar eens. De grond belemmert de vrije val middels een naar boven gerichte *kracht* en dat erváár jij als *gewicht*, *zwaarte*. Maar je vóélt gewoon een duwende *kracht*.

I was sitting in a chair in the patent office at Bern when all of a sudden a thought occurred to me: If a person falls freely he will not feel his own weight. I was startled. This simple thought made a deep impression on me. It impelled me toward a theory of gravitation.

Einstein in his Kyoto address (14 December 1922), talking about the events of "probably the 2nd or 3rd weeks" of October 1907.

Tijdens een vrije val voel je geen *kracht*, je bent gewichtloos. Astronauten zijn voortdurend in vrije val, maar ze vallen steeds voorbij de aarde. En een vrije val is zonder *luchtweerstand*. Want dat is een tegenwerkende *kracht* die je per saldo als *gewicht* ervaart.

Equivalentie

- Met *vallen* bedoelen we meestal *neerkomen*. Alleen dat laatste kan pijn doen. En dat komt door de *zwaartekracht* oftewel door jouw eigen *zwaarte*, nietwaar? Inderdaad, niet waar! De grond belemmert abrupt jouw *neerwaartse beweging*. Je ondergaat doodgewoon een *bewegingsverandering* waar jouw *traagheid* zich tegen verzet. En dan vóélt je gewoon een duwende *kracht* (die wellicht groter is dan de breeksterkte van jouw botten).
- Je kunt ook op *topsnelheid* tegen een muur rennen (*don't try this at home*). Dat heeft niets met *gewicht* of *zwaarte* te maken, toch? Maar maakt het wat uit? De muur belemmert abrupt jouw *voorwaartse beweging*. Je ondergaat doodgewoon een *bewegingsverandering* waar jouw *traagheid* zich tegen verzet. En dan vóélt je gewoon een duwende *kracht* (die wellicht groter is dan de breeksterkte van jouw botten).
- In pretparken en kermisattracties kun je ook *bewegingsveranderingen* ondergaan waar jouw *traagheid* zich tegen verzet en door optische illusie raak je dan helemaal de kluts kwijt. Wanneer hetgeen je vóélt niet meer klopt met wat je zít raken je hersens het spoor bijster. Je kunt kennelijk geen onderscheid maken tussen de *zwaartekracht* effecten en de *bewegingsveranderingen*, ongeacht de richting daarvan. Als je niet meer weet wat boven of onder is ben je dus de richting van de *zwaartekracht* helemaal kwijt en kun je niet meer bepalen wat nou wat is. Kún je - met je ogen dicht - de *zwaartekracht* wel onderscheiden van de traagheidseffecten, de *G-krachten*? Je vóélt immers alleen maar duwende *krachten* tegen je lijf.

Onderscheidbaarheid

Stel dat je je in een ideale liftkooi bevindt, helemaal trillingsvrij, geen motorgeluiden, niets. En ook geen raampjes of wat dan ook; je kunt totaal niets waarnemen buiten die liftkooi. We bekijken enkele scenario's:

1. Die liftkooi staat - met jou erin - stil op een andere planeet met 10% meer *zwaartekracht* dan hier op aarde. Dan voel je je dus ook 10% zwaarder dan je gewend bent en je hebt in de liftkooi zelfs een weegschaal beschikbaar en die zal ook een 10% groter *gewicht* aangeven.

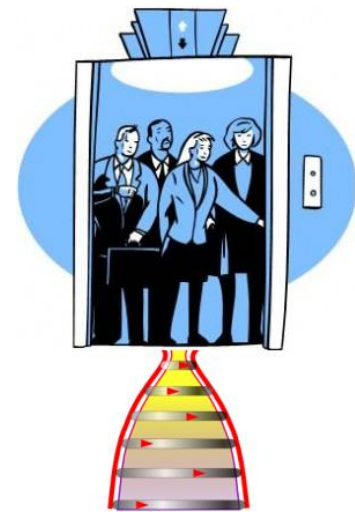
2. Diezelfde liftkooi hangt in een flatgebouw en versnelt zodanig omhoog dat jij de *G-kracht* voelt als 10% extra *gewicht*. De weegschaal zal dan ook 10% bovenop jouw *gewicht* aangeven. De liftbodem duwt immers via die weegschaal tegen jouw lijf.
3. Diezelfde liftkooi is eigenlijk de cockpit van een raket die door de lege ruimte vliegt en waarvan de geluidloze en trillingsvrije motor zodanig buldert dat je een *G-kracht* van 110% ondervindt. Soortgelijk als zojuist met de rugleuning in de auto. In de lege ruimte heerst geen *zwaartekracht*. Jij voelt die 110% *G-kracht* dan als je eigen *gewicht* plus 10%. De weegschaal zal dan ook 10% bovenop jouw *gewicht* aangeven. De liftbodem duwt immers via die weegschaal tegen jouw lijf.



Op een andere planeet:
alleen maar gewicht



In een flatgebouw:
gewicht plus *G-kracht*



Met raketaandrijving:
alleen *G-kracht*

Zou je vanuit die liftkooi, waar je dus geen enkele informatie van buiten hebt, onderscheid kunnen maken tussen deze situaties? *Nee*, zegt Einstein. Jij kunt op geen enkele wijze onderscheid maken tussen *traagheid* en *zwaarte*. Jij *voélt* uitsluitend *krachten* op je lijf en die zijn niet onderscheidbaar. En als je geen onderscheid kunt maken kun je niet zeggen dat er verschil is. Dat brengt ons bij het

equivalentieprincipe:

***traagheid* en *zwaarte* zijn hetzelfde.**

E.e.a. betekent dat de vrije val eigenlijk de natuurlijke situatie is. In vrije val ben je feitelijk gewichtloos, precies net zoals wanneer je zonder motor door de ruimte zou zweven. Zolang je niet fysiek in contact bent met de aarde *voél* je die op geen enkele wijze. Dat is pas als je neerkomt (en dat kan eventueel onaangenaam zijn). In beide situaties (vrije val en in de ruimte zweven) voel je helemaal geen enkele kracht. En volgens de reeds genoemde traagheidswet van Newton volhardt je dan in je toestand van rust of gelijkmatige rechte *beweging*. Dat heet *inerte beweging*. Ook de vrije val is *inerte beweging*, net als het door de ruimte zweven.

Het *equivalentieprincipe* impliceert ook dat er geen fundamenteel verschil is tussen een *zwaartekrachtveld* en *versnellingen* die gepaard gaan met *bewegingsveranderingen*. *Versnelling* is niet onderscheidbaar van *gravitatie*. Daarmee krijgen we een andere formulering van het

equivalentieprincipe:

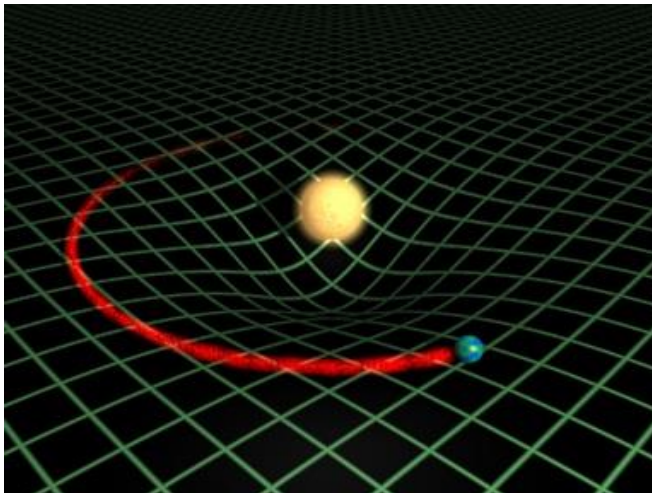
versnelling en gravitatie zijn gelijk.

Met dien verstande dat *massa* normaal gesproken tot een radiaal (centrumgericht) gravitatieveld leidt dat zwakker is bij grotere *afstand*, lineaire *versnelling* tot een homogeen (gelijkmatig) gravitatieveld en *rotatie* (da's ook *versnelling* = *snelheidsverandering*) tot een ietwat vreemd gravitatieveld dat je wellicht ooit enigszins hebt ervaren in een kermisattractie.

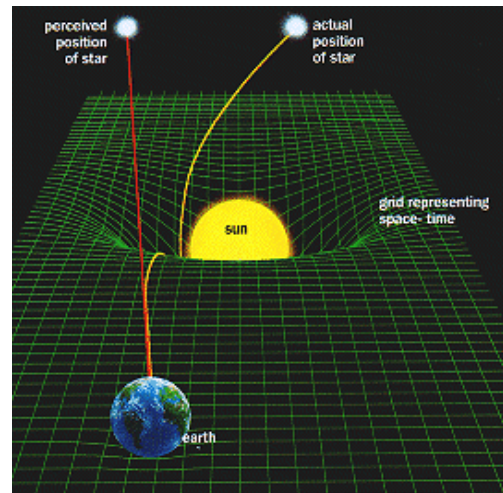
Kromming

Vrije val is dus een *inerte beweging* en dat is volgens Newton een *gelijkmatige rechte lijnige beweging*. Maar eh, een vrije val is toch meestal helemaal niet rechte lijnige? Gooi maar een balletje door de tuin. Kromme baan. Parabolisch. Het International Space Station is ook in vrije val zolang ze geen raketmotor aan hebben staan. Maar dat ding draait wel rondjes om de aarde (het valt er voortdurend voorbij). En de maan ook. Dergelijke overwegingen brachten Einstein op het idee dat de *ruimte* en met name ook de *tijd* (samen heet dat dan *ruimtetijd*) wel eens *onzichtbaar krom* zouden kunnen zijn. En die *kromming* is dan groter naarmate ergens meer *gravitatie* is. En die kromme *ruimtetijd* voel je dan gewoon als rechte lijnig. Zoals de ISS-astronauten niet vóelen dat ze om de aarde draaien en wij voelen ook helemaal niet dat we met de aarde om de zon draaien. Het ISS en de aarde zijn in *inerte beweging*.

En die *kromming* is eigenlijk *vervorming*, dat is een iets algemenere term.



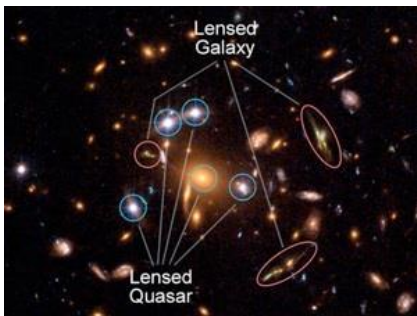
Door de vervorming van de ruimtetijd is de baan van een object gekromd, vaak zelfs een gesloten curve



Door de vervorming van de ruimtetijd is de baan van een lichtstraal gekromd, wat leidt tot lenswerking

Door die *ruimtetijd*kromming draait in het heelal van alles om elkaar. Maar de *kromming* van de baan van een of ander object is niet hetzelfde als de *kromming* van de *ruimtetijd*, het is er een gevolg van. Soortgelijk als wanneer je met de ene helft van een auto door een kuil rijdt. Dan wil ie een kleine bocht maken. En door de *ruimtetijd*kromming wordt zelfs het licht afgebogen, hoewel die lichtstraal zelf denkt dat ie gewoon rechtdoor gaat. En dat denken wij ook en daardoor zien we een ster schijnbaar iets verder van de zon af staan dan in werkelijkheid. Dat laatste is in 1919 tijdens een zonsverduistering vastgesteld.

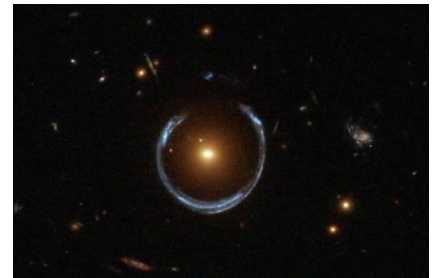
En zo werken ook *gravitatielenzen*. Een heel zwaar object buigt dan het licht van iets wat daar achter staat en dat kan nogal asymmetrisch gebeuren:



3 x hetzelfde sterrenstelsel,
5 x dezelfde quasar



Het z.g. Einsteinkruis,
4 x dezelfde quasar



Een zogeheten Einsteinring
(LRG 3-757)

Tijdrek

Afijn, we hadden in de *speciale relativiteitstheorie* al het vreemde gezien dat jouw en mijn *tijd onzichtbaar scheef* konden lopen en nu kunnen die ook nog eens *onzichtbaar krom* zijn! Maar die *onzichtbare scheefheid* is volkomen symmetrisch tussen jou en mij omdat die rechtlijnig is, terwijl deze *onzichtbare kromming* meestal asymmetrisch is. En met die asymmetrie loste Einstein de *tweelingparadox* op. Dankzij het *equivalentieprincipe* treedt *ruimtetijdromping* dus ook op als je een *versnelling* ondergaat. Miepje onderging de *versnellingen* en *vertragingen* bij vertrek, omkeer en aankomst waardoor zij dus in een *gravitatieveld* was en Jantje niet. De *ruimtetijdromping* waar ze zelf niks van merkte was dus niet op Jantje van toepassing.

Ondertussen zal het wel zo zijn dat je niet meer gauw verbaasd bent: als je iets vierdimensionaals, de *ruimtetijd*, vervormt, dan leidt dat tot afstandsveranderingen, ook in de *tijd*, dus die *ruimtetijdromping* zorgt óók voor een *tijdrek*. Maar nu alleen voor Miepje en niet voor Jantje.

En dat geldt ook voor André Kuipers. Bij de *versnellingen* en *vertragingen* tijdens lancering en terugkeer is de symmetrie tussen hem en ons verbroken. Hij is écht 5 ms minder verouderd.

En hoe groter de *gravitatie* of *versnelling*, hoe groter de **gravitationele tijdrek**. Dat betekent voor GPS dat de **tijddilatatie** en de **gravitationele tijdrek** elkaar tegenwerken, er is daar ginds minder *zwaartekracht* dus lopen de atoomklokken in die satellieten sneller dan hier op aarde. Maar het netto effect is veel groter dan het eerder genoemde verloop van 90 m/h dat alleen door **tijddilatatie** zou ontstaan: als de atoomklokken in de GPS-satellieten niet voor beide effecten waren gecorrigeerd zouden ze samen een verloop opleveren van ruim elf kilometer per dag = 475 meter per uur!

In de loop van een mensenleven ontstaat er tussen hoofd en voeten een *leeftijdsverschil* van ongeveer een tien miljoenste seconde, waarbij het hoofd het oudst wordt. Het zou een fluitje van een cent zijn om dat vast te stellen als bij de geboorte in hoofd en voeten atoomklokken werden geïmplant. Met de laatste generatie atoomklokken is de **gravitationele tijdrek** aangetoond voor een hoogteverschil van vijf centimeter!

Kracht per massa

Feitelijk gebeurt e.e.a. als je uit een *inerte beweging* wordt gedwongen. In plaats van de *versnelling* of *gravitatie* is het dus eigenlijk de uitgeoefende **kracht per massa** die voor deze effecten zorgt. Bij *versnelling* komt dat op hetzelfde neer (2^e wet van Newton), maar in een gravitatieveld gebeurt het dus pas als je in dat veld "in rust" bent, ofwel stilstaat. Je vrije val wordt dan belemmerd door bijvoorbeeld de *veerkracht* van stoelzitting en aardbodem en die moet je delen door jouw *massa*. In vrije val, oftewel *inerte beweging*, is er niets aan de hand.

Tijddilatatie & Lorentzcontractie

- ik/jij-symmetrisch;
- komt door rechte lijnige *tijdscheefheid* a.g.v. onderlinge *snelheid*.

Gravitationele tijdrek & lengtecontractie

- ik/jij-asymmetrisch;
- komt door *ruimtetijdromming* a.g.v. *versnelling* of *gravitatie*.

N.B. de *tijddilatatie* wordt ook vaak *tijdre*k genoemd, wat ik geen goede woordkeuze vind. Weliswaar wordt de *tijd* van de ander uitgerekt, maar die vlag dekt de lading niet goed. En de *gravitationele tijdre*k wordt bijna altijd ook *tijddilatatie* genoemd. Dat is m.i. helemaal fout, want het gaat ten eerste om *kromming* en niet om "latatie" en ten tweede komt *dilatatie* van *dī = twee* en *latus = zijkant*. De *gravitationele tijdre*k is asymmetrisch. Slechts één der waarnemers ondervindt een *kracht*. Miepje.

Contractie

Hoe zouden we *ruimtetijdromming* kunnen achterhalen? Stel, we nemen een touw van 10 000 km dat aan elk uiteinde een lus heeft. De ene lus doen we om een paal die precies op de Noordpool staat, dan lopen we 10 000 km daar vandaan zodat het touw strak staat en met een potlood in de andere lus tekenen we helemaal rondlopend een cirkel terwijl we het touw strak houden. Dan zijn we reeds na 40 000 km terug bij het beginpunt en niet pas na $2\pi r = 62\,832$ km. Op 10 000 km van de Noordpool hebben we namelijk precies de hele evenaar rondgewandeld (vergeet de oceanen even)! De omtrek van de cirkel klopt niet met de straal. Met de oppervlakte van de cirkel (πr^2) is het soortgelijk. De meetkunde klopt niet meer. Dááruit kun je de kromming van het aardoppervlak afleiden. Op een soortgelijke manier kloppen de straal van de aarde en de oppervlakte ook niet met de formule voor de oppervlakte van een bol: $4\pi r^2$. En zo is de straal van de aarde anderhalve millimeter te kort! Maar dat kunnen we niet meten, alleen uitrekenen.

Die kortere straal betekent dus dat de *ruimtetijdromming* zich manifesteert als **gravitationele lengtecontractie**. Lijkt een beetje op de **Lorentzcontractie**, maar dan asymmetrisch tussen jou en mij. En deze **gravitationele lengtecontractie** werkt alleen in de richting van het *gravitatieveld* dan wel de *versnelling*. Een onsamendrukbare en onrekbare staaf, die dus geen *lengteverandering* ondergaat door zijn eigen *gewicht* (dat is immers een *kracht*), is staand korter dan liggend doordat de ruimte zelf contraheert. Een staaf van één meter ondergaat bij rechtop zetten een **gravitationele lengtecontractie** van ca. 0,7 miljoenste millimeter, ongeveer twee keer de diameter van een ijzeratoom (of welk bekend metaal dan ook). Maar hoe moet je dat meten? De liniaal ondergaat immers precies dezelfde contractie...

Zwaartekrachtswet

Heeft Einstein nou met zijn *ruimtetijdromming* de zwaartekrachtswet van Newton ontkracht? Integendeel! Voor niet al te grote *massa*'s komen een boel dingen in Einsteins formules zo dicht bij *nul*

dat ze niet meer meetellen, en wat je dat overhoudt is precies Newtons zwaartekrachtswet. Die heeft hij eigenlijk dus juist bevestigd! Maar hij heeft er een verfijning aan gegeven met een tamelijk lastig stuk wiskunde. En hoe meer *massa* hoe groter de *ruimtetijdromming* in de omgeving daarvan. En dat kan dan zodanig uit de hand lopen dat Newtons zwaartekrachtswet niet meer klopt.

Einstein voorspelde de afbuiging van sterlicht dat vlak langs de zon gaat en dat werd in 1919 precies gemeten tijdens een zonsverduistering. Hij verklaarde ook een tot dan toe onverklaarbare afwijking in de baan van Mercurius (de z.g. periheliumverschuiving).

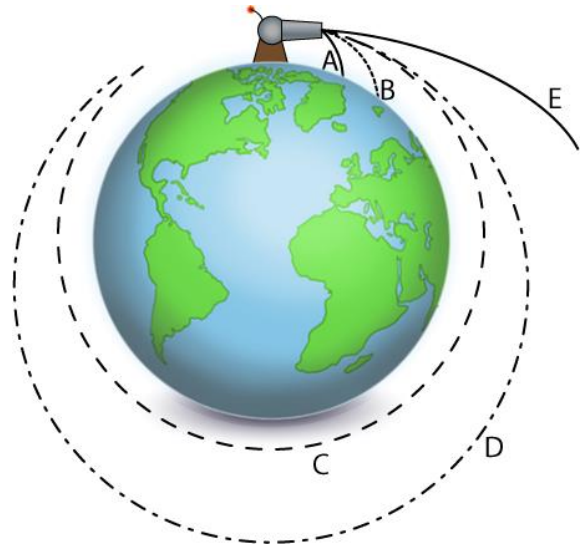
Ontsnappingsnelheid

Als je een steentje omhoog gooit valt het terug. Als je het harder gooit komt het een stuk hoger, maar het valt weer terug. Met nóg harder gooien komt het nóg hoger, maar valt toch weer terug. Hoe harder je gooit, hoe hoger het komt, en uiteindelijk gooi je het zó hard dat 't ruimschoots het heelal bereikt en nooit meer terugkomt. Het is dan aan de *zwaartekracht* van de aarde ontsnapt.

Als je het horizontaal gooit komt het een eind verdop weer neer. Hoe harder je gooit, hoe verder het komt. Maar als je het nu eens voorbij de horizon gooit? Dan gaat de bolvorm van de aarde een rol spelen. De grond gaat als het ware omlaag terwijl het steentje vliegt. Daardoor komt het steentje nóg verder. Als je het nu hard genoeg gooit, valt het helemaal voorbij de aarde en het zal er helemaal omheen vallen. Het steentje is een satelliet geworden.

Als je het nou nóg harder gooit zal het aan de *zwaartekracht* van de aarde gaan ontsnappen. De *bewegingsenergie* die je erin hebt gestopt wordt omgezet in *hoogte-energie* en die is op een gegeven moment groot genoeg voor een oneindige *hoogte*.

De daarvoor benodigde *minimumgooisnelheid* heet *ontsnappingsnelheid* en het maakt niet uit in welke richting je gooit (horizontaal, verticaal) zolang het maar niet naar beneden is. En vergeet even de *luchtweerstand*. Gooi maar vanaf een heel hoge berg die uit de atmosfeer steekt.



Zwart gat

Hoe meer *massa* hoe groter de *ruimtetijdromming* in de omgeving daarvan. De *gravitatie* wordt sterker naarmate je dichterbij die *massa* komt. Daardoor gaan de **gravitationele tijdrek** en **lengtecontractie** uit de hand lopen. Op een bepaalde *afstand* is de *gravitatie* zo sterk dat de **gravitationele tijdrek** helemaal naar oneindig gaat. En de *ontsnappingsnelheid* is daar gelijk aan de *lichtsnelheid*. Dat betekent dat zelfs het licht er niet meer weg kan komen. En voor een naar die *massa* vallend voorwerp is dat een point of no return. Het is een ding waar je alleen maar in kunt en niet meer eruit. Het is een "éénrichtingsgat". En zelfs het licht kan er niet uit. Het is een *zwart gat* waar we dus niet in kunnen kijken omdat er geen licht uitkomt.

Maar de diameter daarvan is nogal klein voor "gewone" *massa's*. De *massa* van de aarde (diameter 12 742 km) zou moeten worden samengeperst tot een diameter van minder dan 1,8 centimeter om er een zwart gat van te maken en de zon van 1,4 miljoen tot zes kilometer.

Op enige afstand zal het door de **gravitationele tijdrek** echter oneindig lang duren voordat je er iets helemaal in ziet vallen. Dat laatste zie je in *jóúw tijd* dus nooit gebeuren. Maar objecten gaan vóórdát ze erin vallen door de extreme omstandigheden die er in de buurt van het *zwarte gat* heersen allerhande soorten straling uitzenden, zoals bijv. röntgen. En dát kunnen astronomen wél waarnemen.

Uitdijing

Uit Einsteins **algemene relativiteitstheorie** bleek dat het universum óf moest inkrimpen, dan wel uitdijen. Maar men veronderstelde toen nog dat het heelal in een *steady state* zou verkeren. Einstein heeft toen, min of meer ad hoc, de zogeheten *kosmologische constante* aan de theorie toegevoegd om hem daarvoor geschikt te maken. Nog geen tien jaar daarna ontdekte Edwin Hubble (naar wie de ruimtetelescoop is genoemd) dat vrijwel alle sterrenstelsels bij ons vandaan vliegen en hoe verder ze weg staan hoe harder ze gaan. Het heelal dijt wel degelijk uit. Einstein noemde de *kosmologische constante* later zijn "grootste blunder ooit". Toch laat men hem wel (met waarde *nul*) in de theorie staan, want je weet maar nooit.

Oerknal

Door die uitdijing terug te rekenen weten we dat het heelal 13,77 miljard jaar geleden met afmeting *nul* moet zijn ontstaan en dat noemen we de *oerknal* of *big bang*. Ook de *ruimtetijd* zélf is toen ontstaan en dijt sindsdien uit. Stephen Hawking zegt daarover: *It started with completely nothing*. En wat was er dan daarvoor? Tja, niets dus, helemaal niets en zélf s dát niet. Ook geen *ruimte* en ook geen *tijd*, dus de term "daarvoor" is gewoon niet van toepassing, waarmee het een zinloze vraag is. Zo iets als: *wat is er op het aardoppervlak ten noorden van de Noordpool?* Zinloze vraag. Toch is er - in geometrische zin - op de Noordpool niets bijzonders aan de hand. Er zijn mensen letterlijk overheen gestapt. En als je niet in de oerknal gelooft, wat was er dan vóór de schepping? Zelfde antwoord toch? Niets en zelfs dat niet.

De oerknal heeft een "nagalm", de *kosmische microgolfachtergrondstraling* (CMB = Cosmic Microwave Background). Die is inmiddels heel nauwkeurig geanalyseerd en er is geen enkel ander natuurverschijnsel waarbij theorie (de z.g. stralingswet van Planck) en praktijk zó goed overeenkomen als bij de CMB. De Max Plancksatelliet heeft de CMB in álle richtingen heel nauwkeurig gemeten en dat kunnen we omrekenen naar een temperatuur. Die is $2,72548 \pm 0.00057$ graden Celsius boven het absolute nulpunt (N.B. "±" betekent niet "ongeveer" maar "plus of min", het geeft de foutmarge aan). Onder- en bovengrens zijn dus 2.72491 en 2.72605. Het verschil daartussen is amper meer dan een duizendste graad. Dat impliceert dat het universum in alle richtingen nagenoeg identiek is.

Deeltjesversneller

Bij CERN, vlakbij Genève in Zwitserland, bevindt zich de LHC, de Large Hadron Collider, waarin protonen (kernen van waterstofatomen) met 299 792 455 m/s (slechts 3 m/s onder de lichtsnelheid) frontaal op elkaar botsen voor fundamenteel wetenschappelijk onderzoek. Bij die snelheid is de **Lorentzfactor** ca. 7000. De LHC heeft een omtrek van 27 km, dus een diameter van $27/\pi = 8,6$ km. Door de **Lorentzcontractie** blijft voor die protonen van deze 27 km slechts een kleine vier meter over! De breedte van een huiskamer. Maar hoe kan dat nou? Een cirkel met een diameter van acht en een halve kilometer en een omtrek van slechts vier luttele metertjes? Da's toch krom?



De "heenweg" en de "terugweg" zoals ze ook in de LHC zitten (en mijn eigen hand).

E erst even goed hierover nadenken, dan pas verder lezen.

Krom, ja, inderdaad. De protonen worden door 1232 magneten afgebogen om ze in hun cirkelvormige baan te houden. Afbuigen is een *snelheidsverandering* of *versnelling* en samen met de *protonmassa* dus een *bewegingsverandering* (en daar is volgens de tweede wet van Newton een *kracht* voor nodig). Volgens het *equivalentieprincipe* is *versnelling* ook *gravitatie*. De protonen denken dus dat ze in een *middelpuntgericht gravitatieveld* zitten. Dat levert een forse *ruimtetijdkromming* op. De daaruit voortkomende **gravitationele lengtecontractie** verkort de diameter van die cirkel van 8,6 km tot ca. 1,25 meter. Voor die protonen wel te verstaan.

En dan dit

Even terug naar de **speciale relativiteitstheorie**. Je weet dat *tijd* maal *snelheid* een *afstand* oplevert, toch? Als ik nu eens de *tijd* vermenigvuldig met de *lichtsnelheid*, een natuurconstante, dan krijg ik een of andere afstand die ik de *taaid* noem. Gewoon uit te drukken in meters. Maar even goed bruikbaar als tijdmaat. Elke *tijdsduur* is dan een *afstand* in de *taaid*. En onze permanente reis door de *tijd* is dan ook een reis door de *taaid*. Heb jij je, net als Einstein, wel eens afgevraagd hoe het zou zijn om met de *lichtsnelheid* te reizen? Welnu, gezien de net gegeven definitie van de *taaid* reizen wij allemaal met precies de *lichtsnelheid* in de *richting* van de *taaid*. En dat is een gewone *afstand*. Maar, eh, in welke *richting* is dat dan? Nou, doordat we met de *lichtsnelheid* door de *taaid* reizen is de *afstand* in de *taaid* helemaal tot *nul* geLorentzcontraheerd en dan kunnen we die *richting* niet meer aanwijzen. Het is een *onzichtbare richting* geworden. De *onzichtbare richting* van de *taaid*, dus ook van de *tijd*. Dus hoe is het om met de *lichtsnelheid* te reizen? Wel, dat is gewoon onze tijdbeleving. En we weten niet waar we naar toe gaan...

Samengevat

We m eten altijd dezelfde *lichtsnelheid*, ondanks de *beweging* van de aarde om de zon. Einstein beschouwde daarom de *lichtsnelheid* als een natuurconstante die voor jou en mij altijd dezelfde waarde heeft. Gevolg daarvan is dat **d e tijd** niet bestaat, maar wel *jóuw tijd* en *míjn tijd*. Als we elkaar met zéér grote *snelheid* passeren gaan die als het ware scheef uit elkaar lopen. Daardoor zien we allebei dat bij de ánder  lles langzamer gaat. Dat heet **tijddilatatie**. Daardoor zijn we het ook niet meer eens over *gelijktijdigheid*. Ook ontstaat daardoor de **Lorentzcontractie**: bewegende dingen worden korter. Deze effecten zijn in het dagelijks leven onmerkbaar, maar naarmate je dichter bij de *lichtsnelheid* komt worden ze steeds groter, totdat bij precies de *lichtsnelheid* de **tijddilatatie** zorgt voor complete schijnbare stilstand van de *tijd* van de ander en **Lorentzcontractie** tot helemaal *nul*. Verder kan niet, dus kun je niet sneller dan het licht. Een snelle heks is voor de stilstaande waarnemer dus langzaam en ze heeft een korte bezem.

Door de **tijddilatatie** en **Lorentzcontractie** manifesteert *energie* zich als *massa*. De omkering daarvan levert zeventien cijfers vóór de komma op en dat is de energiebron van de zon en de sterren alsmede van de kerncentrale en de atoombom.

Verder kun je geen onderscheid maken tussen *gravitatie* en *versnelling*, je vóélt alleen *krachten*. De vrije val is de natuurlijke *beweging*. *Versnelling* of *gravitatie* zorgt voor *vervorming* of *kromming* van de *ruimtetijd*. Daardoor ontstaan **gravitationele tijdrek** en **gravitationele lengtecontractie**. Ook bewegen daardoor o.a. de planeten om de zon en wordt licht afgebogen door een *massa*, zodat *gravitationele lenswerking* ontstaat. De gravitatie-effecten kunnen zo groot worden dat bij een *zwart gat* de *tijd* lijkt stil te staan en zelfs het licht er niet meer kan ontsnappen.

Tijddilatatie en **Lorentzcontractie** zijn ik/jij-symmetrisch, we zien bij elkaar dezelfde effecten; maar *gelijktijdigheid* is hierdoor juist ik/jij-asymmetrisch. De **gravitationele tijdrek** en **lengtecontractie** zijn ik/jij-asymmetrisch.

* * * * *

De wiskundige Kurt Gödel heeft bewezen dat er onbewijsbare waarheden bestaan.
Dat impliceert dat het fundamenteel onmogelijk is om álles te begrijpen.

Eigenlijk begrijpen we de dingen om ons heen helemaal niet, maar we raken eraan gewend.

Reality is merely an illusion, albeit a very persistent one.



*If I were not a physicist, I would probably be a musician.
I often think in music. I live my daydreams in music.
I see my life in terms of music.*

A. Einstein.

Voor de liefhebbers toch maar even wat essentiële formules.

De *lichtsnelheid* is een *natuurconstante* blijktens de Maxwellvergelijkingen:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2\,99\,792\,458 \text{ m/s}$$

Elektriciteit en magnetisme betreffen *krachten op afstand* en ϵ_0 en μ_0 zijn *natuurconstanten* die aangeven hoe gemakkelijk die krachten door het vacuüm, de lege ruimte, heen kunnen "prikken". Ze zijn onafhankelijk van jouw of mijn snelheid en daarmee is de lichtsnelheid dat ook.

Speciale relativiteit:

t_J, l_J = *tijdsinterval, lengte* zoals stilstaande waarnemer (Jantje) die meet/ervaart

t_M, l_M = *tijdsinterval, lengte* zoals bewegende waarnemer (Miepje) die meet/ervaart

v = hun onderlinge *snelheid* (is voor beiden gelijk)

Tijddilatatie:
$$t_J = t_M / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Lorentzcontractie:
$$l_J = l_M \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Snelheidsoptelling:
$$u = \frac{v+w}{1 + \frac{v \cdot w}{c^2}} = \textit{balsnelheid}$$
 zoals stilstaande waarnemer die meet

waarbij: v = *voertuigsnelheid* van waaruit een balletje vooruit wordt gegooid
 w = *werpsnelheid* t.o.v. voertuig, gezien vanuit voertuig

Algemene relativiteit:

t_J, l_J = *tijdsinterval, lengte* zoals inerte waarnemer die meet/ervaart

t_M, l_M = *tijdsinterval, lengte* zoals accelererende of gravitatie ondervindende waarnemer die meet/ervaart

r, M = *afstand tot en massa* van een massapunt

G = *Gravitatieconstante* uit zwaartekrachtswet van Newton = $6.674\,08 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$

Ontsnappingsnelheid:
$$v_E = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$
 zowel klassiek als relativistisch

Schwarzschildstraal:
$$r_S = \frac{2GM}{c^2}$$
 = halve *diameter* van een zwart gat

Gravitationele tijdrek:
$$t_J = t_M / \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} = t_M / \sqrt{1 - \frac{r_S}{r}} = t_M / \sqrt{1 - \frac{v_E^2}{c^2}}$$

Grav. lengtecontractie:
$$l_J = l_M \cdot \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} = l_M \cdot \sqrt{1 - \frac{r_S}{r}} = l_M \cdot \sqrt{1 - \frac{v_E^2}{c^2}}$$

Zie je de overeenkomst tussen de algemeen-relativistische en de speciaal-relativistische formules?

In een homogeen zwaartekrachtveld geldt:
$$t_J = t_M \cdot e^{\frac{gh}{c^2}} \approx t_M \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right)$$

Hierin is g de *versnelling* van de *zwaartekracht* en h het *hoogteverschil*. Maar g kan ook de ondergane *versnelling* zijn door een motor (of rem) en dan is h het *afstandsverschil* in die richting, ofwel de tijdens die *versnelling* door Miepje afgelegde *afstand* zoals Jantje die meet, waarmee de tweelingparadox wordt opgelost.

* * * * *