

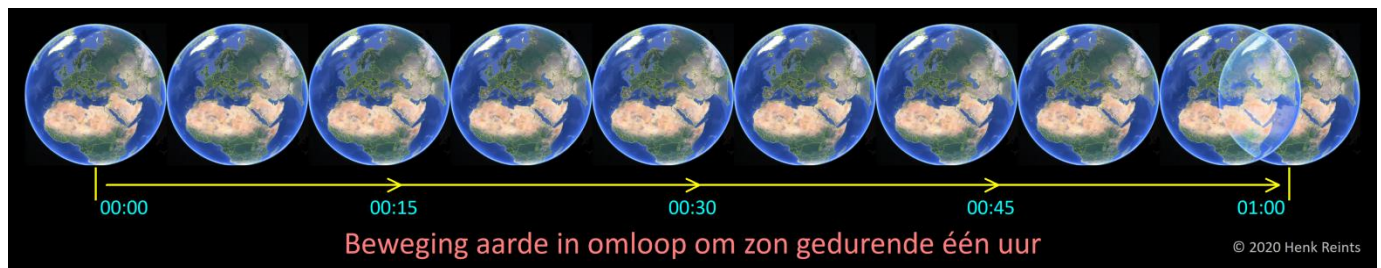
0. Ervaring

Albert Einstein gebruikte vaak de term *ervaring*. Slechts één woord maakte duidelijk dat hij zich baseerde op waargenomen verschijnselen zonder iets uit de lucht te plukken. Hij heeft niets bedacht, maar geconcludeerd uit onbetwistbare feiten.

1. Ervaringsfeit

Jij weet toch ook uit eigen ervaring dat je in de auto of trein bij elke snelheid alles op precies dezelfde manier moet doen? En de kindertjes moeten op de achterbank toch *stilzitten* terwijl de auto met honderdtwintig over de snelweg raast? En denk bijv. eens aan een ideale hogesnelheidstrein die perfect strak en rechtlijnig rijdt met 300 km/h, zonder horten of stoten en geen geschommel of zo. Maar tijdens een stationnement staat ie natuurlijk stil. Maakt geen donder uit. In die trein flikt een jongleur zijn kunstje in beide situaties op identieke wijze. Ook de richting waarin die trein rijdt is totaal niet relevant. Zijn collega in een tegemoetkomende trein doet het precies net zo. Zowel de eigen snelheid als die van de ander zijn volkomen onbelangrijk.

En wat dacht je van de aarde die om de zon draait? Wat je wellicht nog niet wist is dat ze dat doet met een snelheid van 107 208 km/h. Jawel, honderdzevenduizend kilometer per uur. Acht komma vier keer haar eigen diameter in slechts één uur:



Ja, zo hard gaan we om de zon heen! Voel je níets van, toch? En heb je in de gaten dat we een half jaar geleden met diezelfde rotvaart helemaal de ander kant op gingen? Maar toen werd er toch precies net zo gebiljart en gepingpongd als vandaag? Alles ging toch precies net zo? Snelheid heeft duidelijk géén invloed op hoe de dingen werken.

Snelheid is hoe vlug een afstand verandert en een afstand is altijd tussen twee punten, waarvan jij er slechts één bent. Het andere is een of ander DING. Snelheid heb je dan *ten opzichte van* dat ding. Die trein heeft een snelheid van 300 km/h *ten opzichte van* bijvoorbeeld een biel (jazeker, één biel, twee biels, het Franse *bille* = stuk uit een boomstam, Gallisch *bilia* = boomstam, ook *biljart* heeft deze oorsprong). Maar jij kunt ín die rijdende trein gewoon lopen met 5 km/h *ten opzichte van* die trein zelf. Snelheid heeft alleen betekenis *ten opzichte van* een of ander referentiepunt.

Het International Space Station draait om de aarde met ca. 27 500 km/h *ten opzichte van* het aardoppervlak, maar dat heeft voor een aankoppelende capsule geen enkele betekenis, behalve dan dat die op dat moment natuurlijk net zo hard moet gaan. Het enige wat telt is hoe vlug de afstand tussen capsule en ruimtestation verandert. Hun onderlinge snelheid dus. De snelheid van de capsule *ten opzichte van* het ruimtestation. En als dié te groot is gaat het natuurlijk fout. Soortgelijk als wanneer jij in die trein ergens tegenaan loopt. Dat doe je niet met 300 km/h, maar met 5. Stel, je geeft in de auto degene die naast je zit een klein tikje op de schouder (of een geweldige peer op z'n bakkes). Dat voelt ie op de snelweg toch net zo hard als in een woonerf?

Stel dat je aan het kaatseballen bent en er kuiert iemand voorbij. Of hij rent voorbij. Of hij zit op een racefiets. Of in een snelle auto. Of die hogesnelheidstrein raast voorbij¹. Of er vliegt een straaljager over met Mach 2. Maakt het wat uit voor hoe jij moet kaatseballen?

De natuurwetten gaan kennelijk met ons mee en je ervaart/observeert alles vanuit je eigen perspectief, waarbij het kennelijk niet relevant is hoe snel jij iets of iemand voorbij ziet komen. Dit ervaringsfeit bracht Einstein tot het

¹ Die komt zo, de rails liggen er immers al... (Eddie Buys als Wielrenner Kees Kuitjes, carnavalsconference 1971 te Helmond)

relativiteitsprincipe:

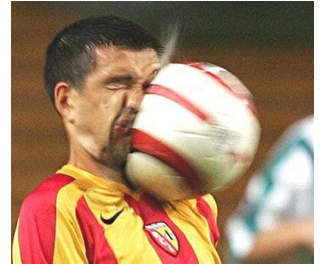
alle natuurwetten gelden voor iedereen vanuit het eigen perspectief op identieke wijze, volkomen onafhankelijk van elkanders onderlinge (relatieve) snelheid. [1]

Het heet ook wel het **eerste postulaat van Einstein**. Het komt erop neer dat iedere waarnemer het gehele universum vanuit het eigen perspectief observeert en dat de natuur zich aan iedereen op identieke wijze manifesteert. En hoe snel iets of iemand jou passeert heeft geen invloed op hoe jij dingen moet doen.

Verder zijn alle waarnemers volkomen gelijkwaardig; iedereen ziet het correct en heeft evenveel gelijk, zelfs als er schijnbare verschillen opduiken. Dat is dan slechts een verschil in perceptie van hetzelfde verschijnsel.

2. Meerdere snelheden

Stel dat je aan de wandel bent en een kwajongen gooit voor de lol een hard balletje tegen je voorhoofd. Natuurlijk ~~scheld je hem helemaal~~ geef je hem een ~~repriman~~ positieve feedback. Paarden voor de zwijnen, want terwijl je verder loopt krijg je het ook nog een keer tegen je achterhoofd. Die kwal gooit beide keren precies even hard, maar voor jou is de klap van voren duidelijk harder dan die van achteren. Jij ervaart twee verschillende balsnelheden *ten opzichte van* je hoofd. Dat komt doordat jij een (loop)snelheid hebt *ten opzichte van* die snotaap. En die gooide dat balletje met een snelheid *ten opzichte van* zichzelf. Als je nou die loopsnelheid en die gooisnelheid bij elkaar telt weet je hoe hard dat balletje tegen je voorhoofd komt. En als je het verschil neemt geeft dat de snelheid tegen je achterhoofd. Het optellen of aftrekken van snelheden heet Galileitransformatie (*ga-lie-lè-ie* met de *g* als in het Engelse *go*).

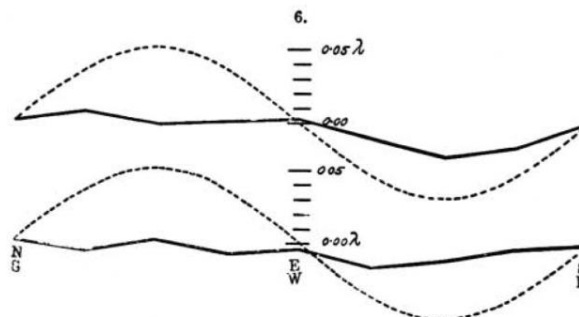


Jouw hoofd (bol) was in dit voorbeeld dus in beweging met twee verschillende balsnelheden als resultaat. Een andere bewegende bol is de aarde die rondom de zon wandelt met zoals gezegd ruim honderdduizend km/h. Dat is bijna 30 kilometer per seconde. Dat is natuurlijk gelijk aan de omtrek van de baan van de aarde gedeeld door een jaar. Maar *ten opzichte van* wat is die snelheid eigenlijk? Wel, dat is *ten opzichte van* de sterren die zich - in astronomische zin - in onze nabijheid bevinden. En die sterren gooien geen balletjes, maar wel lichtstralen naar ons toe. Zowel van voren als van achteren. Uiteraard komen die van voren dan wat harder aan dan die van achteren, nietwaar?

3. Lichtsnelheid

Inderdaad, niet waar! Want wat bleek in 1887? We meten helemaal geen enkel verschil in de lichtsnelheid, of we nou vooruit of achteruit meten of opzij. Overigens werd met het betreffende experiment, de proef van Michelson & Morley, niet echt het sterrenlicht gemeten, het zat wat ingenieuzer in elkaar. En de snelheid van de aarde is ongeveer een tienduizendste van de lichtsnelheid, wat dus met vooruit + achteruit een verschil van één op vijfduizend zou moeten opleveren. Kon ook in 1887 goed worden gemeten, hoor!

The results of the observations are expressed graphically in fig. 6. The upper is the curve for the observations at noon, and the lower that for the evening observations. The dotted curves represent *one-eighth* of the theoretical displacements.



Het meetresultaat van Michelson & Morley. Met metingen 's middags en 's avonds gebruik je de aswenteling van de aarde om in twee loodrechte richtingen te meten. De getrokken lijnen verbinden de feitelijke meetwaardes, de gestippelde curve is wat er werd verwacht. Die moet eigenlijk acht keer zo ver heen en weer slingeren als getekend! Het meetresultaat mag je dus doodgewoon gelijkstellen aan nul komma nul.

We meten in álle richtingen altijd identiek dezelfde lichtsnelheid! Ook een half jaar geleden, toen we met de aarde helemaal de andere kant op gingen. Zelfde lichtsnelheid. Hoe kan dat nou? Jij mat met je bewegende bol toch duidelijk twee verschillende balsnelheden, maar op onze bewegende aardbol meten we maar één lichtsnelheid. Niemand snapte dat.

En toen kwam in 1905 ene Albert Einstein ten tonele, maar die snapte het ook niet. En hij deed geen enkele poging om het te verklaren met een of andere veronderstelling, maar hij trok er een conclusie uit door te redeneren: als het nu eenmaal zo is dat we altijd dezelfde lichtsnelheid meten dan is dat een ervaringsfeit, en als iets uit ervaring altijd dezelfde waarde heeft is het kennelijk een constante. Daarmee kwam hij tot het

principe van de constantheid van de lichtsnelheid:

de lichtsnelheid is een universele constante met voor elke waarnemer dezelfde vaste waarde, onafhankelijk ervan of de lichtbron ten opzichte van die waarnemer stilstaat of met welke snelheid dan ook in beweging is. [2]

Het heet ook wel het **tweede postulaat van Einstein**. Het volgt rechtstreeks uit het ervaringsfeit. Hij ging geen veronderstellingen doen over het ongewisse, maar hij startte met een zekerheid, namelijk het keiharde feit dat we altijd dezelfde lichtsnelheid meten. Hij vroeg zich niet af hoe dat kon, maar wat hij er zelf mee kon. En heb je in de gaten dat dit tweede postulaat een natuurwet is? Valt dus onder het eerste postulaat! Samen zeggen [1] en [2] dus:

De lichtsnelheid heeft voor alle waarnemers onder alle omstandigheden identiek dezelfde waarde, ongeacht hun snelheid ten opzichte van elkaar en ongeacht de snelheid van de lichtbron ten opzichte van elk van hen. Bij élké onderlinge snelheid geldt voor beide precies dezelfde lichtsnelheid, zelfs als dat één en dezelfde lichtstraal betreft. [3]

Is gewoon zo. Volgt uit de ervaringsfeiten. Zonder proeven of kauwen in z'n geheel doorslikken. Niet proberen te snappen of "verklaren" vanuit een veronderstelling, maar gaan kijken wat het te betekenen heeft. Wat er dan uit komt is nog steeds een voortvloeiende uit de ervaringsfeiten en dat moet je dan dus als waar en correct beschouwen. Het zou relativiteitsconclusie moeten heten.

4. Veritas temporis filia

Wat je nu in je hoofd moet zien los te wrikken is het vastgeroeste idee dat je snelheden altijd gewoon kunt optellen en aftrekken, de genoemde Galileitransformatie. Uit [3] volgt immers dat dat niet klopt als de lichtsnelheid in het geding is. Je zou verwachten dat wij, als we elkaar met een rotgang passeren, elk onze eigen lichtsnelheid meten, zoals we ook onze eigen balsnelheid zouden meten, maar dat is dus kennelijk niet zo.

Als wij elkaar passeren zie ik natuurlijk vanuit mijn eigen perspectief dat jij voorbijkomt met een of andere snelheid *ten opzichte van* mijzelf, terwijl jij vanuit jouw eigen perspectief ziet dat ik met diezelfde snelheid *ten opzichte van* jou voorbijkom, alleen de andere kant op. En nu komt er een lichtstraal tussen ons door waarvan we conform [3] identiek dezelfde snelheid meten. Maar het verschil in ons perspectief zal toch wel degelijk op de een of andere manier tot uiting moeten komen?



Wat is snelheid ook alweer? Hierboven had ik gezegd dat snelheid neerkomt op hoe vlug de afstand tussen twee dingen verandert. Het ene ding heeft dan die snelheid *ten opzichte van* het andere. Met *hoe vlug verandert* wordt natuurlijk bedoeld hoeveel die afstand verandert in een bepaalde tijd.

Hmm, tijd? De titel van dit hoofdstuk betekent: *De waarheid is de dochter van de tijd* (lijfspreuk van Mary Tudor). Dan is tijd de moeder van de waarheid.

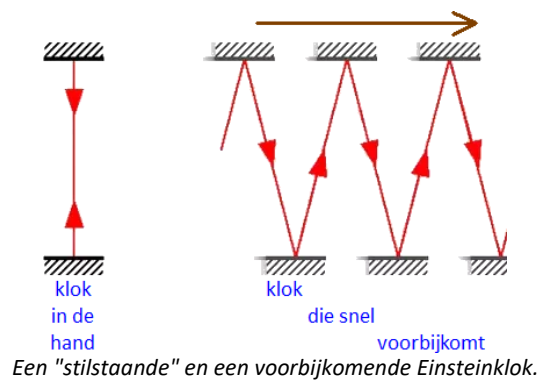
Quid est ergo tempus? Si nemo ex me quærat, scio; si quærenti explicare velim, nescio.
Wat is dan tijd? Als niemand het me vraagt, weet ik het; maar als ik het wil uitleggen, weet ik het niet.

Aurelius Augustinus Hipponensis, 354-430CE, Confessiones 11.14.

Zou het misschien kunnen dat dat ongrijpbare wat we *tijd* noemen voor jou en mij niet precies één en hetzelfde is? Dit tart natuurlijk je voorstellingsvermogen, maar ja, dan had je maar een vak moeten leren...

Zullen we eens kijken of we een klok kunnen ontwerpen die is gebaseerd op een natuurconstante, en wel de lichtsnelheid? Wel, denk eens aan een totaal onvervormbare staaf met aan beide uiteinden een spiegel. Die twee spiegels zijn exact op elkaar uitgelijnd en er gaat een heel kort stukje lichtstraal tussen heen en weer. Dat blijft het vanzelfsprekend doen tot St. Juttemis. En wel met de lichtsnelheid, want het is immers licht. Nu noemen we de ene spiegel *tik* en de andere *tak*. Klaar!

Zo iets heet een *Einsteinklok*. En zo'n heel kort stukje lichtstraal noemen we een *foton*. En de oversteektijd van dat foton is natuurlijk de tiktijd van die Einsteinklok. Die hangt vanzelfsprekend uitsluitend af van de - onveranderlijke - lengte van die staaf en van de lichtsnelheid, die dus volgens [2] een universele constante is. Die tiktijd heeft dus ook een constante vaste waarde, zoals het een goede klok betaamt. En om hem goed te kunnen aflezen zonder perspectivische vertekening hou je die altijd precies dwars.



En nou zie ik jou met je dwarse Einsteinklok met heel grote snelheid voorbijkomen. Jij ziet dat foton precies loodrecht oversteken in de net beschreven tiktijd. Maar als jouw snelheid *ten opzichte van mij* nou bijvoorbeeld een kwart of de helft van de lichtsnelheid zou zijn, dan zie ik dat foton natuurlijk hartstikke scheef oversteken, want gedurende die oversteektijd reis jij gewoon verder. En wat heb je op de basisschool geleerd omtrent schuin oversteken? Dan is de oversteekafstand groter en daar heb je meer tijd voor nodig en dan bevind je je dus langer op die o zo gevaarlijke straat.

En dan zie ik dat foton in jouw Einsteinklok dus schuin oversteken met... precies dezelfde lichtsnelheid als waarmee jij dat ziet gebeuren. Maar door die schuine oversteek zie ik het een grotere afstand afleggen dan wat jij ziet. En met dezelfde snelheid doe je over een grotere afstand dus langer. Precies hetzelfde foton tussen precies dezelfde spiegels heeft vanuit mijn perspectief kennelijk meer tijd nodig dan vanuit het jouwe. Dát is het effect van die constante lichtsnelheid. We meten niet meer dezelfde tijd. Daar zul je wellicht even aan moeten wennen.

Om dat te meten heb ik net zo'n Einsteinklok als jij, helemaal hartstikke identiek, en die heeft dus precies dezelfde - vaste - tiktijd als de jouwe. Maar wanneer ik jouw foton in jouw klok tegen jouw takspiegel zie botsen is het mijne in mijn klok al lang weer op de terugweg naar mijn tikspiegel. Voor mij heeft jouw klok dus een grotere tiktijd dan de mijne, en omdat we identieke klokken hebben is de tiktijd van jouw klok voor mij dus ook groter dan voor jouzelf!

Maar het wordt nog erger. Zie je de symmetrie in het scenario waarin we elkaar passeren? Denk dat we door de ruimte vliegen en behalve wij tweeën is er verder niets. Gezellig! Allebei zitten we zelf stil in ons eigen raketje terwijl we de ander met een rotgang voorbij zien komen. En we zijn in ons ruimtepak natuurlijk niet individueel herkenbaar. Hou dat scenario eens voor de spiegel. Zie je verschil? Ik niet. Maar dan geldt vanuit jouw perspectief toch precies hetzelfde als vanuit het mijne? Wij zijn volkomen gelijkwaardig (hoewel ik natuurlijk wel gelijkwaardiger ben dan jij...). Zoals jouw tiktijd voor mij groter is, zo is mijn tiktijd voor jou dus ook groter! Huh? Ja! Ik zei toch dat het je voorstellingsvermogen zou tarten? We zijn het totaal niet meer eens over onze wederzijdse tijdwaarnemingen. Het is echter een volkomen logisch gevolg van [3], wat op zijn beurt volgt uit ervaringsfeiten.

Het enige wat voor jou of mij telt is het eigen perspectief. Wat een ander ziet is zijn pakkie-an en voor jou per saldo niet relevant, hoe ver het ook afwijkt van wat jij zelf ziet. Elke waarnemer kijkt uitsluitend met de eigen ogen. Voor mij is de wereld zoals ik hem zie, voor jou is die zoals jij hem ziet.

De essentie is dat we niet meer dezelfde tijd ervaren als jij mij met een heel grote snelheid passeert. Voor mij verstrikt er dan meer tijd tussen jouw kloktikken en voor jou verstrikt er dan meer tijd tussen mijn kloktikken.

En in plaats van een paar kloktikken kan het natuurlijk een willekeurig tweetal opeenvolgende gebeurtenissen zijn die zich afspelen bij de passant. Zelf denk ik bijvoorbeeld altijd aan ~~sek~~ lichtflitsen.

5. Topsnelheid

En dan dit. Jij zit naar jouw eigen dwarse Einsteinklok te kijken en ziet hoe dat foton lekker op en neer gaat... Ik zie zo iets natuurlijk ook graag dus ik volg het met belangstelling, maar jij komt mij met een ontzaglijke snelheid razendsnel voorbij. Volgens [1] heeft dat echter op jou en jouw klok geen enkel effect.

Stel nu dat jij sneller gaat dan het licht. Dan nog heeft dat volgens [1] geen invloed. Maar volgens [2] heeft jouw foton voor mij doodgewoon dé lichtsnelheid. Het kan niet anders, want het is licht. En jij met je klok gaat dus sneller. Ook de spiegel waarnaar dat foton onderweg is. Maar dan kan dat foton hem toch nooit bijhouden? Ik zie die spiegel harder gaan dan dat foton. Jij niet, je houdt die klok immers in je hand. Vanuit mijn perspectief zal dat foton die spiegel dus helemaal nooit kunnen raken, terwijl jij het er gewoon tegen ziet terugkaatsen.

Me dunkt dat dat een heftige contradictie is: jij ziet hem op en neer ketsen, terwijl ik zie dat ie daar nooit mee klaarkomt.

De logica zegt dat een uitgangspunt dat tot een contradictie leidt onmiddellijk en onverbiddeijk moet worden verworpen. Het hierboven gebruikte uitgangspunt was: *Stel nu dat jij sneller gaat dan het licht*. Dat verwerpen we dus. Hupsakee, weg ermee! Uit [3] volgt onomstotelijk dat *sneller dan het licht* een illusie is. Het ene simpele feit dat de lichtsnelheid voor jou en mij onder alle omstandigheden identiek dezelfde waarde heeft maakt het onmogelijk. En het volgt keihard uit de ervaringsfeiten.

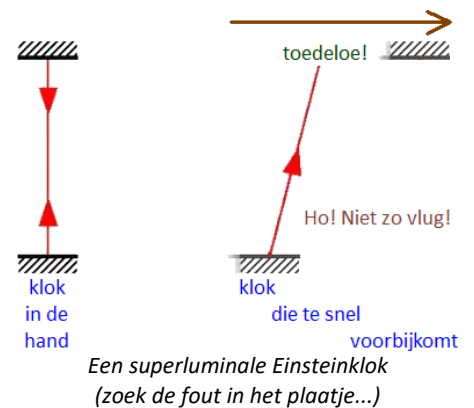
Het idee van sneller dan het licht kwam ook eigenlijk zo maar uit de lucht vallen. Het was slechts een gedachte, waarvan de correctheid nog nooit is aangetoond. Als jij zou moeten bewijzen dat het überhaupt mogelijk zou zijn, zou je met de mond vol tanden staan. En de wedervraag: "Waarom niet?" heeft geen enkele bewijskracht. Sterker nog, die heb ik net beantwoord: omdat het tot een contradictie leidt.

6. Individualiteit

Het is nu inmiddels duidelijk dat onze tijdwaarnemingen van elkaar afwijken als we elkaar met grote snelheid passeren. Hoe groter de onderlinge snelheid, des te groter wordt ook die afwijking, omdat je het foton van de ander steeds schuiner ziet oversteken. Als de onderlinge snelheid veel kleiner is dan de lichtsnelheid valt er van die schuinite zo goed als niets te bespeuren, dus in het dagelijks leven merken we er helemaal niets van.

Hoewel, de atoomklokken in de GPS-satellieten, het Global Positioning System waar ook jónw navigatiesysteem gebruik van maakt, zijn ervoor gecorrigeerd volgens de formules van Einstein. Hadden ze dat niet gedaan dan zou de positiebepaling een verloop hebben gehad van 480 meter per uur²! Als je dan om zeven uur thuis vertrekt voor je verenigingsavond zul je na afloop om half elf geheel verdwalen, want jij bent er natuurlijk ook zo een die zonder navigatiesysteem z'n eigen huis niet meer weet te vinden en dan maar klakkeloos pardoos van een trap af de Maas in rijdt omdat dat ding nou eenmaal zei dat je rechtsaf moest... Maar dankzij die zogeheten relativistische correctie is de afwijking van GPS in 95% van de gevallen minder dan 8 meter, zodat het die trap feilloos weet te vinden...

Doordat we in het dagelijks leven met onze eigen zintuigen helemaal niets merken van die tijdafwijking - we hebben immers alleen maar snelheden die véél kleiner zijn dan die van het licht - heeft homo sapiens reeds lang geleden het idee gekregen van dé tijd, maar dat is dus kennelijk fout. Het universum heeft géén masterklok, tijd is níét iets universeels wat voor jou en mij identiek is. We hebben elk onze eigen tijd en dat is niet biologisch of psychisch, maar fundamenteel. Het geldt voor elke entiteit die je als een samenhangend "ding" kunt aanmerken. Jij, ik, een rotsblok dat door de ruimte vliegt of een hele planeet, een luchtdeeltje, een subatomaire deeltje, noem maar op. Elk ding heeft zijn eigen tijd. En jouw en mijn tijd kunnen blijkens bovenstaande dus uiteenlopen.



² Dit is het totale verloop inclusief een relativistisch effect dat nog helemaal niet is behandeld. Het verloop als gevolg van alleen maar de snelheid van de satellieten is 90 meter/uur. De overige bijdrage aan dit verloop leg ik veel verderop pas uit. Die heeft overigens een tegenovergesteld effect en wel van 570 m/h. De genoemde 480 is dus 570 - 90.

7. Tijddilatatie

We hebben dus elk onze eigen tijd en dé tijd bestaat helemaal niet. Dit moet je even heel goed tot je laten doordringen, dus lees die zin nog maar een keer. Je móét vanaf nu redeneren in termen van *jouw* tijd en *mijn* tijd en in gedachten nogal eens van perspectief wisselen. Als je per abuis toch weer even terugvalt op het idee van dé tijd zit je d'r prompt naast. Trap af, Maas in. En je moet vanaf nu bij het lezen zo ongeveer telkens de woorden jij/jou/jouw en ik/mij/mijn benadrukken, ook als er geen accenten op staan.

Dit uiteenlopen van jouw en mijn tijd heet *tijddilatatie*. Jouw en mijn tijd gaan steeds verder uiteenlopen naarmate onze onderlinge snelheid groter wordt. Je kunt de relativiteitstheorie karakteriseren met het ene woord *tijddilatatie*. En het ligt niet aan jouw of mijn klok, hoor! Dat zijn slechts meetinstrumenten die gewoon de natuurwetten gehoorzamen. En uiteraard doen ze dat conform Einsteins postulaten. Tijddilatatie is fundamenteel, het betreft het verschijnsel *tijd* zelf.

En het gaat normaal gesproken pas een rol spelen bij idioot grote snelheden. Maar het is met atoomklokken aangetoond bij loopsnelheid! Zo'n experiment komt erop neer in dat de ene atoomklok continu in beweging wordt gehouden terwijl de ander stilstaat en na vier maanden (!) verschillen ze dan één atoomtik van een tien miljardste seconde en na een jaar dus drie. Zo klein is het effect bij loopsnelheid. Ongeveer 1 : 100 000 000 000 000 000, één op honderd biljard. Geen wonder dat we er niks van merken. Maar 't is dus niet nul! En bij een kwart van de lichtsnelheid is de afwijking tussen jouw en mijn tijd ongeveer 3%, bij de helft van de lichtsnelheid ruim 15%, bij driekwart al 51%, en naarmate het dichterbij de lichtsnelheid komt gaat het helemaal uit de hand lopen richting oneindig.

Wij ervaren beide onze eigen tijd vanuit het eigen perspectief en daarmee is tijd dus relatief! En we hebben elk in onze eigen tijd een identieke tijdbeleving. Pas als we elkaar heel snel passeren zien we de tijd van de ánder afwijken, terwijl er voor die ander in z^3 eigen tijd niets aan de hand is. Zowel voor jou als voor mij is de eigen tijd altijd volkomen normaal. Zie je dat dit perfect aansluit bij [1], het relativiteitsprincipe?

Relativiteitstheorie = relatietijdtheorie.

[Zónder spaties! Bruinebonensoep!]

Uiteraard meten we snelheid oftewel *afstandsverandering in een bepaalde tijd* óók allebei in onze éígen tijd. En het gaat nu even niet om onze onderlinge snelheid, maar die van een of ander ding dat we allebei voorbij zien komen. Of jij werpt mij heel vriendelijk een zacht balletje toe, zodanig dat ik het zonder enige pijn met gemak kan opvangen. Ik word daar natuurlijk heel blij van en zal je hartelijke danken voor die aardige geste. Uiteraard meet jij de werpsnelheid in jouw tijd, maar ik meet de opvangsnelheid in mijn tijd. En naarmate onze onderlinge snelheid toeneemt, gaan jouw en mijn tijd steeds verder uiteenlopen en dan hebben de door jou en mij gemeten snelheden van dat knuffelballetje steeds minder met elkaar te maken. Dat is er de oorzaak van dat de Galileitransformatie (het stomweg bij elkaar tellen van snelheden) steeds fouter wordt naarmate de snelheden groter worden. Dat komt dus door de tijddilatatie.

Een snelheid waarbij de tijddilatatie zo groot is dat je die niet meer buiten beschouwing mag/kunt laten heet relativistisch. En zo heten ook alle merkwaardige effecten die optreden als gevolg van tijddilatatie.

8. Terug bij af

En nou zit die tijddilatatie zodanig in elkaar dat we automatisch elk in onze eigen tijd altijd precies dezelfde lichtsnelheid meten. Daarmee is de cirkel nu gesloten, we zijn terug bij de constantheid van de lichtsnelheid. Doordat Einstein het níét probeerde te verklaren vanuit een veronderstelling, maar het als uitgangspunt gebruikte, heeft hij tóch verklaard hoe het kan dat iedereen dezelfde lichtsnelheid meet! Het komt door de tijddilatatie.

We hebben elk onze eigen tijd en dé tijd bestaat niet, wel dé lichtsnelheid. Als dé tijd zou bestaan zouden we elk onze eigen lichtsnelheid moeten meten, maar doordat we al onze waarnemingen vanuit het eigen perspectief doen kunnen we - elk in onze éígen tijd - toch allebei dé lichtsnelheid meten, ook als we elkaar met een noodgang passeren.

³ Mooi genderneutral, toch?

Eigenlijk heeft de lichtsnelheid alleen betekenis voor de uiteindelijke waarnemer. De lichtbron moest gewoon even wat energie kwijt en heeft er dus eentje laten vliegen. Een foton. En daarmee was de kous af. Zoals dat andere wat men wel eens laat vliegen ook slechts voor de waarnemer nog enige betekenis heeft. Het mankement van deze laatste vergelijking is natuurlijk dat in dit geval de dader zelf ook slachtoffer kan zijn, terwijl een lichtbron het uitgezonden foton nooit meer zal kunnen observeren.

Zoals Einstein het vond en zoals alhier uitgelegd, is tijddilatatie het gevolg van de constantheid van de lichtsnelheid, maar je kunt het nu dus ook precies andersom zien. Eigenlijk is geen van beide oorzaak van het ander, ze hangen gewoon onlosmakelijk met elkaar samen. Het zijn twee aspecten van één en hetzelfde. En wat zou dát dan wel wezen? Eh, tja, moeder natuur, het universum. Zo is het nu eenmaal doodgewoon.

9. Waarnemers

Snelheid is zoals gezegd hoe vlug de afstand tussen twee dingen verandert. Dus kun je nooit een snelheid hebben *ten opzichte van jezelf*. Je staat derhalve altijd stil *ten opzichte van jezelf*. Vanuit je eigen perspectief ben je dus altijd een *stilstaande waarnemer*. Uiteraard is de passant dan een *bewegende waarnemer*, die natuurlijk vanuit zijn perspectief de stilstaande waarnemer is en dan ben jij de bewegende. Ja, ik had al aangegeven dat je nogal eens van perspectief moet wisselen. Voor beide gelden identiek dezelfde natuurwetten vanuit het eigen perspectief, inclusief de waarde van de lichtsnelheid, die een universele constante is.

Elke waarnemer is zelf de stilstaande en de andere is de bewegende. Ieder observeert uitsluitend vanuit het eigen perspectief. Je kijkt alleen met maar je eigen ogen.

10. Tijdrek

Tijddilatatie betekent dus dat alle tijdspannen tussen "gebeurtenissen" die zich voordoen bij een jou heel snel passerend "ding", zoals ze gelden in de eigen tijd van dat ding, voor jou in jouw tijd worden "opgerekt". Daarom heet tijddilatatie ook wel *tijdrek*. Dat zijn in de praktijk van de theoretische natuurkunde praktisch gelijkwaardige termen, maar theoretisch is *tijdrek* slechts hoe de *tijddilatatie* zich in de praktijk manifesteert.

En om je voorstellingsvermogen nog wat verder te tarten: *tijddilatatie* komt er op neer dat jouw en mijn tijd "scheef uit elkaar gaan lopen" en dan kun je *tijdrek* zien als de bijbehorende perspectivische vertekening. Die scheefheid neemt toe met de onderlinge snelheid. En omdat schever dan loodrecht niet kan kun je niet sneller dan het licht.

Vergelijk het schuin overstekende foton in de bewegende klok. Naarmate de klok sneller voorbijkomt zal het steeds schuiner oversteken. Dat is precies die scheefheid. Hé, nou kun je je er tóch iets bij voorstellen! En het foton zal wel degelijk die spiegel bereiken, dus die schuinte is beslist kleiner dan 90°.

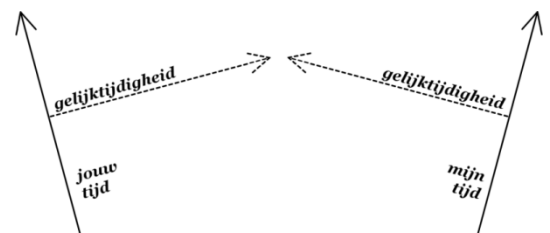
Tijdspannen die zich in de eigen tijd van de bewegende waarnemer voltrekken worden in de eigen tijd van de stilstaande waarnemer opgerekt. Nog een keer lezen. Hoe sneller de bewegende waarnemer voorbijkomt, hoe groter die tijdrek voor de stilstaande waarnemer zal zijn. Hij ziet de tijdspannen van de bewegende (in diens tijd) meer en meer opgerekt in zijn eigen tijd. Naarmate de passeersnelheid dichter bij de lichtsnelheid komt gaat die tijdrek verder en verder richting oneindig. Voor de stilstaande waarnemer dan, in zijn tijd. Voor de bewegende waarnemer is er in diens eigen tijd niets bijzonders aan de hand.

Verder is van belang dat tijdrek uitsluitend betrekking heeft op tijdspannen, tijdsduren, tijdsintervallen. Per se niet op tijdstippen. Wat denk je, zou het SOMS of VAAK gebeuren dat men zich daarin vergist?

11. Gelijktijdigheid

In een grafiek teken je lijnen die bij één tijdstip horen loodrecht op de tijdas. Dat hele tijdstip staat dus als het ware loodrecht op de tijd. En nu lopen jouw en mijn tijd dankzij tijddilatatie scheef uit elkaar. Maar dan staan die loodrechte tijdstipslijnen dus ook scheef!

Dat heeft iets merkwaardigs tot gevolg. Ik zie twee lichtflitsen (die op verschillende plekken plaatsvinden) precies tegelijkertijd, terwijl jij ze dan helemaal niet gelijktijdig ziet. Ik sta bijvoorbeeld op de stoep en daar staan lantaarnpalen. En die lantaarnpalen kunnen flitsen. Terwijl jij met een



relativistische snelheid voorbijkomt flitsen er twee lantaarns. In mijn tijd flitsen beide lantaarns precies tegelijk. In j u w tijd zie jij dan de lantaarn die jou vanuit jouw perspectief het laatst passeert als eerste flitsen en de lantaarn die jou als eerste passeert zie jij het laatst flitsen.

Maar ik blijf volhouden dat de ene lantaarn precies tegelijk flitste met de andere lantaarn, dus denk jij dat ik gek ben. Daarom roep je je vriend erbij om die flitsende lantaarns ook eens aan te zien, opdat hij jou gelijk geve betreffende de volgorde waarin die lantaarns flitsen. Maar hij komt, ook met relativistische snelheid, van de andere kant als jij. En hij ziet net als iedereen alles vanuit zijn eigen perspectief en hij ziet ook de lantaarn die hem als laatste passeert het eerste flitsen en de lantaarn die hem als eerste passeert het laatste. Maar dan ziet hij die lantaarns dus in precies de omgekeerde volgorde flitsen als waarin jij beide lantaarns ziet flitsen! Je zult niet veel bijval krijgen wat betreft jouw bewering dat die ene lantaarn eerder flitste dan die andere. Hij zal zeggen dat die andere lantaarn eerder flitste dan die ene. Fijn h ? Mooie vriend. Zegt precies het tegenovergestelde van wat de bedoeling was. Daar heb je wat aan. Had ik niet reeds gezegd dat het je voorstellingsvermogen zou tarten? En vind jij ook dat ik niet langer beide correcte spellingen *lantaarn* en *lantaren* door elkaar moet gebruiken?

Maar we zijn het als gevolg van die tijddilatatie dus ook helemaal niet meer eens over de vermeende gelijktijdigheid van om het even wat voor gebeurtenissen. Voor iedere waarnemer afzonderlijk is er echter niets bijzonders aan de hand. Ik zie gewoon twee flitsen tegelijk, jij ziet eerst A en dan B, en jou vriendje ziet eerst B en dan A. En we hebben alle drie vorkomen gelijk. We zien het alle drie gewoon vanuit ons eigen perspectief en er is voor niemand iets bijzonders aan de hand. Gewoon twee flitsen, al dan niet tegelijk. Maar zodra we elkaar gaan vertellen wat we hebben gezien zal het dus op bekvechten uitdraaien en daar komen we nooit uit. En de fout ligt natuurlijk altijd bij de ander. Dat ben jij...

12. Lorentzcontractie

Samen met twee lantaarnpalen sta ik gezellig op de stoep en er komt een bus voorbij. En die chauffeur lust er wel pap van: de bus rijdt met een relativistische snelheid. Nu zit jij in die bus en jij ziet mij en die lantaarnpalen met dezelfde snelheid voorbijkomen als waarmee ik jou voorbij zie razen. En jij doet iets h el gevaarlijks: je geeft beide lantaarns een tik: pats, pats. De tijdspanne daartussen, in j u w tijd, noem ik j u w patsinterval. Ik zie jouw tikken natuurlijk ook en meet ik dus mijn patsinterval, aldus tante Betje. Maar het blijven natuurlijk wel j u w patsen.

Nu even wat anders. Je gaat gedurende 2½ uur wandelen met 5 kilometer per uur. Welke afstand loop je dan? Natuurlijk $2\frac{1}{2} \times 5 = 12\frac{1}{2}$ kilometer, toch? De afstand is de tijdsduur maal de snelheid.

En nu hebben we jouw patsinterval en de snelheid waarmee jij die lantaarns voorbij ziet komen. Die is gelijk aan de snelheid waarmee ik de bus voorbij zie komen. Ik noem het nu even gewoon *de* snelheid. Die is voor ons beide gelijk. En natuurlijk rijdt die bus tussen die twee patsen een afstand gelijk aan de afstand tussen die lantaarnpalen. Dat noem ik dus nu even gewoon *de* afstand.

Voor jou geldt nu: afstand = j u w patsinterval maal snelheid

en voor mij geldt: afstand = mijn patsinterval maal snelheid,

maar door de tijdrek is mijn patsinterval (maar het blijven j u w patsen) groter dan het jouwe! Dat betekent dat wij niet dezelfde afstand tussen die lantaarnpalen meten. Ik meet een grotere afstand dan jij en dan jij dus een kleinere *as mijn*.

Maar wat betreft die lantaarnpalen ben ik de stilstaande waarnemer, dus is het voor mij een doodgewone alledaagse situatie. Ik meet gewoon de normale afstand tussen die lantaarns. Maar dat betekent dat jij als gevolg van de tijddilatatie een kortere afstand meet dan de zogeheten rustafstand. Alles wat je als stilstaand mag beschouwen noemen we in de natuurkunde *in rust*. En jij ziet die lantaarns helemaal niet in rust, je ziet ze voorbijkomen met een relativistische snelheid.

Het komt erop neer dat als gevolg van de tijddilatatie alle snel voorbijkomende afstanden (ook de lengtes van voorwerpen) in de bewegingsrichting worden verkort. Gek h ? Maar het volgt keihard uit de ervaringsfeiten. Het heet *Lorentzcontractie*. Prof. Hendrik Antoon Lorentz had dat pre-Einstein in de jaren 1890 reeds gehypothetiseerd als mogelijke verklaring van het nulresultaat van de eerdergenoemde proef van Michelson &

Morley (die dus ondanks de beweging van de aarde in alle richtingen dezelfde lichtsnelheid maten). Maar de Ierse physicus George Francis Fitz Gerald had Lorentz de loef afgestoken, hoewel slechts in een enigszins vage opmerking in een ingezonden brief. Maar zijn naam wordt hier dus ook wel aan gekoppeld.

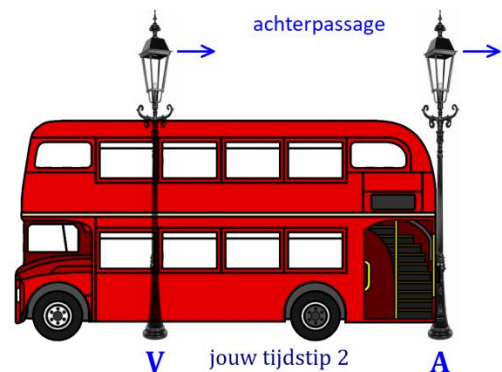
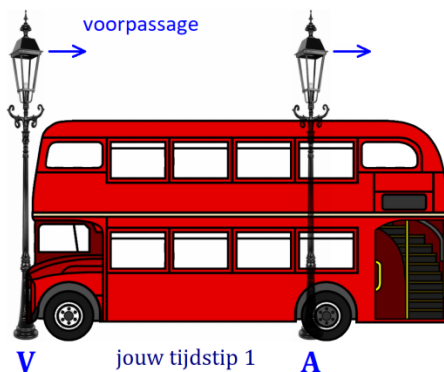
Uiteraard geldt vanuit mijn perspectief in feite hetzelfde, dus ik zie een heel kort busje met ongelooflijke snelheid voorbijkomen. We zien allebei dat bij de ander alles is gecontraheerd, zoals we ook allebei zagen dat de tijdspannen zoals die voor de ander gelden in de eigen tijd worden opgerekt.

Stel nu dat jouw bus in rust (dus stilstaand) exact tussen die lantaarnpalen past. De paal bij de voorkant van de bus noem ik even de *voorpaal* en dan is de andere natuurlijk de *achterpaal*. Maar nou zie jij die palen relativistisch voorbijkomen, en dan staan ze voor jou dicht bij elkaar. Ze passen vanuit jouw perspectief niet meer om de bus! Wat je zult zien is dat eerst de voorpaal de voorruit passeert en even later passeert de achterpaal de achterruit. Er ontstaat een tijdsduur tussen die gebeurtenissen. Wat je aan lantaarnpaalafstand bent kwijtgeraakt komt dus terug in de vorm van een tijdspanne tussen de passages. Afstand gaat over in tijd!

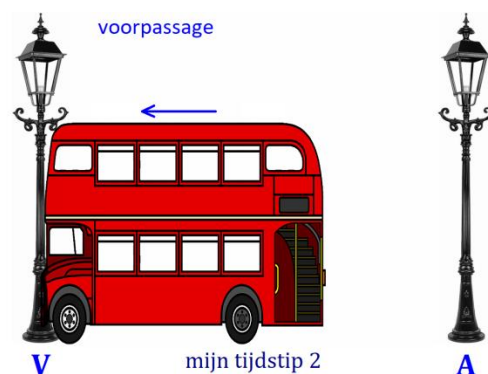
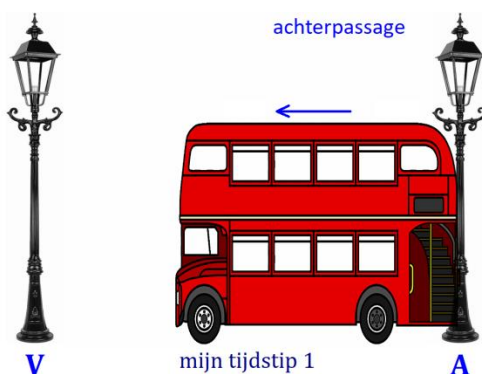
Maar ik zie een heel korte busje voorbijkomen dat wel heel ruim tussen die palen kan. En voor mij gaat een deel van de buslengte over in een tijdsverschil. Wanneer de achterruit de achterpaal passeert is de voorruit nog lang niet bij de voorpaal. Ik zie dus net als jij een tijdspanne ontstaan tussen de passages, maar dan precies andersom. Jij ziet eerst de voorpassage en daarna de achterpassage terwijl ik eerst de achterpassage zie en dan pas de voorpassage. Weet je het nog? Jij en je vriendje? Oneens over de flitsvolgorde.



Gezien vanuit de bus:



Gezien vanaf de stoep:



Einstein vond voor de Lorentzcontractie exact dezelfde formule als Lorentz, die het met die hypothese dus wel degelijk bij het rechte eind had, maar bij Einstein, die zich zonder enige veronderstelling te doen baseerde op ervaringsfeiten is het een vanzelfsprekende gevolgtrekking uit die ervaringsfeiten.

Door deze Lorentzcontractie wordt voor jou de afstand tussen die lantaarnpalen dus verkort, maar dat geldt uiteraard voor elk tweetal lantaarnpalen dat zoal langs de weg staat en daarmee ook voor de hele straatlengte. Dus hoe harder je rijdt, hoe korter de hele straat wordt. Voor jou dan, niet voor de stilstaande waarnemer. En reistijd is reisafstand gedeeld door snelheid. En dan ben je dus nóg eerder op je eindbestemming dan je met die gierende snelheid so wie so al zou hebben bereikt. Je moet namelijk rekenen met die gecontraheerde afstand. Lorentzcontractie levert een extra verkorting van de reistijd!

En nu komt er, op haar bezem gezeten, een heks voorbij gevlogen met relativistische snelheid. Dankzij de Lorentzcontractie is haar bezem nu voor jou dus gecontraheerd oftewel verkort, en ook zichzelf is gecontraheerd, zeg maar samengeperst, in de bewegingsrichting. Maar dat geldt uitsluitend vanuit jóúw perspectief. Voor haarzelf is er niets aan de hand. Ze voelt zich helemaal niet in de verdrukking en haar bezem is voor haar gewoon zeg twee meter lang. Maar jij ziet een bezempje van bijvoorbeeld anderhalve meter voorbijkomen met een enigszins platgedrukte heks. Noem het maar een optische illusie.

Uiteraard is de Lorentzcontractie des te erger naarmate die heks op haar bezem sneller voorbijkomt. Hoe harder ze gaat, hoe korter die bezem wordt, en hoe meer ze de lichtsnelheid benadert, hoe meer die bezem ineenschrompelt. Voor jou als stilstaande waarnemer wel te verstaan, niet voor haarzelf. En omdat haar bezem ook voor jou nu eenmaal niet korter kan zijn dan nul, kan die heks niet sneller dan het licht voorbijkomen.

13. Licht

Zoals net duidelijk is gemaakt wordt de straat dus korter naarmate je harder rijdt. Je totale reistijd, of beter gezegd de tijd waarin de te reizen afstand vanuit jouw perspectief aan jou voorbijtrekt, wordt daardoor dus extra verkort, bovenop de reistijdverkorting die je so wie so al had dankzij de hogere snelheid an sich. Maar als oom agent vraagt waarom je zo hard reed zou ik dat argument maar achterwege laten.

*Hoe harder je scheurt,
hoe vlugger 't gebeurt,
En hoe sneller je gaat,
hoe korter de straat.*

De eindlimiet is natuurlijk de lichtsnelheid, resulterend in een Lorentzcontractie tot helemaal hartstikke nul. En bij straatlengte nul hoort reistijd nul. En wel vanuit het eigen perspectief van datgene wat volgens de stilstaande waarnemer zo snel voorbijkomt. En wat komt er met de lichtsnelheid voorbij? Licht! Voor het licht zelf is de totale reisafstand helemaal hartstikke nul en dus ook de reistijd.

De Andromedanevel is een groot sterrenstelsel, groter dan de Melkweg. Het is onze naaste buur, astronomisch gezien dus heel dichtbij. Het bevindt zich op het korte afstandje van slechts een luttele 24 triljoen kilometertjes en ik wed dat jij geen flauw idee hebt hoeveel een triljoen is⁴. In de astronomie reken we echter zelden met kilometers, maar bijvoorbeeld met lichtjaren. Een lichtjaar is ondanks de naam géén tijd, maar een afstand, en wel de afstand die het licht in een jaar aflegt. De Andromedanevel bevindt zich op 2½ miljoen lichtjaar en dan doet het licht er dus 2½ miljoen jaar over om van daar naar hier te komen. Vanuit óns perspectief wel te verstaan, waarbij de hele Melkweg in dezen is te beschouwen als de stilstaande waarnemer. Je zou denken dat zo'n foton zich al die tijd stierlijk verveelt. Zijn we d'r al bijna? Maar niets is minder waar. In het eigen perspectief van het licht zijn zowel de afstand als de reistijd helemaal hartstikke nul, niks, noppes, nada. Vanuit het foton gezien is het natuurlijk zo dat de lichtbron vertrekt en de waarnemer arriveert, maar het ervaart dat als één en dezelfde gebeurtenis. Tijdloze energieoverdracht. En dat geldt voor élk foton, waar het ook vandaan komt. Al is het van het allerverste sterrenstelsel dat we kunnen waarnemen.

⁴ Een kubieke meter is $1000 \times 1000 \times 1000$ = miljard kubieke millimeter en een kubieke kilometer (ongeveer zo'n ding dat in Zwitserland boven z'n omgeving uitsteekt) is $1000 \times 1000 \times 1000$ = miljard kubieke meter en dat is dus miljard \times miljard = triljoen kubieke millimeter.

En nu zou duidelijk moeten zijn dat sneller dan het licht niet alleen onmogelijk is, maar ook overbodig. Dankzij de Lorentzcontractie ben je er al. Enstein heeft aangegeven dat de lichtsnelheid, die weliswaar eindig is (299 792 458 m/s), de rol speelt van de oneindige snelheden. Dat is geheel in overeenstemming met deze reistijd van nul. Sneller hoeft niet en kan niet.

14. Al met al

Zo, nu weten we dus dat we al onze waarneming alleen maar vanuit ons *eigen perspectief* doen en dat alle *natuurwetten* voor jou en voor mij *identiek* zijn, *onafhankelijk* van hoe *snel* de ander voorbijkomt.

En de tijd bestaat niet, maar we hebben *elk onze eigen tijd*. En die gaan bij heel grote onderlinge snelheid uiteenlopen en dat heet *tijddilatatie* ofwel *tijdrek*. Alle tijdspannen in de eigen tijd van een relativistische voorbijganger worden in de eigen tijd van een stilstaande waarnemer opgerekt.

Doordat we elk in onze eigen tijd meten kunnen we dankzij de tijddilatatie ondanks onze onderlinge snelheid toch beide dezelfde lichtsnelheid meten, die daarmee een universele constante is en dat laatste is voldoende om af te leiden dat niets sneller kan dan het licht omdat dat tot een contradictie zou leiden.

Jouw en mijn tijd gaan bij grote onderlinge snelheid als het ware scheef uit elkaar lopen, en daardoor worden we het *oneens over gelijktijdigheid*, zelfs over de volgorde van (causaal onafhankelijke) gebeurtenissen.

Een gevolg van de tijddilatatie is de *Lorentzcontractie*. Daardoor worden snel voorbijkomende dingen korter en dat heeft tot gevolg dat het licht zelf een reisafstand en -tijd ervaart van helemaal nul.

Die drie effecten, tijddilatatie, Lorentzcontractie en verschil in gelijktijdigheid passen uiteraard perfect bij elkaar. Wat je door de Lorentzcontractie aan afstand of lengte kwijtraakt komt terug als een verschil in gelijktijdigheid.

Doordat tijdstipslijnen loodrecht op de tijdlijn staan krijg je met een scheeflopende tijdlijn een rechthoekige driehoek. Daarvoor heeft ene Pythagoras ooit eens formule uitgevonden die de Soemeriërs blijkens kleitablet Plimpton 322 al duizend jaar eerder kenden. De omrekening van jouw naar mijn perspectief en v.v. gaat derhalve voor zowel de tijddilatatie als de Lorentzcontractie feitelijk volgens de stelling van Pythagoras.

Uiteindelijk is het allemaal te reduceren tot de *tijddilatatie*, dat ene woord waarmee je de relatietijdtheorie kunt karakteriseren.

15. Tweelingparadox

Maar we zijn er nog niet. Als ik jouw tijdspannen opgerekt zie, dan geldt dat ook voor de tijd die verstrikt tussen twee opeenvolgende kloktikken, dus ik zie jouw klok langzamer tikken:

voor jou doet jouw klok gewoon:	tikketikketikketiketik,
edoch voor mij doet jouw klok:	tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik.

En had ik niet al uitgelegd dat ik j^óuw tijdspannen opgerekt zie maar dat jij ook m^íjn tijdspannen opgerekt ziet? Het scenario was immers volkomen symmetrisch. Dat betekent:

voor mij doet mijn klok gewoon:	tikketikketikketiketik,
edoch voor jou doet mijn klok:	tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik.

We zien dus allebei de klok van de ander langzamer tikken dan *wat die zelf ziet!* En uiteraard hebben wij identieke klokken, dus daar kan het niet aan liggen. Het is een gevolg van de tijdrek. En nou moet je eens even goed nadenken. Heb je vast nog nooit gedaan... We maken bovenstaande even iets completer:

voor jou doet jouw klok gewoon:	tikketikketikketiketik,
edoch voor mij doet jouw klok:	tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik,
en voor mijzelf doet mijn eigen klok gewoon:	tikketikketikketiketik.

Dus ik zie niet alleen maar jouw klok langzamer tikken dan wat jij zelf ziet, ik zie hem ook langzamer tikken dan de mijne.

Tevens geldt:

voor mij doet mijn klok gewoon:	tikketikketikketiketik,
edoch voor jou doet mijn klok:	tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik - ke - tik,
en voor jouzelf doet jouw eigen klok gewoon:	tikketikketikketiketik.

Dus jij ziet niet alleen maar mijn klok langzamer tikken dat wat ik zelf zie, je ziet hem ook langzamer tikken dan de jouwe.

We zien allebéí dat de klok van de ander langzamer tikt dan de eigen klok! En die klokken zijn slechts meetinstrumenten, toch? Het betreft feitelijk jouw en mijn tijd zelf. Op de fiets merken we er niks van. Ook niet in straaljagers, maar als wij elkaar met een relativistische snelheid passeren zien we beide dat de ander minder snel veroudert...

Maar kijk nu eens naar een tweeling, bijvoorbeeld Gerrie en Jo. Die zijn precies tegelijk geboren (vergeet de daarbij optredende medische complicaties). Maar wat nu als ze na een qua onderlinge snelheid relativistisch avontuur weer bij elkaar komen? Volgens Gerrie is Jo dan de jongste, maar volgens Jo is Gerrie de jongste. Dat heet de *tweelingparadox*. Feit is echter dat het feitelijk uit de feiten volgt en die kunnen elkaar niet tegenspreken. Vandaar dat het een *paradox* (kennelijke tegenstrijdigheid) heet en niet een *contradictie* (loeiharde tegenstrijdigheid).

En tijddilatatie is experimenteel aangetoond. GPS werkt! Jouw navigatiesysteem dóét 't! En wat denk je van CERN, war ze die enorme deeltjesversneller hebben. Die deeltjes vliegen daar met 99.999 998 959% van de lichtsnelheid en me dunkt dat dat relativistisch is. Natuurlijk hebben ze daar de formules van Einstein toegepast. En dat ding werkt.

Wat ik echter nog niet genoemd had is dat Einstein zich met zijn eerste postulaat heeft beperkt tot situaties waarin de snelheid constant is, zowel qua grootte als qua richting. Dat betekent dus dat die helemaal nooit verandert en omkeren valt er dus ook niet onder. Ik had het in het begin toch ook over een ideale trein die zonder horten of stoten strak rechtlijnig rijdt en niet schommelt of zo? In een wiebelende trein bakt die jongleur d'r vast niet veel van. Dan zal die knuppel z'n knuppels nogal knuppelig knuppelen. Iets drinken in een rijdende auto gaat prima, totdat je over een verkeersdrempel dendert. Met een bekertje loeihete koffie in je hand. Bij de tweelingparadox zit de fout dus in de gedachte dat ze weer bij elkaar zouden komen. Dat kan niet als hun onderlinge snelheid constant is. En als ze elkaar nooit meer ontmoeten denken ze gewoon allebei: *Ha ha, ik ben lekker ouder!* Zonder dat het tot een conflict leidt.

Vanwege deze beperking tot constante snelheid noemde Einstein dit de *speciale relativiteitstheorie*. Natuurlijk wilde hij af van die beperking. In de praktijk veranderen snelheden immers aan de lopende band. Dus kwam hij vervolgens met de *algemene relativiteitstheorie*.

16. Traagheid

Eerst even het begrip *massa*. Het magnum opus van Sir Isaac Newton, de *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (de Wiskundige Beginselen der Natuurwetenschap), begint ermee, helemaal vooraan: *Definitio I. Quantitas materiæ est mensura bla bla bla. Hoeveelheid materie is een maat* etc. Even verderop staat: *Hanc autem quantitatem sub nomine corporis vel massæ in frequentibus passim intelligo. Het is deze hoeveelheid die ik in wat verder volgt versta onder de termen lichaam of massa*. Dus *massa* betekent *hoeveelheid materie*. Fijn. Als je tenminste weet wat materie is. Wel, materie is het *spul* waar alles in de natuur als het ware uit voortkomt. De term komt van het Latijnse *mater*, wat *moeder* betekent (en *mamma* betekent *tiet*). Zo, nou weet je wat massa is. Dat is een hoeveelheid materie, *spul*.

Vervolgens stelt Newton dat massa de aangeboren kracht (*vis insita*) heeft om weerstand te bieden tegen veranderingen in de bewegingstoestand. In feite is dat geen kracht maar een eigenschap. Deze *vis insita* noemen we *traagheid*. Het betekent dat een massa moeilijk op gang komt, maar als de vaart er eenmaal in zit wil ie ook niet meer stoppen. Daarna definieert hij *kracht* als een actie die wordt uitgeoefend op een massa met als doel de bewegingstoestand te veranderen. Zo, nu weet je eindelijk wat kracht is. En iets verderop komen dan Newtons drie bewegingswetten, waarvan ik hier alleen de eerste noem. Het is de

traagheidswet:

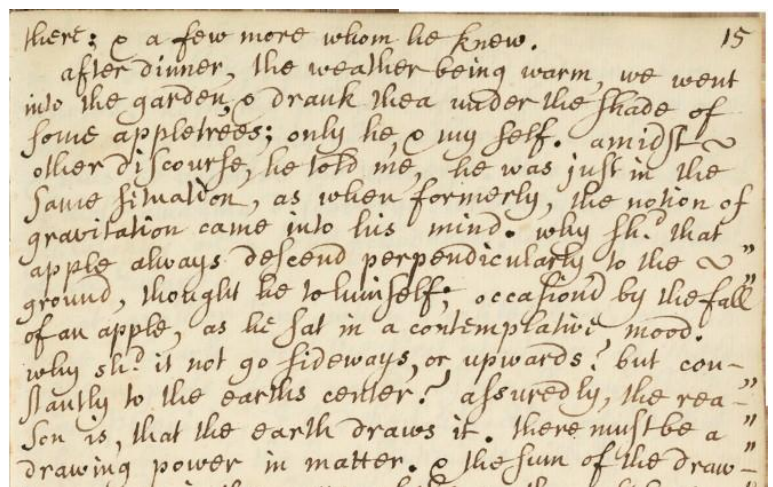
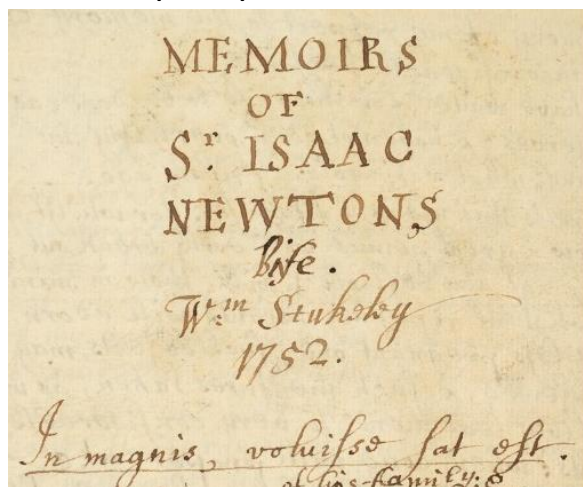
ieder ding verkeert in een toestand van ofwel rust dan wel onveranderlijke rechtlijnige beweging totdat het door een uitgeoefende kracht wordt geacht die toestand te veranderen.

Stel nu eens dat je op een stoel zit met een perfect verticale rugleuning, en je zit zelf ook perfect verticaal. Dan voel je die leuning niet. Maar zodra er gas wordt gegeven wordt jij tegen die leuning gedrukt, toch? Nee! Het is andersom. Die leuning duwt jóú vooruit, waardoor jouw snelheid zal veranderen. Die leuning oefent dus een kracht op jou uit. En zodra die kracht stopt eindigt ook die acceleratie. Het is de *kracht* die voor de versnelling zorgt. Die kracht is nodig omdat jouw massa zich verzet tegen die versnelling. Dat is de traagheid. En de speciale relativiteitstheorie gaat met haar constante snelheden dus over krachtenvrije scenario's.

Nu denken we even terug aan die hogesnelheidstrein en deze keer zitten er twee jongleurs in. Dwars in de trein, precies tegenover elkaar. Ze werpen om te oefenen een of ander jongleerding heen en weer, dus precies dwars in de trein. Voor een waarnemer op het perron waar de trein langs raast maakt het dan een zigzagbeweging, vergelijk het foton in de bewegende Einsteinklok. Dan heeft dat ding dus ook een voorwaartse snelheid en die is precies gelijk aan de snelheid van de trein. Logisch, toch? Binnenin de trein merk je die voorwaartse snelheid van dat ding dus helemaal niet. Als er nu terwijl dat ding dwars door de trein vliegt, en er dus helemaal geen fysiek contact is tussen dat ding en die trein, aan de noodrem wordt getrokken zullen die jongleurs natuurlijk zijdelings van hun stoel schuiven, en dat ding zal in de trein behalve dwars ook ineens voorwaarts gaan vliegen. Dat komt dus door zijn traagheid. Het wil de voorwaartse snelheid die het ten op zichte van het perron heeft behouden, terwijl de trein steeds langzamer gaat. Als de trein hard genoeg remt zal het ding uiteindelijk de voorruit vooruit raken. Het is net alsof het ineens naar voren "valt" en dat komt dus door de traagheid.

Zelfs een lichtstraal die dwars is uitgezonden om aan de ander kant van de trein door een raam naar buiten te gaan, zal door de afremming van die trein die tijdens de oversteek plaatsvindt, dat beoogde raam gaan missen en ernaast (en wel meer naar de voorkant van de trein) tegen de wand botsen. Het licht valt als het ware naar voren en heeft dan, zolang je de trein als referentie gebruikt, binnenin die trein een kromme baan afgelegd.

17. Zwaarte(kracht)



Na het eten, terwijl het warm weer was, gingen we de tuin in en dronken thee in de schaduw van enkele appelbomen; alleen hij en ik. Hij vertelde onder andere dat hij in precies zo'n situatie was toen destijds het besef van de zwaartekracht in hem opkwam. Waarom zou die appel altijd loodrecht naar de grond vallen, dacht hij bij zichzelf, ingegeven door de val van een appel, terwijl hij in gedachten verzonken was. Waarom zou die niet opzij gaan, of omhoog? Maar steeds richting het middelpunt van de aarde? De oorzaak is vast en zeker dat de aarde eraan trekt. Er moet een aantrekkende kracht zijn in de materie. -- William Stukeley, 25 jaar na Newtons dood.

HR: ongetwijfeld heeft Newton ook meteen gedacht aan zijn eigen hierboven reeds genoemde traagheidswet: de bewegingstoestand van die oorspronkelijk stilhangende appel veranderde immers en daar is een kracht voor nodig.

Sir Isaac Newton ontdekte de zwaartekracht. Massa's trekken elkaar aan en die eigenschap van massa heet *zwaarte*. De grootte van die aantrekkende kracht heet *gewicht*. Dus: massa is de hoeveelheid materie, gewicht is de kracht waarmee massa's elkaar aantrekken en zwaarte is de eigenschap dat ze elkaar aantrekken.

Afijn, nu kennen we dus twee eigenschappen van massa: traagheid en zwaarte, en die hebben allebei te maken met een op die massa uitgeoefende kracht. De ene kracht is wat nodig is voor een verandering van beweging en de andere is de onderlinge aantrekkingskracht.

18. In de lift

Heb jij je ook weleens wat zwaarder of lichter gevoeld in een versnellende of vertragende lift? Overigens noemen we *vertragings* ook *versnelling*, maar dan met een minteken. Een opwaartse vertraging is dus eigenlijk een neerwaartse versnelling en een neerwaartse vertraging is een opwaartse versnelling. Derhalve schrappen we de term *vertragings* uit ons woordenboek.

Naarmate de opwaartse versnelling van de lift groter is voel jij je zwaarder en zwaarder, en hoe harder die lift neerwaarts versnelt, hoe lichter jij je voelt. Stel nu eens dat die lift precies zo hard neerwaarts versnelt als wanneer jij in vrije val zou zijn? Dan zakt die lift helemaal onder je voeten weg en dan voel jij je zo licht als het maar kan, namelijk helemaal nul. En omdat je geen enkele ondersteuning meer hebt van de liftbodem ben je dan inderdaad in vrije val. Binnenin die lift ben je als het ware gewoon aan het zweven en je hebt ten opzichte van die lift geen enkele snelheid. Vanuit jouw eigen perspectief ben je binnenin die lift gewoon in rust. Er wordt door de lift(bodem) geen kracht op je uitgeoefend en jouw beweging ten opzichte van die lift verandert niet. Dat is geheel conform Newtons traagheidswet, maar dan met die lift als het ding ten opzichte waarvan jij jouw snelheid beschouwt. Een waarnemer buiten de lift beschouwt het echter ten opzichte van het gebouw en ziet dus jouw neerwaartse snelheid steeds toenemen. Maar zelf ervaar je het echter als *in rust* en je voelt geen gewicht. Je bent gewichtloos.

19. Gelukkigste gedachte

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.

Ik zat op een stoel in het patentkantoor in Bern toen ik plotseling een inval kreeg: Iemand in vrije val voelt zijn eigen gewicht niet. Ik schrok ervan. Dit simpele idee maakte een diepe indruk op me. Het zette me aan tot een theorie over de zwaartekracht.

Albert Einstein in his Kyoto address (14 December 1922), talking about the events of "probably the 2nd or 3rd weeks" of October 1907. Hij heeft dit in 1920 gekenmerkt als: *der glücklichste Gedanke meines Lebens, de gelukkigste gedachte van m'n leven.*

Newton zag een appel vallen en kwam op de zwaartekracht, Einstein zag in gedachten "iemand" vallen⁵ en dat zette hem aan tot de algemene relativiteitstheorie. Zijn gelukkigste gedachte betekent dat er in vrije val juist helemaal géén kracht in het spel is.

Newton gebruikte de aarde als referentie en zei: die appel komt in beweging, dus wordt er een kracht op uitgeoefend.

Einstein zou het beschrijven vanuit het perspectief van die appel zelf. Toen die aan de boom hing voelde die een kracht die voorkwam dat hij zou vallen, en toen die kracht wegviel kon die appel eindelijk gaan doen wat ie altijd al wilde. Hij raakte in een geheel krachtenvrije toestand en dat heet *inerte beweging*. Maar de term *beweging* is hier misleidend. Met de ogen dicht ervaar je zelf juist geen beweging. Alleen voor een buitenstaander ben je in beweging. Inerte beweging is de Einsteinversie van Newtons traagheidswet.

Albert Einstein was dus in 1907 de eerste die beseft had van gewichtloosheid. En terwijl hij op die stoel zat voelde hij helemaal niet dat hij door de aarde werd aangetrokken, hij voelde met zijn bips dat die stoel hem tegenhield met een omhoog gerichte kracht. Dát is het effect van de zwaartekracht. Zodra die stoel bezwijkt is het net als in die vrij vallende lift. Je raakt zelf in vrije val totdat de grond jou tegenhoudt. Die vrije val is eigenlijk jouw natuurlijke beweging, zonder dat er enige kracht op je wordt uitgeoefend. Inerte beweging.

20. Verschil?

Hopelijk beseft je nu dat elke vrije val, ook het volledige traject van een gegooid balletje, geheel krachtenvrij is. Een balletje is tijdens de hele worp gewichtloos. Het ondervindt pas weer een kracht als het ergens tegenaan komt of de grond raakt. Dat geldt ook voor jou. Ja jij. Als je met je ogen dicht een sprong maakt heb je bijvoorbeeld geen flauw idee wanneer de opwaartse beweging overgaat in een neerwaartse. Je bent gedurende

⁵ Als je er op internet naar op zoek gaat vind je gemakkelijk dat hij een schilder van het dak zou hebben zien vallen, maar dat heet op zijn Duits: *hineininterpretierter Quatsch*. Hij heeft iets dergelijks wel ooit als voorbeeld gebruikt.

die hele sprong gewichtloos. Maar wees voorzichtig, want als je met je ogen dicht springt heb je ook geen flauw idee wanneer je weer de grond raakt. Vallen doet geen pijn, maar neerkomen wel.

En denk eens terug aan die afremmende trein, maar dan pas vanaf het moment dat er aan de noodrem wordt getrokken, en vergeet even dat je natuurlijk met je bips de bank voelt. Denk nu ook eens aan een andere trein die zonder enige beweging precies verticaal op zijn neus staat. Hoe die machinist dat heeft klaargespeeld doet er natuurlijk niet toe. Als je in die laatste een of ander ding horizontaal (dus dwars door de trein) werpt zal het uiteraard naar beneden vallen en als je niet te hard gooit zal het uiteindelijk de voorruit neerwaarts raken. Stel dat die afremmende trein precies zo hard remt dat dat ding in beide gevallen even hard tegen de voorruit komt. En stel dat van beide treinen de ramen volledig geblinddoekt zijn, je kunt alleen waarnemen wat er zich binnen in de trein afspeelt. Zou je dan onderscheid kunnen maken tussen die twee situaties?

Pas als er iets is dat een omhoog gerichte kracht op jou kan uitoefenen voel je je gewicht. Had je gedacht. Zoals net uitgelegd is wat je feitelijk voelt de veerkracht van stoel of vloer die op jouw lijf wordt uitgeoefend. En dat voelt precies net zo als die rugleuning.

Als je geblinddoekt zou zijn zou je geen verschil kunnen bespeuren tussen een opwaarts versnellende lift en een andere planeet met wat grotere zwaartekracht. En ook in de net genoemde treinen kun je geblinddoekt geen onderscheid maken. En ook niet tussen de stoelzitting en die leuning (afgezien van het feit dat je de ene met je bips voelt en de andere met je rug, maar dat voelt in essentie toch precies net zo?). En de ervaring leert ook dat het niet uitmaakt of je in horizontale richting al rennend met je gezicht vol tegen een muur knalt of met diezelfde snelheid verticaal plat op je bek valt.

21. Gelijkwaardigheid

Einstein schreef: *We hebben met wat de ervaring ons tot nu toe heeft geleerd geen enkele aanleiding tot de aanname dat de systemen zich op welke wijze dan ook onderscheiden, en willen daarom voortaan de volledige natuurkundige gelijkwaardigheid van een gravitatieveld en een versneld referentiesysteem aannemen.* Uiteindelijk is het met de term *aannemen* natuurlijk een hypothese, maar wel een zeer deugdelijk onderbouwde, gestoeld op ervaringsfeiten. Het is eigenlijk een conclusie uit de ervaringsfeiten. Dit heet het

equivalentieprincipe:

een gravitatieveld en een versneld referentiesysteem
zijn natuurkundig volkomen gelijkwaardig.

[4]

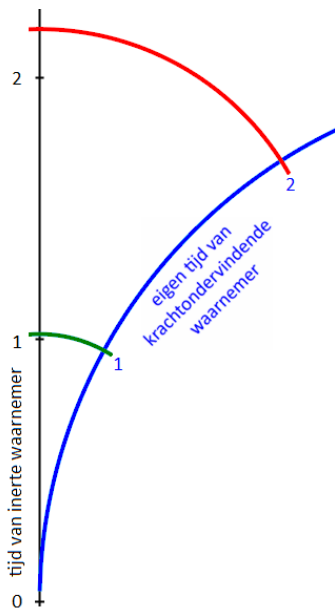
Omdat in het heelal de zwaartekracht nu eenmaal dé overheersende kracht is noemen we het vervolgens allemaal gravitationeel, maar je zou het dus net zo goed accelerationeel kunnen noemen. En het betekent dus ook dat *traagheid* en *zwaarte* volkomen synoniem zijn. Gravitatie en acceleratie zijn feitelijk identiek.

Waar het per saldo om gaat is dat er wel of niet een kracht op je wordt uitgeoefend. Zo nee, dan ben je in inerte beweging en zo ja, dan voel je die kracht en het maakt niet uit waar die door wordt veroorzaakt, zij het een raketmotor of de veerkracht van een nagenoeg onsamendrukbaar planeetoppervlak. Die kracht verstoort dan jouw inerte beweging.

Inerte beweging had ik de Einsteinversie genoemd van Newtons traagheidswet. En die laatste zegt dat er zonder kracht een rechtlijnige beweging wordt uitgevoerd. Maar een gegooid balletje beschrijft een kromme baan! Geheel zonder dat er een kracht op wordt uitgeoefend. Maar het ervaart dat omhoog en omlaag zelf niet als een verticale bocht, net zoals jij dat tijdens die sprong met je ogen dicht ook niet merkte. In de eigen ervaring ga je dus rechtlijnig. Je ervaart geen enkele bocht.

22. Kromming van ruimte en tijd

En als je in je eigen ervaring helemaal geen bocht maakt, terwijl een buitenstaander dat wel ziet, kun je alleen nog maar op kromme gedachten komen. Vanuit het eigen perspectief zijn zowel de ruimte als de tijd van de ander gekromd. In de speciale relativiteitstheorie gingen onze tijdlijnen scheef doch rechtlijnig uiteenlopen, in de algemene relativiteitstheorie gaan de tijdlijnen van degene waarop een kracht wordt uitgeoefend kromtrekken. Eigenlijk is *kromming* een verkeerd begrip, *vervorming* is een betere en veel algemenere term.



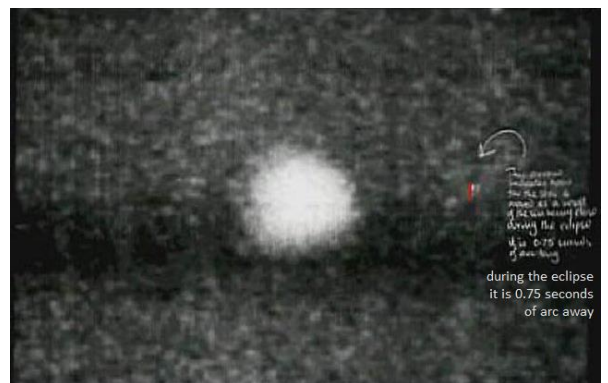
Ik heb een verre van perfect plaatje gemaakt om dat enigszins te illustreren. Als je je maar enigszins kunt voorstellen wat het betekent. Ik sluit me wat dat betreft aan bij William Stukeley, die op zijn titelpagina schreef: In magnis voluissio sat est. Dat betekent zo iets als: bij iets moeilijks is 't genoeg als je 't geprobeerd hebt.

De zwarte lijn is de tijd van de inerte waarnemer, die dus geen kracht ondervindt. De blauwe is de gekromde/vervormde tijdlijn van degene waarop wel een kracht wordt uitgeoefend. Zoals hierboven bij het verschil in gelijktijdigheid al is uitgelegd: een tijdstipslijn staat loodrecht op de tijdlijn. En dan is het een logisch gevolg dat die tijdstipslijnen ook krom moeten zijn als we beide tijden willen vergelijken. Bij de blauwe meet je de tijd als zogeheten booglangte langs de curve en als je dan loodrecht vertrekt en ook loodrecht wilt uitkomen kom je uit op een groter tijdstip in de tijd van de inerte waarnemer.

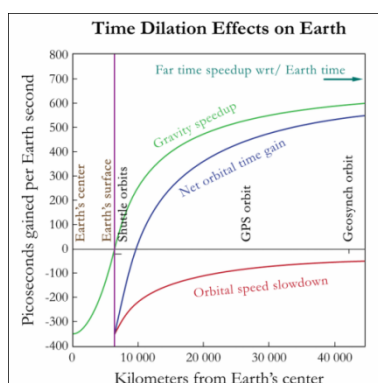
Dat heet *gravitationele tijddilatatie* oftewel *gravitationele tijdrek*. Maar nu is het asymmetrisch, terwijl het in de speciale relativiteitstheorie symmetrisch is. En het gaat hier net als bij de al eerder uitgelegde speciaalrelativistische tijdrek om tijdspannen, tijdsduren, tijdintervallen en per se niet om tijdstippen.

Bij de speciale relativiteitstheorie staat tijddilatatie dus in directe relatie met de onderlinge passeersnelheid. Daarom noemen we dat vanaf nu *kinematische tijddilatatie* (het Griekse *kinesis* betekent *beweging*).

En herinner je je die lichtstraal die dwars de afremmende trein overstak en als het ware naar voren viel? Wel, ongeveer op die manier had Einstein dus het besef gekregen dat het equivalentieprincipe dan zegt dat ook licht onvermijdelijk moet vallen oftewel afbuigen als het zich in een zwaartekrachtveld bevindt. Vanuit het eigen perspectief gaat het gewoon recht vooruit, maar voor een waarnemer op afstand dus niet. Het licht zelf "denkt" dan dus dat de ruimte van die waarnemer vervormt. En jawel, op 29 mei 1919 heeft Sir Arthur Eddington bij een zonsverduistering kunnen aantonen dat sterrenlicht dat vlak langs de zon gaat inderdaad wordt afgebogen.



De gravitationele tijdrek is debet aan de bulk van het in hoofdstuk 6 al genoemde verloop van GPS dat zonder relativistische correctie zou optreden. Die satellieten zitten op ruim 20 000 kilometer boven het aardoppervlak waardoor ze in precies twaalf uur een keer helemaal om de aarde gaan. Hier op het aardoppervlak is de zwaartekracht veel groter dan aldaar, dus gaat de tijd alhier langzamer dan op die grote hoogte. Daardoor zouden we de atoomklokken in die satellieten te snel zien lopen. Door de kinematische tijddilatatie als gevolg van hun omloopsnelheid zouden ze echter te langzaam lopen. Die twee effecten heffen elkaar echter beslist niet op. De natuurkunde kent een aantal behoudswetten en de belangrijkste daarvan is de wet van behoud van ellende. Uiteindelijk werkt GPS doordat de signalen van verschillende satellieten verschillende looptijden hebben om alhier te komen en daarbij gaat het om heel kleine verschillen. Dan zou ook maar de geringste afwijking desastreus zijn. Het tempo van de GPS-klokken is hierop aangepast.

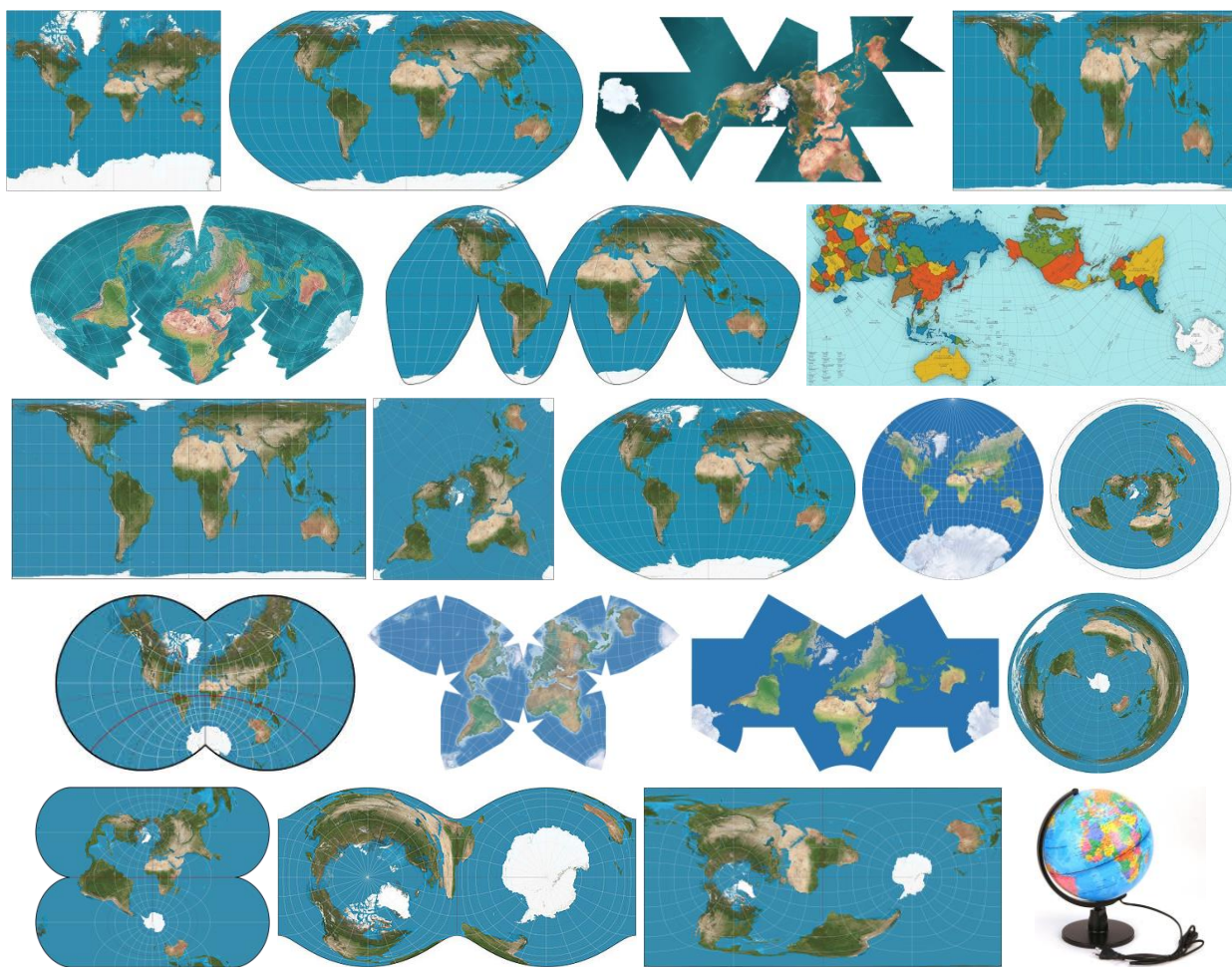


En nu is het deze vervorming van ruimte en tijd die ervoor zorgt dat bijvoorbeeld de maan om de aarde draait. Maar vergis je niet, die baan, die zelf elliptisch is en dus krom, is beslist niet de kromming/vervorming van de ruimtetijd! Stel je een zogeheten starre as voor met aan de uiteinden twee identieke wielen die dus niet anders kunnen dan precies even snel rollen. Die as rolt over een volkomen vlakke tafel en gaat dus precies rechtdoor. Maar nu zit er een ondiepe heel geleidelijk verlopende kuil in dat tafelloppervlak (zonder "stoepanden"). Eén van die wielen rolt daar doorheen en moet dan een iets grotere afstand doen. Dan moet dat andere wiel, dat er niet

doorheen gaat, ook een grotere afstand doen op het aldaar vlakke tafelloppervlak. Dan zal de rolrichting van die as een bocht maken. Die bocht is te vergelijken met de baan van de maan en die kuil met de kromming/vervorming van de ruimte.

Je zou nu tevens moeten inzien dat er ook gravitationele lengtecontractie bestaat, soortgelijk als de Lorentzcontractie. Het komt erop neer dat een staaf in verticale stand korter is dan in horizontale, en dat komt níét door zijn eigen gewicht (we houden hem in het midden vast dus de onderste helft wordt door het gewicht net zo ver uitgerekt als dat de bovenste wordt samengedrukt). Het is de ruimte zelf die ter plaatse gecontraheerd is en dan noodzakelijkerwijs ook alles wat zich aldaar in die ruimte bevindt. De straal van de aarde is hierdoor ongeveer 4.4 mm "te kort", maar dat kunnen we niet meten. En het is precies deze gravitationele lengtecontractie die overeenkomt met de vervorming van de ruimte. En die vervorming van ruimte en tijd is des te groter naarmate een massa groter is.

Kort gezegd: de massa geeft aan hoe de ruimte vervormt en die vervorming bepaalt hoe een ding beweegt. De vervorming van ruimte en tijd komt er eigenlijk gewoon op neer dat platte grafieken altijd een vervormd beeld geven van de werkelijkheid, soortgelijk als hoe elke wereldkaart ook altijd een vervormd beeld geeft.



Alleen een globe geeft een onvervormd beeld, behalve als je ernaar kijkt... Je ziet er altijd slechts een gedeelte van en alleen waar je er loodrecht op kijkt is het beeld voor een klein gebiedje zo goed als onvervormd. Tot aan de horizon ziet de wereld er plat uit.

Er bestaat dus behalve de kinematische tijddilatatie en Lorentzcontractie ook gravitationele tijdrek en gravitationele lengtecontractie. De kinematische varianten zijn symmetrisch tussen beide waarnemers, beide zien bij de ander hetzelfde, maar de gravitationele variant is asymmetrisch. In een zwaartekrachtveld gaat tijd langzamer dan daarbuiten en dingen zijn korter. Dus een waarnemer op grote afstand van een planeet ziet een op die planeet staande klok, die dus wel gravitatie ondervindt, langzamer lopen, maar die klok op die planeet ziet op zijn beurt de klok van de verre waarnemer wel degelijk sneller lopen. Wij zien de GPS-klokken sneller lopen dan de onze en die satellieten zien ónze klokken langzamer lopen dan de hunne. Soortgelijk is het met linialen die zich

in of buiten een zwaartekrachtveld bevinden. Niks controversieels dus. Overigens geldt de gravitationele lengtecontractie alleen in de richting van de ter plaatse heersende zwaartekracht, net zoals dat de Lorentzcontractie uitsluitend in de bewegingsrichting optreedt.

23. Klokhypothese

Heb je in de gaten dat de oplossing van de tweelingparadox in deze asymmetrie moet worden gezocht? Alleen zijn de physici daar nog niet goed uit. In de jaren zestig heeft men daarvoor de klokhypothese uit de lucht geplukt, die stelt dat het verschil in de klokken alleen maar door kinematische tijddilatatie komt. Ik ben het daar zelf pertinent mee oneens; het kán niet kloppen want de kinematische effecten zijn perfect symmetrisch tussen beide waarnemers. De klokhypothese is slechts een bedenkensel om iets te "verklaren" wat men eigenlijk doodgewoon niet begrijpt.

Ik ben er overigens van overtuigd dat ik zelf de juiste oplossing van de tweelingparadox heb gevonden. Daar ga ik nu echter niet verder op in.

24. Zwart gat

Als je een steentje omhoog gooit valt het weer terug. Gooi je het harder, dat komt het ook weer terug, maar later. Gooi je nóg harder, dan nóg later. Maar je kunt het ook zó hard omhoog gooien dat het nooit meer terugvalt. De laagste snelheid waarbij het nooit meer terugkomt heet de *ontsnappingsnelheid*. De ontsnappingsnelheid is de snelheid die *nodig* is om aan de zwaartekracht van een of andere massa te ontsnappen. Als nou de zwaartekracht groter zou zijn, zou er uiteraard ook een grotere snelheid nodig zijn. Maar hoe verder je boven het aardoppervlak bent, hoe kleiner weer de zwaartekracht, dus dan is er weer minder opwaartse snelheid nodig. De ontsnappingsnelheid hangt dus samen met de de massa waaraan je wilt ontsnappen en van hoe ver je er al vanaf bent.

Het komt er op neer dat je een voorwerp met de ontsnappingsnelheid precies tot in het oneindige kunt gooien. Het zal op iedere afstand precies de ontsnappingsnelheid hebben die nodig is om van daaraf in het oneindige te komen. Maar een ander voorwerp zou gerust vanuit het oneindige hier naartoe kunnen vallen en dat doet het dan met precies diezelfde snelheid, maar dan in omgekeerde richting. Op iedere afstand van een planeet is de valsnelheid (vanuit het oneindige) gelijk aan de ontsnappingsnelheid, maar dan neerwaarts.

We weten inmiddels dat niets sneller kan dan het licht. Als nu de ontsnappingsnelheid, dus de voor ontsnapping benodigde snelheid, groter is dan de lichtsnelheid, zal die ontsnapping dus niet meer mogelijk zijn. Als we nu een massa in één punt geconcentreerd denken, dan is er dus een afstand waarbij de ontsnappingsnelheid precies gelijk is aan de lichtsnelheid. En binnen die afstand is de zwaartekracht te sterk voor wat dan ook om te ontsnappen, zelfs voor het licht. Alles kan erin vallen, maar niets kan eruit. Daarom heet dat een zwart gat. De afstand waarbij dat gebeurt heet de *Schwarzschildstraal*, genoemd naar Karl Schwarzschild die als eerste een oplossing vond van de zogeheten Einsteinvergelijking, de formule die in essentie de gehele algemene relativiteitstheorie weergeeft. Een simpel ogende formule, edoch een verschrikkelijk monster als je ermee aan de gang gaat.

En nu is daar ter plekke de vervorming van de ruimtetijd zo sterk dat de zwaartekrachtswet van Newton helemaal niet meer klopt. Maar de zogeheten Einsteinvergelijking beschrijft prima wat er in de nabijheid van dat zwart gat gebeurt, dus nipt buiten de Schwarzschildstraal, die ook wel waarnemingshorizon wordt genoemd. Maar wat er binnenin gebeurt weten we niet. We noemen het een singulariteit. Dat is in feite een wiskundige term die aangeeft dat ergens een of ander iets doodgewoon helemaal niet kan, zoals bijvoorbeeld delen door nul.

Stel dat je van een grote (veilige) afstand een zwart gat observeert en toevallig ziet dat er toevallig een ding door toeval naartoe valt, dan zie je in eerste instantie eigenlijk niets bijzonders. Maar naarmate het ding er dichterbij komt gaat de gravitationele tijdrek steeds meer een rol spelen en tegen de tijd dat dat ding heel dicht bij de Schwarzschildstraal is zie je zijn tijd héél erg gedilateerd oftewel opgerekt. En die tijdrek wordt groter en groter naarmate dat ding dichterbij de waarnemingshorizon komt. Die gaat steeds meer richting oneindig. Per saldo zul je het ding er helemaal nóóit in zien vallen. De passage van de waarnemingshorizon laat in jouw eigen tijd oneindig lang op zich wachten. Dát is gravitationele tijdrek ten voeten uit.

Maar dat vallende ding ziet in z'n eigen tijd jouw tijd steeds sneller voortgaan. Gravitatiele tijdrek is immers asymmetrisch. In zijn eigen tijd valt het gewoon in een eindige tijd in het zwart gat. En wat dan? Tja...

De hele wereld van natuurkundigen heeft geen idee van wat er zich binnenin een zwart gat, dus voorbij de waarnemingshorizon, afspeelt. ~~Maar ik wel!~~ Nee ik ben niet arrogant, ik ben gewoon keigoed. En straks snap jij het ook. Volgens het principe dat zowel Newton als Einstein hanteerden: géén ongefundeerde veronderstellingen doen, niets fantaseren, maar conclusies trekken uit dingen die je als een waarheid mag beschouwen. En iets wat wiskundig niet kan is natuurkundig ook onmogelijk. Dat impliceert dat er simpelweg helemaal geen binnenkant bestaat. En dan speelt er zich ook niets af.

We hebben drie perspectieven: de waarnemer op afstand, het erin vallende ding en het zwart gat zelf. Met dat laatste bedoel ik nu de centrale massa ervan, die we in één punt geconcentreerd denken. Hoe de verre waarnemer het ziet is net duidelijk geworden: hij ziet het ding nooit de Schwarzschildstraal passeren.

Maar hoe is het met dat ding zelf? Wel, een beetje is het net uitgelegd. Het ding ervaart in zijn eigen tijd niets bijzonders. Het ziet jouw tijd steeds sneller gaan, maar zijn eigen tijd blijft voor dat ding volkomen normaal. En snelheid was de afstandsverandering tussen twee dingen en uiteraard zijn dat nu het zwart gat en dat vallende ding. Het ding is in vrije val, dus een inerte waarnemer, en het ziet natuurlijk alles vanuit zijn eigen perspectief. Dat betekent dus dat dat ding het zwart gat op zich af ziet komen. En dat gebeurt op ieder moment met de invalsnelheid op de betreffende afstand. En die was gelijk aan de ontsnappingsnelheid. En dan heeft het ding na een eindige tijd de waarnemingshorizon bereikt. Fout. Vanuit het perspectief van dat ding heeft de waarnemingshorizon dat ding bereikt. Met de bijbehorende ontsnappingsnelheid. En die is gelijk aan de lichtsnelheid.

Op het moment dat de waarnemingshorizon dat ding bereikt heeft het zwart gat dus voor dat ding precies de lichtsnelheid. En wat gebeurt er bij iedere relativistische snelheid? Lorentzcontractie. En wat betekende dat ook alweer bij de lichtsnelheid? Contractie tot helemaal hartstikke nul. De resterende afstand vanaf de waarnemingshorizon tot aan de centrale massa is gelijk aan de Schwarzschildstraal en die is dus geLorentzcontraheerd tot helemaal hartstikke nul. Het ding krijgt de centrale massa van het zwart gat met de lichtsnelheid in zijn gezicht geknetterd op hetzelfde moment als waarop de waarnemingshorizon passeert. Er bestaat voor dat ding dus helemaal geen waarnemingshorizon. Ja, toch wel, maar dan op een afstand tot de centrale massa van het zwart gat van helemaal hartstikke knetternul.

En hoe is het vanuit het perspectief van het zwart gat zelf? Wel, daar heerst de gravitationele lengtecontractie. En precies bij de Schwarzschildstraal resulteert die, soortgelijk als de Lorentzcontractie bij de lichtsnelheid, gewoon in helemaal hartstikke nul. De te gebruiken formule is namelijk identiek, maar dan met de ter plaatse geldende ontsnappingsnelheid in plaats van de "gewone". Dus voor het centrale massapunt van het zwart gat is de Schwarzschildstraal gravitationeel helemaal ingetrokken tot zo nul als nul maar nul kan zijn. Het vallende ding komt dus gewoon steeds sneller binnengevallen en dat eindigt met een directe botsing bij precies de lichtsnelheid. Er bestaat voor het zwart gat zelf dus helemaal geen "hebbes-horizon". Ja, toch wel, maar dan op een afstand van helemaal hartstikke knetternul.

De waarnemingshorizon bestaat dus alleen voor de waarnemer op afstand. Het is een geometrische illusie, een opgeblazen nul zonder enige betekenisvolle binnenkant. Zelfs geen lege ruimte. Nog nikser dan niks.

De finale klap waarbij de onderlinge snelheid instantaan van de lichtsnelheid tot nul afneemt is het enige dat je als een singulariteit zou kunnen beschouwen. Maar alleen als je met puntmassa's rekent. In de praktijk zal elk "ding" vast wel enige afmeting en incassingsvermogen hebben en dan is ook deze singulariteit een fabel. En natuurlijk is het plausibel dat het ding door die klap wordt vergruist tot elementaire deeltjes die vervolgens deel gaan uitmaken van de centrale massa.

25. Dawazzet

Lees alsjeblieft ook: <http://henk-reints.nl/relatievetijdstheorie.pdf>.

Dat is een wat ouder document, waarin ik ook de beroemde formule $E = mc^2$ enigszins uitleg.

En ik heb een slideshow gemaakt: <http://henk-reints.nl/HR-relativiteit-slides.pdf>