

Ruimte & Tijd

Waarom wetenschap en filosofie
een fascinerend koppel vormen
in de geschiedenis van de fysica

Wim Lintsen
2022

Inhoud	Pag.
Voorwoord	3
1. Het voorbeeld van Newton's ruimte-tijd	6
2. Absolute beweging en de opkomst van de klassieke mechanica	8
2.a De fysica van Descartes	8
2.b Newton's kritiek op Descartes' idee van ruimte en beweging	9
2.c De fysica van Newton	11
2.d De definitie van absolute tijd	13
2.e Absolute ruimte en beweging	15
2.f Ruimtetijd als interpretatiekader (deel 1)	19
2.f.1 Het interpretatiekader van Newton	19
2.g Het wereldsysteem van Newton	22
3. Uitgangspunten en betekenis van de speciale relativiteitstheorie	24
3.a Het begrip 'tijd' bij Einstein	24
3.b Ruimte en tijd bij Newton en Einstein	27
3.c De snelheid van het licht	29
3.d Van ruimte en tijd naar ruimtetijd	31
3.e De ruimtetijd wereld van Minkowski	33
3.e.1 Een nieuw ruimtetijd systeem	35
3.e.2 De geometrie van Minkowski	36
3.f Ruimtetijd als interpretatiekader (deel 2)	38
3.f.1 Het interpretatiekader van Einstein	39
3.f.2 Het interpretatiekader van Minkowski	41
4. Uitgangspunten en betekenis van de algemene relativiteitstheorie	47
4.a Versnelde bewegingen in de ruimte-tijd	47
4.b Gravitatie en versnelling	49
4.c De kromming van de ruimtetijd	54
4.c.1 Geodeten en beweging	56
4.c.2 Geodeten en gravitatie	58
4.d Ruimtetijd als interpretatiekader (deel 3)	60
4.e Het wereldsysteem van Einstein	63
Samenvatting	67
(Aanhangsel met bijlagen)	

Voorwoord

Een fascinerende benadering van ruimte en tijd ontstaat wanneer wetenschap en filosofie elkaar (kunnen) ontmoeten. Het is weinigen gegeven om die ontmoeting ook toegankelijk te maken voor een breder publiek. Als voorbeeld bespreek ik het boek van Robert Disalle, *Understanding space-time, The philosophical development of physics from Newton to Einstein*. Aan de orde is een grote vraag: – *hoe kunnen we ruimte en tijd en hun combinatie – ruimtetijd – begrijpen?* In tegenstelling tot het centrale debat in de filosofie van ruimte en tijd – namelijk de vraag of ruimte en tijd absoluut dan wel relatief zijn – behandelt dit boek specifiek de connectie tussen de begrippen ruimte en tijd enerzijds en de ontwikkeling van de fysica anderzijds. Het gaat dus niet om de vraag of ruimte en tijd zelfstandig dan wel relatief zijn. Het gaat eerder om de vraag hoe enige kennis van ruimte, tijd en beweging (überhaupt) mogelijk is. Meer specifiek: – Hoe kunnen we aspecten van onze fysische kennis beschouwen als kennis van ruimte en tijd? – Hoe kunnen we kenmerken van onze ervaring opvatten als aanwijzingen voor ruimte-tijd relaties? – Hoe laten de wetten van de fysica ons iets zien over de aard van ruimte en tijd?

De focus op bovenstaande vragen geeft ons een helderder beeld van de geschiedenis van de fysica. Want de momenten waarop deze vragen uiterst urgent werden, waren ook precies de meest revolutionaire momenten in de geschiedenis van de fysica van de ruimte-tijd. De *grote conceptuele veranderingen* die werden aangebracht door Newton, Einstein en hun collega's konden nooit op deze wijze tot stand zijn gebracht zonder een diepgaande reflectie op juist deze vragen. En ons gevoel dat deze transformaties cruciale stappen vooruit zijn geweest – namelijk dat ze, *los van (!)* de alsmaar succesvollere fysische theorieën, werkelijk hebben bijgedragen tot *een dieper begrijpen* van de aard en structuur van de ruimte-tijd – heeft alles te maken met het succes van hun filosofisch werk. Het is misschien vreemd om wetenschappers als Newton en Einstein ook als filosofen te zien. Maar uit het vervolg zal blijken dat de wetenschap daadwerkelijk verrijkt werd met hun filosofische reflecties over ruimte en tijd. Bij Newton blijft dit nog verborgen onder de formuleringen van de Principia. Maar bij Einstein zien we al hoe hij zich bewust is van de meerwaarde die een filosofische analyse kan hebben.

Tegenwoordig wordt de relevantie van de filosofie voor de fysica vooral in twee opzichten onderkend:

- a) als een bron van filosofische *motivaties* voor fysici, en
- b) zelfs als een bron van theoretische *hypotheses*,
- c) maar *niet* als een methode van wetenschappelijke *analyse*.

Het gaat om onmiskenbaar *subjectieve* motivaties en hypothesen; hun objectieve waarde kan enkel worden gemeten aan de empirische successen van de theorieën die zij produceren.

Einstein dacht nog dat iedereen die zijn filosofische stappen zou volgen, overtuigd zou raken van de basisprincipes van de speciale en algemene relativiteitstheorie. Maar filosofen zijn er later achter gekomen dat die stappen toch enigszins willekeurig zijn en dat ze ook niet duidelijk gerelateerd zijn aan de theorieën die Einstein produceerde. Ze hadden een heuristische waarde ¹, en die kunnen ze nog steeds hebben voor een toekomstige theorie van de ruimte-tijd. Om dat te begrijpen moeten we een stap verder gaan dan puur de constatering dat filosofie een bron is van filosofische motivaties voor fysici. We zullen dan moeten nagaan wat de werkelijke betekenis is van filosofische argumenten voor ons wetenschappelijk begrip van de wereld. En daartoe hebben we behoefte aan een filosofisch meer subtiele en een historisch meer realistische beschouwing van die argumenten, en van de specifieke rollen die filosofie en fysica daarbij, ieder op hun eigen gebied, hebben gespeeld.

Daarop is het boek van DiSalle gericht. De auteur is niet bezig met technische argumenten of academische conclusies. Noch is het hem te doen om nieuwe historische details. De nadruk ligt bij de presentatie van beslissende theorieën in de fysica, de gravitatie-theorie van Newton en de relativiteitstheorie van Einstein. Hij kijkt naar de rol die de begrippen van ruimte en tijd bij de ontwikkeling van deze theorieën hebben gespeeld. DiSalle is een wetenschapsfilosoof die kiest voor een specifieke invalshoek. Hij probeert te analyseren hoe de relatie tussen wetenschap en filosofie zich vruchtbaar ontwikkeld heeft via onze fysische aannames en onze kennis van ruimte en tijd.

De filosofen uit het begin van de 20ste eeuw hadden eigenlijk geen mogelijkheid om de geschiedenis vanuit dit perspectief te zien, omdat zij de filosofie van ruimte en tijd zagen als een wezenlijk argument *contra Newton*, dat wil zeggen, als een strijd van de moderne kennisleer tegen een ouderwetse metafysica, in dit geval de idee van een absolute ruimte en een absolute tijd. De auteur laat echter verrassenderwijs zien dat *de beste filosofie van ruimte en tijd* altijd is geweest een presentatie van argumenten die *begon* bij Newton, nl. als een antwoord op de vraag hoe de fysica zijn concepties van ruimte en tijd moest *definiëren* in empirische termen.

Mijn bespreking van het boek van Robert DiSalle getuigt van een dubbele aanpak. Ik probeer enerzijds zo dicht mogelijk de benadering van de auteur te volgen. Ik gebruik daartoe soms letterlijke teksten uit zijn boek en soms zelf

1 Wat is de heuristische waarde van Einsteins filosofische stappen? Ze hielpen hem op de een of andere manier bij zijn zoektocht naar een juiste fysische theorie, maar ze hadden zelf geen duidelijk empirische of objectieve inhoud; ze zetten hem slechts op een bepaald spoor dat zou kunnen leiden naar een empirische, objectieve invulling.

gemaakte samenvattingen. Maar tegelijk weef ik ook eigen teksten er tussen door, die bedoeld zijn als een nuttige aanvulling op het betoog van DiSalle. Daardoor is een verhaal ontstaan met een eigen logisch en samenhangend verloop. Een verhaal dat vooral wil laten zien hoe wetenschap en filosofie kunnen functioneren als een fascinerend koppel.

De meest voor de hand liggende lezers voor het boek van Robert DiSalle zouden wetenschaps-filosofen zijn met een interesse in de fysica, en fysici met een interesse in de conceptuele ontwikkeling en de filosofische betekenis van hun discipline. Maar mijn motivatie om een zelf geredigeerde tekst te schrijven n.a.v. het boek van DiSalle is een tweeledige.

Eenzijds heb ik ervaring als cursusdocent en weet hoe moeilijk het soms kan zijn om een breder publiek te bereiken. Het boek van DiSalle vraagt nogal wat achtergrondkennis die lang niet iedereen beschikbaar heeft. Ik zag me dan ook genoodzaakt een min of meer populaire versie van dit boek te produceren.

Anderzijds kan mijn eigen boek mogelijk de interesse wekken van elke filosofische lezer die nieuwsgierig is naar de rol van filosofische analyse *als* een (mogelijk) instrument van wetenschappelijk onderzoek. Meer nog kan het die lezer inspireren die nieuwsgierig is naar de fysische wereld *als* een object van filosofische reflectie. Op beide terreinen biedt de geschiedenis van de fysica van ruimte en tijd een weergaloze schat aan inzichten.

Wim Lintsen,
Hoorn, 2022

1. Het voorbeeld van Newton's ruimte-tijd

Waarom is er een 'filosofie van ruimte en tijd'? Twee evidente redenen.

1) Iedere studie van de aard van ruimte en tijd, en van onze kennis hiervan, doet noodzakelijkerwijs vragen rijzen die vallen onder de metafysica en kennisleer.

2) We kunnen deze vragen dieper gaan begrijpen via de fysica, die de structuur van ruimte en tijd, zowel op micro- als macroschaal, beschouwt als een essentieel onderdeel van haar studiegebied.

Deze redenen waren in het verleden lang niet zo vanzelfsprekend als ze vandaag de dag zijn. Om dit kort en krachtig te kunnen toelichten bespreek ik het voorbeeld van Newton's ruimtetijd dat Disalle geeft in zijn boek.²

Waar wil DiSalle naar toe als (wetenschaps)filosoof van ruimte en tijd?

In de algemene filosofie van ruimte en tijd staat de vraag centraal of ruimte en tijd absoluut dan wel relatief zijn³ DiSalle ziet zich echter gesteld voor een andere vraag. Niet dat hij afstand neemt van het centrale debat in deze tak van filosofie, maar wat hij voorstelt is een andere manier van benaderen. En zijn vraag betreft *de status* van de begrippen ruimte en tijd in de fysica.

Als voorbeeld noemt DiSalle de *rehabilitatie van 'Newton's ruimte-tijd'* in de jaren 60 van de 20ste eeuw! Dit geldt met name de ideeën die Newton had over:

- een absolute ruimte, en
- een absolute tijd.

Deze ideeën hebben eeuwenlang een slechte reputatie gehad. Ze werden beschouwd als puur metafysische ideeën zonder enige empirische inhoud. Met name de positivisten in het begin van de 20ste eeuw hebben via de relativiteitstheorie van Einstein een vernietigend oordeel uitgesproken over de absolute ruimte en tijd van Newton. Deze ideeën, zo meende men, waren methodologisch en kentheoretisch volkomen onhoudbaar. Oftewel, deze ideeën misten elke empirische betekenis; het waren lege, metafysische begrippen, onwaardig als bouwstenen voor een serieuze fysische theorie.

Maar er waren ook enkele fysici, zoals Weyl en Eddington, die in de eerste helft van de 20ste eeuw er op wezen dat Einstein's relativiteitstheorie ook op een heel andere manier geïnterpreteerd kon worden, los van de ontmanteling die de positivisten hadden bewerkstelligd ten aanzien van Newton's absolute ruimte en tijd. Er werd gewezen op *structurele aspecten* van de ruimte-tijd, met name in Einstein's algemene theorie. Als je namelijk op een meer geometrische wijze ging nadenken over de ruimte-tijd theorie van Einstein, dan waren er opeens overeenkomsten met de ruimte-tijd theorie van Newton! Want via de

2 Robert DiSalle, *Understanding space-time, The philosophical development of physics from Newton to Einstein*, Cambridge University Press, 2006, p. 15-17.

3 Zie bijvoorbeeld het boek:

– Barry Dainton, *Time and Space*, Routledge, second edition, 2010.

geometrische structuur kon een connectie worden gelegd tussen de begrippen van ruimte en tijd en hun toepassing in een fysische theorie (bijv. de nieuwe gravitatie theorie van Einstein). Dit ging niet alleen over de empirische betekenis van ruimte en tijd, het ging dieper dan dat. Het werkte naar twee kanten:

- a) enerzijds ging het om de toepassing van begrippen als ruimte en tijd in een fysische theorie,
- b) anderzijds ging het om de toepassing van fysische wetten binnen *een geschikt ruimte-tijd raamwerk*.

Deze benadering werkte gunstig uit voor een herwaardering van Newton's ruimte-tijd. Tegenwoordig zien veel filosofen hoe Newton destijds de strijd aanging met de visie van Descartes op ruimte en tijd. Newton had namelijk alle redenen om Descartes' visie aan te vallen; hij kon binnen Descartes' raamwerk van ruimte en tijd zijn eigen dynamische theorie van ruimte en tijd niet tot ontwikkeling brengen, en hij had gewoon een ander raamwerk nodig, puur voor zijn eigen fysica.

Wat veel filosofen echter ontgaat, is het feit dat Newton helemaal niet zó geïnteresseerd was in de vraag:

- Zijn ruimte en tijd absoluut of relatief?

Hij wilde enkel *een definitie* geven van 'absolute ruimte', 'absolute tijd' en 'absolute beweging'. Meer niet! En wel met als voornaamste doelen:

- a) het beschikbaar krijgen van empirische criteria waarmee hij die concepten kon toepassen, en
- b) het onthullen of zichtbaar maken van de rollen die deze concepten speelden bij het oplossen van problemen in de mechanica.

Newton gebruikte dus deze begrippen puur op een praktische manier, d.w.z. op een manier die deze begrippen geschikt maakte voor theoretische doeleinden. Zijn doel was niet om een discussie met Descartes aan te gaan over de aard van ruimte en tijd; hij constateerde eenvoudigweg dat het raamwerk van Descartes niet voldeed als instrument om een theoretische fysica tot ontwikkeling te brengen.

En vervolgens ging Newton zijn eigen weg en dat was de ontwikkeling van een volwaardige mechanische fysica, *een fysica die recht deed aan de geometrische structuur van de wereld op dat moment*. Dat was een ruimte-tijd structuur die zeer succesvol bleek in het verklaren en voorspellen van actuele mechanische verschijnselen, zoals de baan van planeten en kometen, de invloed van de maan op eb en vloed, of de rotatie-afremming van de aard-as.⁴

4 Zie Elsevier pocket boekje uit 1963:

- George Gamov, *De zwaartekracht, die het heelal beheerst*.
- . hoofdstuk 5. De aarde als draaiende tol.
- . hoofdstuk 6. Eb en vloed

2. Absolute beweging en de opkomst van de klassieke mechanica

Newton introduceerde een theorie van een absolute beweging in een absolute ruimte en tijd. Met welk recht deed hij dat?

We hebben al de betekenis van Newton's ruimte-tijd behandeld als een voorbeeld van een nieuwe benadering in de filosofie van ruimte en tijd, nl via een formulering van definitives. Maar wat waren Newton's beweegredenen om de waarneembare relatieve bewegingen te gaan verklaren met een beroep op onzichtbare entiteiten als een absolute ruimte en een absolute tijd? Welke rol kunnen zulke metafysische hypothesen spelen in de empirische fysica?

2.a De fysica van Descartes ⁵

Aan het begin van de 17^{de} eeuw had zich een kleine kopgroep van geleerden gevormd, onder wie Galilei en Descartes, die nieuwe wegen zochten om de fysische wereld te begrijpen. Copernicus en Kepler waren hen voorgedaan. Galilei ontwikkelde puur wetenschappelijke ideeën, maar Descartes trok vooral *filosofische conclusies*. Daarmee ontstond een revolutionair nieuw wereldbeeld. De wereld was een schepping Gods met een totaal nieuwe ordening:

- a) De wereld was puur wiskundig geordend op basis van wiskundige wetten.
- b) De wereld was niet bezielde maar bestond slechts uit 'dode' materie. Descartes zag de wereld gevuld met een oneindige hoeveelheid uniforme massadeeltjes. Deze deeltjes waren voortdurend aan het bewegen en botsen.
- c) Hoe de wereld en alles daarbinnen 'werkte' kon volledig worden verklaard met het beeld van een mechanisme. Het was een onderliggende causaliteit, die de onbezielde materie als het ware tot leven bracht.

Deze drie elementen – het wiskundige, het materiële en het mechanische – zorgden voor een ongekend, schokkend perspectief. De wereld die nog door de Middeleeuwen gezien werd als een doelmatige wereld, veranderde nu in een onbezielde wereld, enkel beheerst door natuurwetten.

Rond 1630 was Descartes begonnen met het schrijven van 'De wereld', een boek dat hij tijdens zijn leven nooit zou publiceren vanwege een hypothese waarvoor Galilei was veroordeeld. Descartes was katholiek en hij voegde zich naar de lering van de kerk dat de aarde stilstond in het centrum van het heelal. Maar in zijn fysica speelden de bewegingen van planeten om de zon een belangrijke rol. Hij bedacht een slimme oplossing: beweging is alleen maar verandering van plaats met betrekking tot lichamen in de nabijheid die als onbeweeglijk worden beschouwd. En aangezien de aarde ten opzichte van de (in haar nabijheid onbeweeglijke) dampkring niet bewoog, kon zij in dat opzicht (geholpen door de definitie van beweging!) dus niet bewegen. ⁶

⁵ Dit verhaal staat niet in DiSalle, maar dient als context.

⁶ Zie Tom Sorell, *Descartes*, uitgeverij Lemniscaat, nieuwe editie, 2014, pag. 118-119.

Newton zou hier later flinke kritiek op uitoefenen. Het principe van beweging klonk behoorlijk tegenstrijdig, want terwijl de dampkring zelf wel bewoog, zou de massa van de aarde niet bewegen. Het zegt iets over de ‘dubbelzinnige’ fysica van Descartes. Het was enerzijds een innovatieve theorie die zich puur baseerde op de interactie tussen materiedeeltjes, maar anderzijds probeerde de theorie ook theologen te behagen en bleef daarmee conservatief. De innovatie zat hem vooral in de opvatting dat de ruimte van de wereld geheel gevuld was met uiterst fijne materiedeeltjes die voortdurend op elkaar botsten en daardoor wervelachtige bewegingen produceerden.

Het ging om de idee dat alles in de materiële wereld verklaard kon worden via een door mechanische wetten functionerend systeem van botsingen en evenwichten van krachten. Het ging om wetten waarvan de werkingen in het dagelijks leven volop zichtbaar waren, zoals bijvoorbeeld in de kolkstromen van water. Deze kolkstromen zouden ook de cirkelvormige bewegingen van de planeten rond de zon verklaren. De planeten dreven als het ware mee op een zee van minuscule deeltjes die als een werveling werden rondgedraaid door de rotatie van de zon en dus simpele maar begrijpelijke cirkelvormige bewegingen produceerden. Een probleem was echter dat Descartes geen ‘geometrische demonstraties’ kon geven. In zijn ogen was het onmogelijk om wiskundige redeneringen op onweerlegbare wijze toe te passen binnen de fysica.⁷

2.b Newton’s kritiek op Descartes’ idee van ruimte en beweging

De fysica van Descartes heeft slechts korte tijd invloed gehad op het denken van filosofen en wetenschappers in de 17de eeuw. Het was Newton die met zijn uitgesproken fysische manier van denken juist aan de wiskunde een centrale rol zou gaan toekennen. Maar daartoe moest Newton zijn kritiek op Descartes wel verder verdiepen. DiSalle begint met een opvallend citaat uit de Principia van Newton; het betreft een inleiding tot diens eigen definities van ruimte en tijd:

“Hoewel tijd, plaats en beweging voor iedereen zeer vertrouwd zijn, moet toch worden opgemerkt dat deze kwantiteiten over het algemeen worden opgevat met betrekking tot voorwerpen van onze zintuiglijke waarneming. En dit is de bron van zekere vóóronderstellingen; om ze te kunnen elimineren is het nuttig deze kwantiteiten te onderscheiden in absolute en relatieve, ware en schijnbare, wiskundige en algemene.”

Newton wees hiermee op twee vooronderstellingen in Descartes’ fysica, die met elkaar in strijd waren.

1) Descartes bouwde met zijn fysica voort op het werk van Galilei. Deze had de rechtlijnige beweging beschreven van lichamen die naar beneden vallen. Daarbij had hij aangenomen dat de rotatie van de aarde om haar as vanwege haar uniforme snelheid (conform het relativiteitsbeginsel) geen invloed had op de

⁷ Zie Tom Sorell, *Descartes*, pag. 68-69.

neerwaartse beweging. Descartes wilde echter verder gaan. Hij had twee doelen voor zijn fysica: bewegingen op een mechanische manier verklaren en daarbij de *rechtlijnige* beweging als basisprincipe aanhouden. Dat principe hield in dat een beweging enkel een uniforme snelheid kon hebben als zij rechtlijnig was. Alle andere bewegingen, zoals de cirkelvormige, konden hier mechanisch (via botsingswetten) uit worden afgeleid.⁸

2) Descartes ontwikkelde in zijn fysica een speciale filosofie van ruimte en beweging, waarmee hij zowel een wetenschappelijk als een filosofisch doel nastreefde. Dat leidde tot twee tegenstrijdige groepen van vooronderstellingen. Enerzijds was er het mechanische programma met de rechtlijnige beweging als basisprincipe (zie onder 1). Maar anderzijds was er een filosofisch programma ten aanzien van de ruimte. Descartes dacht dat de ruimte *geen lege ruimte* is. Dat kon je als het ware ‘zien’. Ruimte was iets van en tussen voorwerpen, het was iets ‘uitgebreids’, iets dat was opgebouwd uit materiedeeltjes. Dat was al te zien aan massieve voorwerpen die ‘ruimte’ innamen. Maar het was ook te zien in de ruimtes tussen voorwerpen, immers deze ruimtes konden in principe worden opgevuld met materie.

Descartes zag de ruimte vooral als een mechanisch werkend systeem. De materie die de ruimte vulde (variërend van grote objecten tot uiterst fijne materiedeeltjes) was onderworpen aan universele natuurwetten. Het ging om causale wetten, die vormen en bewegingen verklaarden naar analogie van een uurwerk. Hiermee kon Descartes zowel de werking van het menselijk lichaam beschrijven als ook het draaiende zonnestelsel. Aldus wilde hij laten zien dat het universum eigenlijk simpel te begrijpen was op basis van zeven botsingswetten uit de mechanica. Daarmee liet hij ook zien dat alles in het universum, inclusief de ruimte zelf, bestond uit materie. Ruimte was in feite niets anders dan materie.

Zo ontwikkelde Descartes een *idee van ruimte* waar Newton grote moeite mee had. Het betekende onder meer dat de bewegingen van planeten niet werden verklaard tegen de achtergrond van een geometrische ruimte, maar als gevolg van materiestromen waarin de planeten mee ‘dreven’. Dat leek op zich nog logisch, maar Descartes had ook een speciale definitie opgesteld voor de beweging van de aarde, waardoor deze filosofisch gezien kon worden beschouwd als ‘in rust’ (zie hiervoor par 2.a). En dat ondervond, zoals we gezien hebben, scherpe kritiek van Newton. Zijn conclusie was dat in de fysica filosofische beschouwingen over de beweging achterwege moesten blijven en dat er alleen met puur fysische overwegingen gewerkt moest worden.

8 Descartes leidde hier op een logische manier uit af dat de rechtlijnige beweging van voorwerpen die vallen, geen beweging ‘van nature’ was. Het ging immers om een versnelde beweging zoals Galilei had aangetoond. Dus moest hier een kracht werkzaam zijn die vallende voorwerpen deed versnellen. En dat moest een contactkracht zijn, een interactiekracht tussen deeltjes, met in dit geval een bijzonder soort van wervelingseffect.

2.c De fysica van Newton ⁹

Anders dan Descartes ziet Newton hoe de bewegingen van planeten zich voltrekken in een lege ruimte. Weliswaar zijn de planeten materiële objecten, echter de krachten die zich afspelen tussen deze objecten, hebben zelf geen materieel karakter. Het gaat om krachten die massa's op afstand van elkaar kunnen uitoefenen. Het zijn geen contactkrachten zoals Descartes had gedacht. Deze idee van 'krachtwerking op afstand' is een geweldige impuls gebleken in de ontwikkeling van de natuurwetenschap. Newton wist nu op puur wiskundige wijze de bewegingen van de planeten te beschrijven, iets wat Descartes niet lukte. Het universum bleek niet alleen een materieel fenomeen te zijn, het was ook een domein van onzichtbare krachten in een lege ruimte.

Newton liet zich in zijn fysica inspireren door het beeld van een heelal waarin enkel massa's en krachten hun werk deden. Dit beeld komt tot leven via zijn drie bewegingswetten.

- 1) Elk lichaam volhardt in zijn toestand van rust of uniforme beweging, tenzij het wordt gedwongen om die toestand te veranderen door krachten die er op inwerken.
- 2) Verandering in beweging is recht evenredig met de bewegende kracht die op een lichaam inwerkt en voltrekt zich in de richting van de rechte lijn waarin die kracht werkt.
- 3) Bij iedere actie bestaat er een gelijke en tegenovergestelde reactie.

Newton geeft in zijn Principia drie voorbeelden van zijn eerste wet: de beweging van projectielen, de beweging van tollen en het roteren van planeten om hun as.¹⁰ Het is in feite een wet die al door Descartes was opgesteld. Maar bij Newton gaat de wet een rol spelen in een niet-materiële ruimte. Het wordt nu een wet die puur en alleen op de massa zelf betrekking heeft. De beweging van een massa is de beweging door een lege ruimte.

De tweede wet beschrijft de inwerking van een kracht op een massa. Maar het is een merkwaardige formulering, want het beschrijft de voortdurende inwerking van een kracht. In de mechanica van Descartes kennen we enkel krachten die in botsingssituaties voorkomen. Er is dus een verandering van beweging als gevolg van het contact tussen twee objecten. Het gaat dan om een eenmalige botsing, zoals bijvoorbeeld te zien is bij biljartballen. In de mechanica van Newton wordt echter iets anders voorgesteld. Het gaat om een kracht die voortdurend aan het werk is. We weten nog niet welke kracht Newton hier op het oog heeft, maar in het vervolg van de Principia blijkt het te gaan om de zwaartekracht.

⁹ Ook dit verhaal staat niet in DiSalle, maar dient als context.

¹⁰ Zie hiertoe de Wetenschappelijke biografie:

– Niccolo Guicciardini, *Newton, Alchemist, filosoof en natuurwetenschapper*, uitgave Natuur en techniek, 2003, pag. 67.

De derde wet tenslotte is van groot belang voor het begrip van het universum van Newton. De voorstanders van de magnetische filosofie hadden destijds gezegd dat de zon een kracht uitoefende op de planeten. Newton zegt nu dat met deze kracht die de zon op elke planeet uitoefent *een gelijke en tegengestelde kracht* (!) moest corresponderen van de planeten op de zon. De zon is dus geen onbeweeglijk lichaam dat op de aarde een werking uitoefent. Ook de zon ervaart een versnelling die door de aarde veroorzaakt wordt. Maar omdat de zon een grotere massa heeft dan de aarde en de andere planeten, kunnen we hem bij benadering als onbeweeglijk beschouwen.¹¹

Newton baseerde zijn fysica *niet*, zoals gebruikelijk in de 17de eeuw, op de analogie van een mechanisch aangedreven uurwerk. Descartes werkte met het begrip van een contactkracht, een kracht waardoor het ene radertje het andere radertje in beweging bracht. Maar Newton introduceerde een ander begrip van kracht. In de lege ruimte van Newton's universum was kracht niets anders dan de versnelde beweging van een object. Je hoefde slechts de versnelling en massa van een object te kennen om daaruit de kracht af te leiden die op het object inwerkte. Een contactkracht was dus niet meer nodig!

Dit was voor velen in de 17de eeuw een mysterieus universum, een universum waar onzichtbare krachten werkten. Newton realiseerde zich dat hij zijn fysica en daarmee zijn universum slechts overtuigingskracht kon geven door een visie te ontwikkelen op ruimte en tijd waarin mensen zich konden herkennen. Aldus kwam hij tot zijn filosofie van een absolute ruimte en een absolute tijd.

2.d De definitie van absolute tijd.

In de Principia luidt de definitie van tijd als volgt:

“Absolute, ware en mathematische tijd, stroomt, vanuit zichzelf en vanuit zijn eigen aard, op gelijkmatige wijze zonder enige relatie met iets externs.”¹²

Deze definitie heeft iets merkwaardigs. Op het eerste gezicht lijkt het helemaal niet op een fysische definitie. Het lijkt eerder op een filosofische definitie, gezien termen als ‘absoluut’, ‘waar’ en ‘vanuit zijn eigen aard’. De vraag is echter wat Newton zelf met deze definitie beoogde. Wilde hij een filosofisch statement afgeven of had de definitie misschien een andere betekenis? Wilde hij misschien met zijn definitie iets zeggen over de functie van de tijd in zijn fysica? *Wat* tijd is, dat wordt door Newton niet beantwoord! We worden niet veel wijzer over de tijd zelf. Misschien interesseerde het hem wel, maar belangrijker was de vraag *hoe* de tijd zich manifesteert.

¹¹ Zie Wetenschappelijke biografie, pag. 69-70.

¹² Vertaling van een tekst uit het boek:

– David Berlinski, *Newton's gift, How Sir Isaac Newton unlocked the System of the World*, Duckworth, 2000, p. 205.

Newton had een tijd-maatstaf nodig, waarmee hij zijn drie bewegingswetten kon laten werken. De tijd moest op een betrouwbare manier kwantitatief meetbaar zijn. Oftewel, de tijd moest te definiëren zijn als een fysisch betekenisvolle kwantitatieve eenheid. De nadruk in de definitie lag op het stromen van de tijd, d.w.z. het (voort)tikken van de tijd zoals dat kon worden waargenomen in een mechanisch uurwerk. De term ‘absolute tijd’ was vooral bedoeld als een fysische term, niet als een filosofische term. Dat heeft in de discussie tussen Newton en Leibniz voor veel verwarring gezorgd.¹³ Het begrip ‘absolute tijd’ had voor Newton twee *praktische* betekenissen:

- 1) het moest zorgen voor een onderscheid tussen gelijktijdige en niet gelijktijdige gebeurtenissen, en
- 2) het moest zorgen voor een onderscheid tussen gelijke en ongelijke tijdsintervallen.

De eerste betekenis was van groot belang om te kunnen komen tot een kosmische structuur waarin objecten (bijvoorbeeld de planeten) op één en hetzelfde moment een bepaalde plaats innamen. Als het materiële universum beheerst werd door mechanische wetten (zoals ook een uurwerk beheerst werd door een mechanische werking), dan lag de idee voor de hand (die in de 17de eeuw algemeen gedeeld werd) dat *het heelal zelf* werkte als een kosmisch uurwerk dat overal dezelfde tijd aangaf. De tijd was namelijk in de fysica een standaard-tijd waarvoor het mechanische uurwerk garant stond. En zoals in een uurwerk alle raderen op één bepaald moment een samengestelde structuur vormden, zo vormden ook alle objecten in het heelal op één bepaald, absoluut gelijktijdig moment een totale kosmische structuur.

De tweede betekenis van de absolute tijd is fysisch gezien interessant. Hier zien we een duidelijke relatie met de eerste bewegingswet van Newton. Daarin wordt gesproken over een lichaam dat volhardt in een uniforme beweging. Maar wat is dat: uniforme beweging? Het is een beweging waarin een lichaam gelijke afstanden aflegt in gelijke tijdsintervallen. Uniforme beweging gaat over de *snelheid* waarmee een lichaam beweegt. En snelheid is per definitie afstand gedeeld door tijd. Het is een praktische definitie die het mogelijk maakt om een beweging te meten.

In de definitie van snelheid spelen ruimte en tijd een kwantitatieve rol. In deze definitie komen als het ware ruimte en tijd samen. Snelheid is een ruimte-tijd

13 Leibniz was voorstander, filosofisch gezien, van een relatieve tijd. Dat betekende dat de tijd slechts bestond uit een orde van opeenvolging (vroeger dan, later dan, gelijktijdig met) en niet uit een verzameling van zelfstandige momenten. De *filosofische* term ‘absolute tijd’ had betrekking op een dergelijke werkelijk bestaande verzameling. De filosofische discussie over een relatieve versus een absolute tijd is een discussie over de *ontologische* status van de tijd., d.w.z. over de vraag: wat is de tijd werkelijk? Newton gebruikte echter de term ‘absolute tijd’ niet op een filosofische maar op een *wetenschappelijk-empirische* manier. Voor hem was de filosofische discussie irrelevant. Zie DiSalle, pag. 22.

verschijnsel. Snelheid is het product van een bepaalde samenhang tussen ruimte en tijd. Willen we de snelheid van iets meten dan moeten we zeker zijn van de afstanden en de tijden die we meten. Maar hoe weten we of een object gelijke afstanden aflegt in gelijke tijden? Wat nemen we als ‘zeker’ uitgangspunt: de gelijke afstanden of de gelijke tijden? Stel, we beginnen bij de gelijke tijden, dan kunnen we daarbij de afstanden noteren die een object aflegt en die dan gelijk zijn. Maar we kunnen ook beginnen bij de gelijke afstanden en dan daarbij de tijden noteren die het object doorloopt en die dan gelijk zijn.

In de tijd van Newton waren tijdswaarnemingen lang niet zo nauwkeurig als in onze tijd. Men vermoedde terecht dat astronomische bewegingen een exactere tijd lieten zien dan de mechanische bewegingen van een uurwerk. Het mechaniek kan slijten. Bijvoorbeeld liep het tikken van een mechanische klok in de loop van het jaar steeds verder achter bij de afwisseling van dag en nacht. Oftewel, de rotatie van de aarde om zijn as gaf een nauwkeuriger tijdsverloop aan dan welk mechanisch uurwerk ook. Dit duidde op een soort van kosmische tijd die door Newton werd aangeduid als een absolute tijd.

Newton's fysica gaat over de wetten in het universum. De drie bewegingswetten en later in de Principia de universele gravitatie wet vormen het centrum van zijn mechanisch systeem. Om die wetten *exact* te laten werken is een exacte meting van de ruimte alsmede een exacte meting van de tijd noodzakelijk. Maar ‘exact’ betekent in dit geval ‘ideaal’. Newton wist dat een puur uniforme beweging nergens in de natuur waarneembaar was. Het ging om een ideale beweging van een object dat volledig vrij was van welke inwerking dan ook. De eerste wet moest dan vooral beschouwd worden als een soort van ijkingswet. Naarmate de metingen van tijd en ruimte exacter werden, des te dichter benaderden ze de ideale uniforme beweging.

De eerste wet was dus maatgevend voor ruimte en tijd. En dus was het niet andersom, ruimte en tijd waren niet maatgevend voor de eerste wet; ze kregen via hun definitie de rol om deze wet te laten functioneren. Zonder deze wet hadden ze geen betekenis! De definitie van tijd, zoals hierboven weergegeven, is dan ook geen willekeurige afspraak, bijvoorbeeld de tijd van een mechanisch uurwerk. Integendeel, de tijd weergegeven door een uurwerk, wordt juist ‘gecontroleerd’ door de tijd, toegepast in de eerste wet. Overigens, in de overige wetten van Newton's fysica speelt de tijd een soortgelijke ideale, ‘absolute’ rol. De tijd moest deze wetten een absoluut karakter geven.

Aldus kon Newton een opmerkelijke bewering waarmaken ten aanzien van de rotatie van de aarde om haar as. Op het eerste gezicht lijkt de aarde een perfect uniforme draai beweging te maken rond haar as: na één etmaal heeft de aarde haar aswenteling voltooid. Volgens de eerste wet moet de aarde volharden in deze beweging. Oftewel, gedurende de loop van het jaar voltooit de aarde haar aswentelingen in perfect dezelfde tijd. Maar de mechanica van Newton leert iets

anders! Daartoe gebruiken we de gravitatie wet en passen haar toe op het systeem aarde-maan. De maan zorgt met haar gravitatie kracht voor de werking van de getijden op aarde: eb en vloed. Zeemassa's worden opgetild en remmen de aarde af. Om precies te kunnen berekenen hoeveel vertraging de aardrotatie ondervindt, moeten we gebruik maken van de ideale, absolute tijd, d.w.z. van een kosmische tijd die geldt voor de natuurwetten van Newton's fysica. En dan kan worden berekend dat na een eeuw de rotatie van de aarde om haar as met 14 seconden is vertraagd.¹⁴

2.e Absolute ruimte en beweging

In de Principia luidt de definitie van ruimte als volgt:

“Absolute ruimte, in zijn eigen aard, zonder enige relatie met iets externs, blijft altijd gelijksoortig en onbeweeglijk.”¹⁵

Deze definitie heeft dezelfde eigenaardigheid als de definitie van absolute tijd. Op het eerste gezicht lijkt het helemaal niet op een fysische definitie. Het lijkt eerder op een filosofische definitie, gezien termen als ‘absoluut’ en ‘in zijn eigen aard’. De vraag is echter wat Newton zelf met deze definitie beoogde. Wilde hij een filosofisch statement afgeven of had de definitie een andere betekenis? Wilde hij misschien met zijn definitie iets zeggen over de functie van de ruimte in zijn fysica? *Wat* ruimte is, dat wordt door Newton niet beantwoord! We worden niet veel wijzer over de ruimte zelf. Misschien interesseerde het hem wel, maar belangrijker was de vraag *hoe* de ruimte zich manifesteert.

Het ruimtebegrip vraagt om een andere benadering dan het tijdsbegrip. Ruimte is iets anders dan tijd. De termen ‘gelijksoortig’ en ‘onbeweeglijk’ in de definitie wijzen op specifieke eigenschappen van de ruimte. Zo is bijvoorbeeld de ruimte in alle richtingen gelijksoortig; voor lengte, breedte en hoogte gelden dezelfde kwantitatieve eenheden. En de ruimte is ook gelijksoortig als het gaat om de gelijkwaardige positie van alle punten in de ruimte. Maar Newton scheidt verwarring als hij stelt dat het in de absolute ruimte gaat om ‘absolute plaatsen’, d.w.z. om posities in de ruimte die voor altijd gelijk blijven. Ook hier ontspint zich een verwarrende discussie met Leibniz.¹⁶

Waar is het Newton eigenlijk om te doen in zijn definitie van ruimte? Hij wil een definitie van ruimte die samen met de definitie van tijd hem de mogelijkheid geeft om te komen tot een praktisch hanteerbaar begrip van ‘beweging’. Hij

14 Zie Gamov, *Zwaartekracht*, hoofdstuk 6: Eb en vloed.

15 Zie David Berlinski, *Newton's gift*, pag. 105.

16 DiSalle wijst ook hier op de irrelevantie van een filosofische discussie. Leibniz dacht dat Newton vastgelegde posities en richtingen in de ruimte wilde onderscheiden. Daarmee zou hij de filosofische idee van een absolute ruimte verdedigen tegenover de relatieve idee die Leibniz voorstond, namelijk dat de ruimte in geen enkel opzicht ‘vastligt’. Maar het is Newton helemaal niet te doen om deze *filosofische* discussie; hij wil de ruimte enkel op een *wetenschappelijk-empirische* manier benaderen. Zie DiSalle, pag. 26-27.

gebruikt daarvoor de term ‘absolute beweging’, een term die direct gekoppeld is aan de begrippen ‘absolute ruimte’ en ‘absolute tijd’. En nu wordt ook duidelijk waarom Newton in zijn definitie van ruimte de eigenschap ‘onbeweeglijk’ gebruikt. Wil je een *object in beweging* kunnen onderscheiden van een *object in rust* dan is een onbeweeglijke ruimte wel handig om het verschil te kunnen ‘zien’. We zien hier opnieuw hoe Newton zoekt naar een definitie met een praktische betekenis.

Het probleem is echter dat het begrip ‘absolute ruimte’ voor te veel verwarring zorgt. Meer nog dan het begrip ‘absolute tijd’ geeft het aanleiding tot onnodige filosofische discussies. Bestaat er zo iets als een ‘onbeweeglijke ruimte’? Hier kun je lang en breed over discussiëren. Maar de onbeweeglijke ruimte was voor Newton vooral een handig begrip om te kunnen werken met allerlei bewegingen van objecten. Het ging hem er om dat hij via ruimte en tijd, en dan vooral in hun connectie, bewegingen kon onderscheiden. Het ging hem dus vooral om een definitie van beweging in termen van snelheid. Snelheid, namelijk, gedefinieerd als ruimte gedeeld door tijd.

DiSalle komt dan ook tot een belangrijke conclusie: ¹⁷

- Newton’s theorie van absolute ruimte betreft enkel de structuur, niet van de ruimte, maar van de ruimte-tijd!
- Zij impliceert niet dat ruimte absoluut is – wat dat ook moge betekenen in filosofische zin – maar dat de ruimte op zodanige wijze verbonden is met de tijd dat daarmee verschillende soorten bewegingen op een goede manier kunnen worden gedefinieerd.

Het probleem rondom het begrip ‘absolute ruimte’ is echter hardnekkig. Niet alleen hebben we de neiging om ruimte los te zien van tijd, maar daarbij komt dat het begrip ‘absolute beweging’ ook voor onnodige verwarring zorgt. Newton is daar zelf mede verantwoordelijk voor. Doordat het begrip van absolute beweging een duister begrip bleek te zijn, heeft het ook zijn weerslag gehad op het begrip van de ruimte.

Wat is het geval? Newton heeft een ruimte begrip willen creëren dat lijnrecht staat tegenover het ruimte begrip van Descartes. Hij heeft willen laten zien dat zijn ruimte begrip wetenschappelijk gezien veel geschikter was. Maar daarmee is hij in een discussie verzeild geraakt die hem te veel de filosofie introk. Even terug naar het ruimte begrip van Descartes. In het universum van Descartes is de ruimte gevuld met materie. Het gaat om uiterst fijne materiedeeltjes die continu op elkaar botsten en daardoor wervelachtige bewegingen produceren. De ruimte is dus niets anders dan bewegende materie; objecten zoals planeten worden voortdurend meegeslept door deze bewegende ruimte. Zij zijn enkel ‘in rust’, d.w.z. hebben enkel een vaste plek *binnen* een bewegend geheel.

¹⁷ Zie DiSalle, pag. 26.

Voor Newton was deze visie op ruimte, op ‘bewegende ruimte’, onverteerbaar. Het gaat volledig in tegen ons gevoel van ruimte. Ruimte is niet in beweging, ruimte is ‘onbeweeglijk’. Bovendien kan ruimte niet worden vereenzelvigd met materie. Materie bevindt zich in en beweegt door de ruimte, ruimte zelf is in principe leeg. En daarom is ruimte in alle richtingen gelijksoortig of homogeen. Wat ruimte is, daarover laat Newton zich niet uit. Maar dat er een ruimte is met de door hem genoemde eigenschappen, gelijksoortig en onbeweeglijk, daaraan twijfelt hij als fysicus en wiskundige geen moment.

Het is niet vreemd dat uiteindelijk veel wetenschappers met name in de 18de en 19de eeuw zijn meegegaan met Newton’s idee van een absolute ruimte die zich oneindig uitstrekt in drie loodrecht op elkaar staande dimensies. Zij zagen samen met Newton een ruimtelijk decor dat uiterst geschikt was om bewegingen te beschrijven. In deze ruimte kunnen we bijvoorbeeld heel duidelijk het verschil zien tussen objecten in rust en objecten in beweging. We kunnen ook begrijpen hoe via een absolute ruimte de idee van een absolute beweging ontstaat, namelijk als een beweging die plaatsvindt van het ene absolute punt naar het andere.

Het begrip absolute beweging heeft echter voor veel discussie gezorgd. Het is namelijk in strijd met Galilei’s relativiteitsbeginsel. Volgens dit beginsel is er geen verschil tussen een object in rust en een object dat uniform beweegt. Het beginsel wordt ook wel het traagheidsbeginsel genoemd. Het is het vermogen van een object om zich te verzetten tegen de inwerking van een kracht. Vanuit zichzelf zal een object nooit zijn rusttoestand of zijn uniforme snelheid wijzigen. Dat gebeurt enkel onder invloed van krachten.

Newton kende Galilei’s relativiteitsbeginsel als geen ander en gaf er ook de juiste interpretatie aan. Het maakt niet uit of we ons bevinden in een systeem dat in rust is of in een systeem dat uniform beweegt. In beide gevallen werken de mechanische wetten op precies dezelfde manier. Bijvoorbeeld zullen de biljartballen dezelfde soort botsingen laten zien. Met andere woorden, er bestaat niet zo iets als een absolute beweging; de wetten van de fysica gelden gewoon voor *alle* systemen of ze nu in rust zijn of in uniforme beweging.

We hoeven dus geen relatie te leggen tussen een absolute beweging en een absolute ruimte. Dat dient geen praktisch doel. Waarom gebruikte Newton dan toch dit begrip van absolute beweging? Omdat hij de discussie aanging met het ruimte begrip van Descartes. Hij wilde laten zien dat er bewegingen in de ruimte plaatsvinden die onder invloed staan van bijzondere krachten, zijnde *geen* contactkrachten. Als voorbeeld beschrijft hij een experiment met een ronddraaiende emmer water.

Het is een beroemd experiment. DiSalle staat er even bij stil. Het experiment is vaak beschouwd als het bewijs voor een onbeweeglijke ruimte, een ruimte die invloed zou uitoefenen op het gebeuren in de ronddraaiende emmer. De ruimte zou het water dwingen om een holle vorm aan te nemen en tegen de wanden van

de emmer op te klimmen. Het zou het bewijs zijn dat de omgeving, in dit geval de absolute ruimte, zich kenbaar maakt in een lokaal gebeuren. Maar zeer waarschijnlijk ging het Newton om iets anders. Het ging hem om de rotatie als zodanig. In een roterend object werken krachten die bijvoorbeeld zorgen voor de verschijnselen in een ronddraaiende emmer met water. Het water klimt tegen de wanden op als gevolg van een centrifugale kracht, die gecombineerd is met de gravitatiekracht en de normaalkracht op het oppervlak van het water.¹⁸

Newton is zelf echter niet helder; hij houdt de optie open dat het opklimmen van het water tegen de wanden ook een voorbeeld zou kunnen zijn van de absolute beweging, d.w.z. van de beweging die plaatsvindt tegen de achtergrond van een absolute ruimte. Hiermee immers wilde hij aantonen dat het ruimtebegrip van Descartes het aflegde tegen zijn eigen ruimtebegrip. Maar wat hij vooral wilde aantonen is dat in de lege ruimte specifieke krachten werkzaam zijn door middel van versnelde bewegingen (tweede wet). *Er zijn allerlei mechanische krachten die overal hun werk doen in de wereld om ons heen.* Newton's verdienste hier is zijn inspirerend en innoverend inzicht in mechanische verschijnselen die zich voordoen bij vaste stoffen, vloeistoffen en gassen.

Newton was niet in staat om zijn ideeën van ruimte, tijd en beweging in absolute zin te bewijzen. Er bestaat ook geen enkel empirisch bewijs voor! Ook kon hij niet bewijzen dat zijn bewegingswetten absolute waarheid bevatten, want hij wist als geen ander dat elke wet ook uitzonderingen kon bevatten.¹⁹ Zijn verdienste is vooral dat hij heeft laten zien hoe een kritische, maar ook praktische analyse van ruimte en tijd hem brachten tot *de definities* zoals die hiervoor besproken zijn. Het gaat om filosofische intuïties die niet beginnen bij filosofische beginselen, maar die beginnen bij een kritische analyse van datgene wat wij vóóronderstellen wanneer we empirisch gaan nadenken over een fysica van de beweging. De weerlegging van Newton in de 20ste eeuw zou dan ook op precies dezelfde wijze tot stand komen via een kritische analyse van onze vóóronderstellingen in een nieuwe theoretische en empirische context.

18 In een prachtig artikel wordt exact uitgelegd hoe deze krachten op een mechanische manier het oppervlak van het ronddraaiende water een concave vorm geven. Het betreft: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Bucket_argument.

Om het artikel goed te kunnen begrijpen is wel enige kennis en ervaring vereist met de denkwijze van de mechanica. Zoals bekend stond Newton aan de basis van de moderne mechanica. De conclusie uit de huidige mechanische oplossing luidt dat de concave vorm die het oppervlak van het snel ronddraaiende water aanneemt, *niet* het gevolg is van een absolute ruimte. De concave vorm kan puur mechanisch worden verklaard op basis van lokale krachten. Het gaat hier dus ook *niet* om een voorbeeld van absolute beweging, d.w.z. van beweging, die plaatsvindt van het ene absolute punt naar het andere.

19 Zo heeft Einstein laten zien dat de onomstreden optelwet voor snelheden een belangrijke uitzondering kent. Snelheden die opgeteld worden bij de lichtsnelheid beantwoorden niet aan Newton's optelwet!

2.f Ruimtetijd als interpretatiekader (deel1)

DiSalle betoogt in zijn boek ‘Understanding space-time’ dat ruimte en tijd in de fysica een bijzondere positie innemen, zowel wetenschappelijk als filosofisch gezien. Ruimte en tijd zijn zeker *geen* factoren waarmee fysische verschijnselen te verklaren zijn. De verklaring van fysische verschijnselen geschiedt op basis van natuurwetten. Bijvoorbeeld, dat de aarde draait om de zon wordt door Newton verklaard via de gravitatiekracht die de zon uitoefent op de aarde. De rol van ruimte en tijd is om een exacte beschrijving mogelijk te maken van de beweging en snelheid van de aarde, dat wil zeggen:

- a) van de precieze ellipsvormige baan rond de zon (in exacte kilometers); de gemiddelde afstand wordt momenteel berekend op circa 150 miljoen kilometer.
- b) van de snelheid waarmee de aarde beweegt rond de zon, d.w.z. de afstand per eenheid van tijd; deze wordt momenteel berekend op circa 30 km/sec.

Dus ruimte en tijd dienen niet als verklaringskader, maar eerst en vooral als een faciliterend beschrijvingskader. Wat DiSalle laat zien is dat ze ook een functie hebben als interpretatiekader. En dat is hun filosofische betekenis. Ruimte en tijd zijn begrippen die we hanteren vanuit onze ervaring. We denken dat ze verwijzen naar entiteiten in de wereld: de ruimte en de tijd. Maar het zou ook anders kunnen zijn, nl. dat ze niet zozeer verwijzen naar ruimte en tijd als wel dat ze het ons mogelijk maken om ruimte en tijd te meten.²⁰ Oftewel, ruimte en tijd zijn dan eerst en vooral praktische begrippen, ze verwijzen naar onze manier van meten:

- ruimte staat dan voor de meetlat, en
- tijd staat dan voor de (slinger)klok.

Nu gold dit idee al voor wetenschappers als Kepler en Galilei. Bij Newton wordt er echter een nieuwe dimensie aan toegevoegd, een dimensie die alles te maken heeft met de fysica van Descartes. Zoals we hebben gezien laat deze fysica enkel contactkrachten toe, en Newton vond dit buitengewoon *onpraktisch*. Hij wilde ook gebruik kunnen maken van krachten op afstand, en daartoe ontwikkelde hij zijn drie bewegingswetten (zie par. 2.c).

2.f.1 Het interpretatiekader van Newton

Letten we goed op de eerste bewegingswet:

- Elk lichaam volhardt in zijn toestand van rust of beweging, tenzij er krachten op inwerken.

Wat hier opvalt is dat er een soort van ‘ideale’, ‘spontane’, ‘krachtenvrije’ beweging wordt beschreven, een beweging die voorwerpen als vrije vogels door de ruimte laat zweven, ongehinderd door welke inwerking maar ook. Het gaat om

²⁰ Zoals Wittgenstein leert, kan de taal ons vaak misleiden.

een soort absolute beweging, een beweging door een ruimte en tijd die als een universele, kosmische omgeving functioneren. Alleen in zo'n omgeving kan de krachtenvrije beweging zich voluit manifesteren. Dat zo'n omgeving ook werkelijk bestaat wordt niet door de eerste bewegingswet verondersteld, zij het wel gesuggereerd, nl. op de volgende wijze. *Het gaat om een beweging over exact gelijke afstanden in exact gelijke tijden.*

We zien hier hoe Newton een ruimte en tijd creëert die enerzijds de eerste bewegingswet mogelijk maakt, anderzijds juist door deze wet wordt opgeroepen. Zonder deze wet zou er helemaal geen sprake zijn van exact gelijke afstanden over exact gelijke tijden. Het gaat hier, zoals iedere fysicus weet, om een theoretische, fysische beweging die in de praktijk nergens voorkomt. Om deze beweging te kunnen meten zouden we moeten beschikken over een ideale meetlat en een ideale klok. Deze nu komen tot leven in de definities die Newton geeft van ruimte en tijd. En hun functie is duidelijk; ze moeten functioneren in de theorie die Newton gaat ontwikkelen.

Ruimte en tijd zijn dus niet maatgevend. Newton gaat niet uit van een werkelijk bestaande absolute ruimte of een werkelijk bestaande absolute tijd. Ruimte en tijd staan in dienst van de eerste bewegingswet. Het is deze wet die maatgevend wordt in Newton's fysica. Zij wordt maatgevend voor de theorie over krachten en massa's. Newton introduceerde via deze wet een theoretische wereld van ruimte en tijd, zodat hij aan de slag kon gaan met bewegingen waarin een krachtwerking tot uiting komt. We zien dit in de tweede bewegingswet.

- Verandering in beweging (d.w.z. in snelheid = ruimte / tijd) is recht evenredig met de bewegende kracht die op een lichaam inwerkt en voltrekt zich in de richting van de rechte lijn waarin die kracht werkt.

Er is hier een interessante interactie tussen de fysische theorie en de theorie van ruimte en tijd. Nogmaals, Newton was op zoek naar definities die ons praktische gebruik van ruimte en tijd geschikt konden maken voor gebruik in een fysische theorie. Zijn intuïtie zei hem dat de ruimte op zodanige wijze verbonden was met de tijd ²¹, dat daarmee verschillende soorten bewegingen op een goede manier konden worden beschreven én gemeten. Zoals bijv. de rotatie van de aarde om haar as. Door rekening te houden met getijdenkrachten kunnen we de vertraging van de rotatie-as berekenen. Die krachten kunnen we echter niet toepassen als we niet beschikken over een 'absolute' ruimte en een 'absolute' tijd, d.w.z. over een kader die de vertraging zichtbaar maakt *ten opzichte van* een kosmische tijd (zie ook par. 2.d).

Ruimte en tijd functioneren als een interpretatiekader, d.w.z. als een kader waarmee en waardoor we fysische verschijnselen kunnen gaan interpreteren. We zien dan die verschijnselen als het ware voor het eerst *begrijpelijk verschijnen* – d.w.z. vatbaar voor 'goede' theorie – want zonder dat kader zouden ze weliswaar

21 nl, via een absolute ruimte en een absolute tijd, *puur als definities*. Meer niet!

zichtbaar zijn maar nog steeds ontsnappen aan ons begrip. En dan zouden we bijv. de banen van de planeten rond de zon nog steeds niet kunnen vatten. Newton was de eerste wetenschapper die consequent ging werken met een ruimte-tijd kader. Sindsdien is dit kader niet meer weg te denken uit de fysica. Het functioneert als een onmisbare achtergrond voor tal van onderzoeken in de natuurwetenschap.

Het lijkt zo vanzelfsprekend, maar bij nader inzien is het een wonderlijke zaak. Hoe kunnen ruimte en tijd ons op weg helpen naar de ontdekking én formulering van natuurwetten? Dat heeft alles te maken met het doel dat fysici voor ogen hebben, namelijk de structuur (ruimte) en dynamiek (tijd) van fysische systemen doorgronden met behulp van een onderliggend beginsel. Daarbij is het ook van belang dat er een adequate wiskunde beschikbaar is waarin ruimte en tijd op een geschikte manier als variabelen kunnen functioneren. Zo kijken fysici al heel lang naar de structuur en dynamiek van het zonnestelsel met behulp van de gravitatiewet van Newton. Wanneer ze daarbij ook zijn differentiaal en integraal rekening toepassen ontstaat er een welhaast magisch verklarenskader voor de bewegingen van planeten, manen en kometen.

Ruimte en tijd spelen een cruciale rol in de vergelijkingen en formules van fysische wetten. Bijvoorbeeld geldt dit voor theorieën die zich richten op de beschrijving en verklaring van ruimtelijke velden, zoals het elektrische, het magnetische en het gravitatie veld. De wiskunde is een steeds grotere rol gaan spelen in de formulering van deze theorieën. Een nuttig voorbeeld is de vector rekening; bewegingen, snelheden en krachten kunnen worden omschreven en ontleed in eenheden die zowel een grootte als een richting weergeven. Aldus ontstaan er theorieën die de structuur (ruimte) en dynamiek (tijd) van deze velden hanteerbaar maken, waardoor er toetsbare consequenties uit kunnen worden afgeleid. Fysische theorieën staan of vallen echter met de geldigheid van onderliggende natuurwetten. Zo functioneren de elektromagnetische theorieën van Maxwell en de relativiteitstheorieën van Einstein dankzij fysische wetten, die de structuur en dynamiek van velden inhoudelijk verklaarbaar en voorspelbaar maken.

Newton had nog niet de beschikking over het veld-begrip. Maar zijn idee van de wereld als een ruimte-tijd systeem kan worden beschouwd als een eerste poging om fysische wetten op te sporen vanuit de idee dat structuur (ruimte) en dynamiek (tijd) een onmisbaar interpretatiekader opleveren. Het doel van zo'n kader is om fysische verschijnselen te kunnen interpreteren zodat ze onderzocht kunnen worden op ordeningen met een universele geldigheid. Het uiteindelijke doel is om fysische verschijnselen verklaarbaar en voorspelbaar te maken op basis van natuurwetten. Ruimte en tijd hebben daarbij een faciliterend en interpreterend vermogen van ongekende kracht.

2.g Het wereldsysteem van Newton

Wat was het doel van Newton's fysica? Het doel was om de bewegingen van massa's in het heelal te beschrijven en te verklaren. En dan denken we al gauw aan de bewegingen van planeten, kometen, manen, sterren en sterrenstelsels. Elke nacht zien we de planeten en de maan bewegen tegen de achtergrond van een vaste sterrenhemel. Maar in de loop van het jaar zien we de sterrenbeelden veranderen en dat betekent dat de bewegingen van de planeten en de maan dan worden waargenomen tegen de achtergrond van de dierenriem. Ook de zon beweegt zich door de 'baan' van de dierenriem. Vroeger werd daar grote betekenis aan toegekend. In de 17de eeuw was astrologie een serieuze studie. Ook Newton stond er niet negatief tegenover! Maar hij wist wel samen met andere astronomen dat de baan van de dierenriem in werkelijkheid de baan is die de aarde om de zon beschrijft. Het is de baan die *de ecliptica* wordt genoemd, de baan die ontstaat doordat de as van de aarde in een hoek van 23,5 graad staat ten opzichte van het vlak waarin zon en planeten zich bewegen.

Newton stelde zich tot doel om door middel van zijn fysica te begrijpen waardoor de bewegingen van bijvoorbeeld de maan, de planeten of de kometen zich voltrekken, zoals ze zich voltrekken. Hij zocht naar een causaal mechanisme, een mechanisme van oorzaak en gevolg, waarmee hij de hemelbewegingen niet alleen kon verklaren maar ook exact kon berekenen. Dat was een gigantische taak, rekenkundig gezien, want het betekende dat al de gegevens die bekend waren over de hemelbewegingen nu exact moeten passen in het rekenschema van zijn theorie. Maar hier kwamen twee hulpmiddelen hem goed van pas. Enerzijds was dat het wiskundig instrumentarium waarmee hij bijvoorbeeld kon aantonen dat de baan van planeten een ellipsvorm moest hebben. Anderzijds beschikte hij over een empirische wet die een kosmische reikwijdte had, namelijk de universele gravitatiewet. In deze wet kwam tot uitdrukking dat twee massa's elkaar wederzijds aantrekken, en wel op zo'n manier dat bewegingen zichtbaar werden rond een centraal zwaartepunt tussen de massa's.²² Het is een wet die we nog steeds gebruiken om bijvoorbeeld de banen van satellieten te berekenen.

De oorzaak van de gravitatiekracht moet dus worden gezocht in de massa's, maar de oorzaak van *de bewegingen* moet worden gezocht in de fysica van Newton,

22 Het betreft de beroemde formulering waarbij een kracht F die twee massa's *op elkaar* uitoefenen wordt afgeleid uit de grootte van de massa's M_1 en M_2 , hun onderlinge afstand d in het kwadraat en een universele gravitatieconstante G : $F = G \times (M_1 \times M_2) / d^2$. Met de formule voor deze kracht kon Newton wiskundig afleiden dat de baan van een planeet rond de zon ellipsvormig was. De zon beweegt door zijn enorme massa nauwelijks ten opzichte van de planeet. Dat is anders bij de onderlinge bewegingen van de aarde en de maan. De aarde sleept de maan mee in een ellipsbeweging, maar hetzelfde doet de maan ook met de aarde. Daardoor bewegen beide rond het zwaartepunt van hun massa's: de aarde in een zeer kleine ellips, de maan in een veel grotere ellips.

namelijk de theorie dat bewegingen in het heelal zijn samengesteld uit twee soorten: een eenparige beweging (de eerste bewegingswet) en een versnelde beweging (de tweede bewegingswet). De theorie van Newton's fysica dient als een conceptueel kader waarmee we kunnen gaan begrijpen hoe de bewegingen van massa's zich manifesteren onder invloed van 'krachten'. Overal in het heelal zijn de massa's van sterren, planeten, manen, e.d. bezig om elkaar aan te trekken. Met behulp van de bewegingswetten van Newton's fysica kunnen we hier (mede ook met hulp van de wiskunde) enige ordening in aan brengen. Aldus ontstaat er een 'bewegingssysteem van de wereld'.

Een opmerkelijk gegeven in Newton's systeem is de constatering dat de gravitatiekracht gelijkwaardig moet zijn aan de versnellingskracht. Of anders gezegd, de kracht die zorgt dat een trage massa in beweging wordt gebracht (de tweede bewegingswet) is van dezelfde soort als de kracht die zorgt dat een massa wordt aangetrokken door een andere massa. De gravitatiekracht is immers ook een versnellingskracht, namelijk een kracht die massa's versneld laat 'vallen', zoals Galilei al had aangetoond. De kracht van Newton's tweede bewegingswet is een kracht die massa's versneld doet 'bewegen'. Newton was zich bewust van de gelijkwaardigheid van deze twee krachten, maar hij begreep niet waarom dat zo was. Het was aan Einstein om hier een verklaring voor te geven. In zijn algemene relativiteitstheorie werden het vallen en het bewegen van een massa als het ware op één lijn gebracht.

Newton's fysica moet vooral worden geïnterpreteerd als een algemene theorie van 'bewegingen'. De valbeweging als gevolg van de gravitatiekracht is daarvan slechts een speciale groep van bewegingen, weliswaar een belangrijke deelgroep, maar toch een 'sub-groep'. En die 'valbeweging' kon worden geanalyseerd tegen de achtergrond van Newton's ruimte en tijd, en aan de hand van Newton's onderscheid tussen eenparige en versnelde bewegingen. Dat is de kracht van Newton's fysica. Het is een conceptueel stelsel, waarmee de bewegingen van allerlei massa's in het heelal op een elegante en doeltreffende manier kunnen worden beschreven en begrepen. Het is dan ook vooral dit 'bewegingssysteem van de wereld' dat grote indruk maakte op de tijdgenoten van Newton. Men dacht dat zijn fysica de geheimen van de natuur zelf had doorgrond. Dat wil zeggen, de natuur zelf liet haar ware gezicht zien via Newton's fysica.

Tegenwoordig wordt daar anders over gedacht. Tussen de massa's in het heelal werkt geen gravitatiekracht, d.w.z. geen kracht op afstand, maar worden de bewegingen van de massa's bepaald door een uitzonderlijke ruimte-tijd structuur. Het is alsof we terug moeten keren naar de definities van ruimte en tijd zoals Newton die opstelde. Misschien waren die definities iets 'te kort door de bocht'. Hoewel ze ons nog steeds aannemelijk voorkomen, moeten we er rekening mee houden dat ruimte en tijd mogelijk toch iets anders 'betekenen' dan we altijd hebben aangenomen.

3. Uitgangspunten en betekenis van de speciale relativiteitstheorie

Ik sla nu een hoofdstuk over in het boek van DiSalle, namelijk het hoofdstuk ‘Empiricisme en apriorisme vanaf Kant tot Poincaré’. Niet dat dit hoofdstuk onbelangrijk is, integendeel, maar het houdt de betooglijn enigszins tegen die DiSalle volgt van de ruimte-tijd van Newton naar de ruimte-tijd van Einstein. De titel van het hoofdstuk dat DiSalle wijdt aan Einstein luidt: ‘Uitgangspunten en betekenis van de relativiteitstheorie’. Het gaat om een betoog dat laat zien hoe de begrippen van ruimte en tijd niet alleen een wetenschappelijke maar ook een filosofische betekenis hebben. Althans, dat is de interessante stelling die hij inneemt in zijn boek. Het is een stelling die laat zien hoe door een wisselwerking tussen wetenschap en filosofie vooruitgang kan worden geboekt in de fysica. We zien dan een verrassende maar ook verhelderende lijn die loopt van Newton’s theorie naar de theorie van Einstein.

3.a Het begrip ‘tijd’ bij Einstein

Einstein heeft lang geworsteld met het begrip van ‘de tijd’, totdat hij een definitie vond die hem een nieuw perspectief gaf op onze tijdservaring. En wel een perspectief met verrassende gevolgen.

Laten we ons eerst nog even herinneren wat Newton verstond onder ‘de tijd’. Zijn definitie luidde als volgt:

“Absolute, ware en mathematische tijd, stroomt, vanuit zichzelf en vanuit zijn eigen aard, op gelijkmatige wijze zonder enige relatie met iets externs.”²³

We hebben hiervoor besproken wat er met deze definitie aan de hand is. Ik herhaal. Deze definitie heeft iets merkwaardigs. Op het eerste gezicht lijkt het helemaal niet op een fysische definitie. Het lijkt eerder op een filosofische definitie, gezien termen als ‘absoluut’, ‘waar’ en ‘vanuit zijn eigen aard’. De vraag is echter wat Newton zelf met deze definitie beoogde. Wilde hij een filosofisch statement afgeven of had de definitie misschien een andere betekenis? Wilde hij misschien met zijn definitie iets zeggen over de functie van de tijd in zijn fysica? *Wat* tijd is, dat wordt door Newton niet beantwoord! We worden niet veel wijzer over de tijd zelf. Misschien interesseerde het hem wel, maar belangrijker was de vraag *hoe* de tijd zich manifesteert.

In de definitie wordt benadrukt dat de tijd ‘stroomt’, en wel op een gelijkmatige manier zoals de slingerklok laat zien met een gelijkmatig heen en weer bewegend gewicht aan een slinger. Het mechanisme van de slingerklok geeft de onderzoeker een betrouwbaar middel in handen om de tijd te meten. Tijd is niet zozeer een abstract begrip als wel een vorm van stromen die mechanisch kan

23 Vertaling van een tekst uit het boek:

– David Berlinski, *Newton’s gift, How Sir Isaac Newton unlocked the System of the World*, Duckworth, 2000, p. 205.

worden uitgebeeld via de slingerbeweging van de slingerklok. Tijd is dus op te vatten als een fysisch begrip, d.w.z. als een begrip dat we kunnen toepassen in analyses van de fysica. De tijd helpt ons bij de nodige exacte waarnemingen die we willen doen als fysici. Het is een begrip dat we het beste kunnen begrijpen in haar wisselwerking met de fysica.

Dus het tijdsbegrip van Newton gaat niet zozeer over de ‘ware aard’ van de tijd, zoals filosofen die proberen te vatten. Het gaat veeleer over een ‘relevante betekenis’ van de tijd, en die kunnen we ‘definiëren’ of ‘afspreken’ op basis van een zekere bruikbaarheid. De tijd is voor fysici slechts relevant voor zover zij de fysica laat ‘werken’. Theoretisch gezien moet een fysische tijd aan de fysici toepassingsmogelijkheden bieden. Zo had Newton behoefte aan een ‘tijdsbegrip’ dat zijn bewegingswetten zo exact mogelijk tot uitdrukking liet komen. Daarmee kon hij ook zijn nieuwe fysische begrippen – zoals een trage en zware massa, of zoals versnellings- en gravitatiekrachten – een geldigheidskracht meegeven die zijn tijdgenoten wist te overtuigen. En aldus zou zijn wereldsysteem een wetenschappelijk houvast gaan bieden tot ver in de 19de eeuw.

Hoe zat dat bij Einstein? Natuurlijk voelde Einstein het enorme houvast dat de fysica van Newton aan fysici gaf. Hij was uiteraard sterk onder de indruk van Newton’s prestatie en van diens wereldbeeld. Maar toch knaagde er iets in hem. En dat was het probleem van *het synchroniseren van de tijd*. Hoe weet je of de tijd op de ene locatie gelijk loopt aan de tijd op een andere locatie? Oftewel, hoe kun je klokken die op verschillende plaatsen staan, met elkaar synchroniseren, zodat ze gelijk lopen? Of nog anders gezegd, hoe weet je of twee gebeurtenissen *gelijktijdig* zijn?

Waarom was dit voor Einstein een probleem? Op het patentbureau waar hij werkte, werden verschillende uitvindingen ingebracht die een oplossing boden voor de synchronisatie van klokken. Einstein zag dat er steeds een probleem om de hoek kwam kijken. Neem een waarnemer A die met *zijn* klok gebeurtenissen in zijn omgeving als gelijktijdig meet. Neem een andere waarnemer B die met *zijn* klok gebeurtenissen in zijn omgeving als gelijktijdig meet. Hoe weten we nu of de tijd die bij A loopt ook precies de tijd is die bij B loopt? Waarnemer A kan met zijn klok niet ‘zien’ of de klok bij B gelijktijdig loopt. En wanneer we de klokken van A en B op elkaar gaan afstemmen, zullen we steeds rekening moeten houden met de afstand tussen A en B, wat ook niet handig is.

Kortom, het synchroniseren van klokken levert geen eenduidige procedure op, *tenzij* we ons concentreren op de aard van het licht. Wat willen we zeggen wanneer we twee gebeurtenissen als gelijktijdig ‘zien’? Daarmee geven we aan dat het lichtsignaal van de ene gebeurtenis ons op het zelfde moment bereikt als het lichtsignaal van de andere gebeurtenis. Of we dit ook exact kunnen registreren is een andere zaak, maar ons gevoel zegt dat dit het geval moet zijn wanneer we twee gebeurtenissen gelijktijdig noemen. Dus in principe kunnen we

het begrip ‘gelijktijdigheid’ via een simpele procedure vastleggen. En dat is precies wat Einstein deed.

We hebben de relativiteitstheorie te danken aan Einstein’s diepere, filosofische analyse van het begrip gelijktijdigheid. Het gaat om ‘de tijd’ die een lichtstraal er over doet om ons oog te bereiken. En als de lichtstralen van twee gebeurtenissen uit onze omgeving (bijvoorbeeld twee blikseminslagen) ons oog op hetzelfde moment bereiken, dan weten we met zekerheid dat die gebeurtenissen gelijktijdig zijn. Waarom weten we dat met zekerheid? Omdat we er van uitgaan dat het licht vanuit welke richting het ook komt, steeds dezelfde snelheid heeft. Moeten we dat dan niet eerst controleren?

Einstein vindt van niet. We hoeven de constantheid van het licht niet te controleren, want de theorie van Maxwell is daar klip en klaar over: licht in de vorm van elektromagnetische straling heeft altijd en overal dezelfde snelheid. Dat is een logische konsekwentie van de theorie, en anders deugt de theorie niet. We zien hier hoe Einstein niet alleen een bewonderaar is van de theorie van Newton, maar tevens een groot bewonderaar van de theorie van Maxwell. Einstein neemt daarmee wel een risico: de theorie van Maxwell zou ook wel eens onwaar kunnen zijn. Maar hij ziet niet in hoe dat zou kunnen gebeuren. Maxwell’s theorie is voor hem een waar meesterwerk, vooral door toedoen van het nieuwe veld-begrip dat de fysica enorm verrijkt.

We zien nu ook hoe de definitie van ‘gelijktijdigheid’ zowel een filosofische alsook een wetenschappelijke dimensie heeft. De filosofische dimensie wordt weergegeven door onze ‘ervaring’ met tijd en gelijktijdigheid. We hebben hier bepaalde intuïties die ons een gevoel van zekerheid geven. Tegelijk kunnen deze intuïties worden gekoppeld aan een theorie over het licht. En dat is precies wat Einstein doet. De invariantie van de lichtsnelheid is voor Einstein een gegeven dat ‘vanzelfsprekend’ is vanuit de theorie van Maxwell. Daar is geen discussie over. En zo komt Einstein tot zijn eenduidige definitie van gelijktijdigheid:

Voor twee punten A en B (plaatsen in de ruimte waar bepaalde gebeurtenissen plaatsvinden) kan pas *een ‘gemeenschappelijke tijd’* worden gedefinieerd als wij “per definitie bepalen dat de ‘tijd’ die nodig is voor het licht om te reizen van A naar B gelijk is aan de ‘tijd’ die nodig is voor het licht om te reizen van B naar A.”

Wat is er zo bijzonder aan deze definitie van ‘de tijd’? Zij maakt dat we nu de gelijktijdigheid van gebeurtenissen empirisch kunnen vaststellen. Let wel, we stellen niet vast wat gelijktijdigheid is. Het gaat Einstein niet om de aard van de tijd of om de aard van gelijktijdigheid. Het gaat hem er enkel op hoe we gelijktijdigheid kunnen vaststellen. Namelijk door aan te nemen dat lichtstralen gelijke afstanden in gelijke tijden afleggen.

Einstein doet hetzelfde voor zijn theorie wat Newton deed voor de zijne, namelijk het vaststellen van definities die nuttig en bruikbaar zijn om de fysica van de theorie te laten werken. Voor Newton was dat de absolute tijd en voor Einstein wordt dat de absolute gelijktijdigheid.²⁴ Newton kon met zijn definities van ruimte en tijd laten zien hoe bewegingen kwantitatief uit te drukken zijn in snelheid en versnelling, en daarmee kon hij zijn bewegingswetten (die gaan over massa en kracht) laten werken. Einstein kan nu met zijn definitie van gelijktijdigheid laten zien dat er een verschil is tussen de ene en de andere waarnemer als het gaat om hun metingen van gelijktijdigheid.

Het beroemde voorbeeld dat hij geeft is dat van een trein die een perron passeert. Midden op het perron staat waarnemer A en midden in de trein waarnemer B. Op het moment dat de twee waarnemers elkaar passeren, slaat de bliksem in, precies achter en precies voor de trein. Voor waarnemer A zijn die twee gebeurtenissen gelijktijdig, maar dat zijn ze niet voor waarnemer B! Bezien vanuit het perron bereikt het licht van de voorste bliksem iets eerder het oog van B dan het licht van de achterste bliksem. En dit gebeurt 'echt'! Waarnemer B kan gewoon de twee gebeurtenissen nooit als gelijktijdig waarnemen! Dat laat het licht niet toe! De fysische wereld van het licht laat een verschil zien in wat de tijd doet bij de ene waarnemer en wat de tijd doet bij de andere waarnemer. *Er is geen 'gemeenschappelijke tijd'*.

Het bijzondere van dit voorbeeld is dat de waarnemingen van A en B ons niet onnatuurlijk voorkomen; vanuit de vertrouwde definitie van gelijktijdigheid kunnen we begrijpen dat wanneer waarnemer A de twee bliksems gelijktijdig ziet, waarnemer B ze niet gelijktijdig ziet. Maar tegelijk druist het in tegen ons intuïtieve 'gevoel' van gelijktijdigheid. Zou er misschien toch iets mis zijn met de waarneming van B? Maar B heeft gewoon de goede procedure gevolgd en terecht geconstateerd dat de lichtsignalen van de bliksems niet gelijktijdig bij hem aankwamen. *Dit was voor Einstein dé eye-opener naar zijn theorie.* Blijkbaar kan de tijd voor de ene waarnemer anders lopen dan voor de andere waarnemer. En met zijn relativiteitstheorie opende hij een nieuwe wereld.

3.b Ruimte en tijd bij Newton en Einstein

Einstein ontwikkelde een theorie die liet zien dat ruimte en tijd veranderen zodra we de situatie in bewegende voorwerpen vergelijken met onze situatie 'in rust'. Zoals het voorbeeld hierboven al liet zien, verandert de tijd voor de waarnemer in de trein in vergelijking met de tijd voor de waarnemer op het perron. Wanneer wij nog 'in rust' gebeurtenissen als gelijktijdig zien, dan worden die niet meer als

²⁴ De absolute tijd van de gelijktijdigheid zit hem in de eenduidige procedure waarmee we vaststellen of twee gebeurtenissen in onze omgeving gelijktijdig zijn. Het enige wat we hoeven te doen is kijken of de twee lichtstralen van die twee gebeurtenissen op hetzelfde moment bij ons aankomen. We weten dan ook dat ze op dezelfde afstand van ons plaatsvinden

gelijktijdig waargenomen door de waarnemer in beweging. Er is dus geen gemeenschappelijke tijd die we samen delen. De tijd in de ene situatie loopt anders dan de tijd in de andere situatie. Dat was het spectaculaire inzicht dat Einstein verwierf omtrent 'de tijd'. En hij kwam tot de bevinding dat de tijd bij de bewegende waarnemer trager moest verlopen. Wij zouden dit kunnen zien wanneer we vanuit onze rust situatie het tempo van zijn klok zouden kunnen 'volgen' en dat tempo zouden vergelijken met het tempo van onze klok. Hoe sneller de ander beweegt des te trager loopt zijn klok ten opzichte van onze klok. En als hij de snelheid van het licht zou bereiken, dan zou zijn klok vanuit onze positie gezien, gewoon stilstaan! Einstein kon dit effect berekenen via een aparte transformatie-formule, die de tijd in ons systeem transformeert naar de tijd in het bewegende systeem.

Er was ook een soortgelijk effect met betrekking tot 'de ruimte'. *Als twee waarnemers geen gemeenschappelijke tijd hebben, dan hebben ze ook geen gemeenschappelijke ruimte!* Dit geldt in ieder geval wanneer ze waarnemingen doen met betrekking tot de snelheid van het licht! De waarnemer in rust meet een snelheid van 300.000 kilometer per seconde en de bewegende waarnemer meet *eenzelfde snelheid!* Dat is namelijk het beroemde licht-postulaat in Einstein's speciale relativiteitstheorie: de snelheid van het licht is overal in het heelal gelijk, *in welke situatie dan ook*. We weten dat de tijd bij de bewegende waarnemer langzamer loopt dan onze tijd. Als bij ons één seconde is verstreken, dan is bij de bewegende waarnemer bijv. maar een halve seconde verstreken. Nu geldt: *snelheid is ruimte gedeeld door tijd*. Wil de bewegende waarnemer eenzelfde lichtsnelheid meten, dan moet zijn ruimte aangepast zijn aan zijn tijd! Dus zal het licht bij hem in die halve seconde slechts een afstand overbruggen van 150.000 kilometer, en daarmee weer uitkomen op eenzelfde lichtsnelheid. Oftewel, de ruimte is bij hem, *vergeleken met onze situatie*, met de helft gekrompen!

We betreden hier een volstrekt nieuwe wereld, een wereld waarin de tijd kan vertragen en de ruimte kan krimpen. Einstein was zich er van bewust dat dit voor veel fysici ongeloofwaardig zou overkomen. Want een dergelijke wereld was volstrekt onbekend en eigenlijk ook volledig onvoorstelbaar. Het duurde dan ook enige tientallen jaren vooraleer de speciale relativiteitstheorie een algemeen geaccepteerde theorie werd. Zij heeft die erkenning vooral te danken aan haar toepassingsmogelijkheden in deeltjesversnellers. Zonder de speciale theorie zijn de resultaten van experimenten met deeltjesversnellers niet te begrijpen of te voorspellen. Zo worden de constructie en werking van deeltjesversnellers mede bepaald door deze theorie. Wanneer elementaire deeltjes zoals elektronen of protonen met enorme snelheden rondvliegen door de deeltjesversneller, zullen bijv. bepaalde stralingen moeten worden afgevangen en magnetische krachten nauwkeurig moeten worden bijgesteld. Dit alles in overeenstemming met de speciale theorie en begeleid door onze kennis van subatomaire deeltjes.

Dit neemt niet weg dat de speciale relativiteitstheorie nog steeds voor veel mensen een mysterieuze theorie is. Dat heeft alles te maken met onze vertrouwde begrippen van ruimte en tijd. Vandaar dat het begrijpen van deze theorie ook een filosofische oefening is. Namelijk een oefening in begripsvorming en het toekennen van betekenis aan begrippen. Ook de fysicus zal hieraan moeten geloven! In ieder geval deed Einstein dat; hij geloofde dat een fundamenteel wetenschapper ook in zekere zin filosoof moest zijn. Fundamentele wetenschap is geen puur wetenschappelijke aangelegenheid. De fysicus zal moeten beseffen dat een aantal van zijn elementaire begrippen voortkomen uit onze dagelijkse ervaring. Begrippen als ruimte en tijd, of beweging en snelheid.

De speciale relativiteitstheorie zet de vertrouwde begrippen van ruimte en tijd min of meer op hun kop. Wij zijn samen met Newton gewend aan een 'vaste' ruimte en een 'vaste' tijd. Dat wil zeggen, wij kunnen ons niet voorstellen dat ruimte en tijd zouden kunnen veranderen: onze meetlat geeft gewoon een vaste meter lengte aan en onze klok een vaste uur tijd. Stel je voor dat ruimte en tijd konden veranderen, dan hadden we geen houvast meer. Bovendien, hoe moeten we ons dat dan voorstellen? Hoe kan tijd überhaupt vertragen en ruimte überhaupt krimpen? Onze ervaring met ruimte en tijd is juist dat het hier gaat om 'grootheden' in de natuur die een stabiel achtergrond decor vormen voor alles wat er om ons heen gebeurt in de wereld.

Is er dan iets mis met onze vertrouwde ervaring van ruimte en tijd? Kunnen we daar niet meer op vertrouwen? Het antwoord is geruststellend: we kunnen gewoon blijven vertrouwen op onze ervaring van ruimte en tijd. Daar is niks mis mee. Sterker nog, wanneer we een satelliet lanceren met een raket, dan kunnen we de baan van raket en satelliet exact berekenen met de theorie van Newton. In deze theorie worden ruimte en tijd opgevat zoals we dat gewend zijn, namelijk als een 'vaste' ruimte en onafhankelijk daarvan een 'vaste' tijd. Hoewel de theorie van Newton beschouwd wordt als een 'klassieke' theorie, voldoet zij nog steeds uitstekend bij berekeningen van situaties en bewegingen in ons zonnestelsel. Een reis naar de maan of naar Mars kan met Newton's theorie uitstekend worden 'ingepland'. Wat is er dan aan de hand in de speciale relativiteitstheorie van Einstein, waardoor deze afwijkt van Newton's theorie?

3.c De snelheid van het licht

In het boek van DiSalle wordt slechts zijdelings aandacht besteed aan Maxwell's theorie van het licht. Toch is deze theorie van 'levensbelang' om te begrijpen wat er gebeurt in de speciale relativiteitstheorie. Maar hier wordt wel onze verbeeldingskracht op de proef gesteld. Oftewel, ons begrip van de fysieke wereld krijgt in de theorie van Maxwell een onverwachte bijstelling. Er wordt van ons verwacht dat we op een speciale manier naar het licht gaan kijken. Ook hier kunnen de gewone alledaagse ervaringen ons parten spelen. We weten wel

dat het licht een bepaalde snelheid heeft, maar wanneer we naar de sterren kijken, dan hebben we niet het gevoel dat we kijken naar licht dat uit een ver verleden op ons af komt. We hebben een ander soort gevoel: het is alsof de sterren er *nu* zijn, d.w.z. alsof we de sterren die we zien ook *nu* aanwezig zijn.²⁵ De nachtelijke wereld is een wereld die ons de werkelijke aanwezigheid van de kosmos laat zien. Maar is dat ook zo? Zien wij werkelijk de kosmos zoals zij *nu* is? Vreemde vraag! Wat wij zien is toch alles wat *nu* aanwezig is. Anders zouden we het niet kunnen zien. Morgen, volgende week, volgend jaar en zelfs volgende eeuw zullen mensen steeds dezelfde hemel zien. Dus lijkt de kosmos in onze dagelijkse ervaring een onveranderlijke ruimte van oneindige diepte. Maar is ze dat ook? Filosoferen over wetenschap is ook filosoferen over onze manier van zien. Misschien kan het licht daar enige helderheid over geven.

Stel je in gedachten voor dat de lichtsnelheid oneindig was. Dan zou je inderdaad alle sterren zien zoals ze nu zijn. Want het licht van de sterren zou dan ogenblikkelijk in je gezichtsveld verschijnen. Het zou dan lijken alsof we de hele kosmos in één ogenblik kunnen overzien. En dat kunnen we ook, namelijk in onze voorstellingswereld. Bijvoorbeeld zien we dan ons zonnestelsel zoals dat op elk moment aan ons verschijnt in de berekeningen van Newton. We zien dan precies waar alle planeten zich op een bepaald moment ten opzichte van elkaar bevinden. Dat is het fascinerende beeld dat Newton ons laat zien wanneer de lichtsnelheid oneindig is, d.w.z. wanneer het licht van de diverse planeten ons ogenblikkelijk bereikt. En dit is een beeld waar niks mis mee is. Sterker nog, we begrijpen heel goed hoe de berekening van Newton werkt.

In de theorie van Newton speelt de gravitatiekracht een centrale rol bij de berekening van de planeetbewegingen. Het is een onzichtbare kracht op afstand die rechtstreeks werkt, d.w.z. het is een kracht die werkt met een oneindige snelheid. Aldus begrijpen we hoe alle planeten in één keer op hun plaats gezet kunnen worden, want op één bepaald moment geldt één en dezelfde kracht voor alle planeten tegelijkertijd. Newton had een gelijktijdigheidsbegrip dat hierop gebaseerd was! We zien dan het zonnestelsel zoals het werkt in de vorm van een ingewikkeld samenstel van raderen. Zodra een van de raderen gaat bewegen, bewegen alle andere raderen direct mee. Het zonnestelsel uitgebeeld als een raderwerk van planeten die als het ware in hun bewegingen op elkaar zijn afgestemd, dat is voor ons eigenlijk een heel vertrouwde voorstelling. We hoeven maar een planetarium te bezoeken of we zien het voor onze ogen verschijnen.

Einstein zal deze voorstelling van de kosmos in zijn algemene relativiteitstheorie sterk aanvallen. Met name de directe werking van de gravitatie is voor hem, fysisch gezien, een onmogelijk iets. Conform de elektromagnetische theorie van Maxwell beweegt niets in het heelal zich sneller dan het licht. Ook de

²⁵ Zie bijlage 1.

gravitatiekracht is dan gebonden aan de maximum snelheid van het licht. Stel dat de gravitatiekracht van de zon opeens zou wegvallen, dan zouden wij dat hier op aarde pas na 8 minuten merken. De zon wekt immers elk moment een gravitatieveld op met de snelheid van het licht. Dus wanneer zij daarmee stopt duurt het nog even voordat het einde van het veld ons bereikt. We komen hier nog op terug wanneer we de algemene relativiteitstheorie behandelen. Hoe dan ook, niets in het heelal gaat sneller dan het licht. Dit fundamentele inzicht haalde Einstein uit de theorie van Maxwell. Maxwell zelf had dat nog niet gezien! Maar al zijn tijdgenoten zagen dit ook niet. Zij dachten dat de snelheid van het licht een snelheid was ten opzichte van een medium, de ether. Net zoals watergolven snelheden hebben ten opzicht van het water, net zo hebben lichtgolven, zo dacht men, snelheden ten opzicht van de licht-ether. Er wordt wel beweerd dat Einstein zich niet zo bewust was van de ether theorie. Hij was zich veel meer bewust van de theorie die door Maxwell was ontwikkeld met betrekking tot magnetische en elektrische verschijnselen. Hij had een groot ontzag voor deze theorie, met name voor de voorspelling dat licht een vorm is van elektromagnetische straling en dat er meerdere vormen van deze straling bestaan met als eigenschap dat ze allemaal dezelfde snelheid hebben. Die voorspelling was immers op spectaculaire wijze bevestigd door de ontdekking en toepassing van radiogolven (Herz en Marconi). Einstein dacht na over de aard van het licht en kwam met het idee dat licht niet alleen bestond uit golven maar ook uit deeltjes. En als licht een snelheid had, dan waren het de deeltjes, de fotonen, die zich met een snelheid van het licht voortbewogen door een vacuüm. Een medium was dan niet meer nodig, want de deeltjes konden zich gewoon zelfstandig verplaatsen door de ruimte. Wat Einstein echter bezig hield was de constantheid van de lichtsnelheid. Op de een of andere manier had hij het gevoel dat het hier ging om een natuurwet. De theorie van Maxwell legde geen enkele beperking op aan situaties waarin het licht zich liet gelden. Of het nu ging om een lichtbron in rust of om een lichtbron in beweging, steeds gaf de theorie dezelfde snelheid van het licht.

3.d Van ruimte en tijd naar ruimtetijd

Het is de maximum snelheid van het licht, die ons voorstellingsvermogen op de proef stelt. We zijn namelijk gewend om snelheden op te tellen. Maar bij de lichtsnelheid lukt dat niet meer. Wanneer we een bepaalde snelheid willen optellen bij de lichtsnelheid, dan zal die optelling steeds weer de lichtsnelheid opleveren. En dat is moeilijk te vatten! Tenzij we accepteren dat er iets aan de hand is met ruimte en tijd! Want snelheid is ruimte gedeeld door tijd. Dus als ruimte en tijd (zouden) kunnen veranderen, dan zou dat effect kunnen hebben op de snelheid van bewegingen in het heelal. En zoals we gezien hebben in par. 3.b kan de ruimte dusdanig krimpen en de tijd dusdanig vertragen, dat steeds weer daaruit de snelheid van het licht verschijnt. Nergens wordt die snelheid ook maar

enigszins overschreden. Het zijn de transformatieformules in de speciale relativiteitstheorie, die dat regelen.

Wanneer we de situaties van twee waarnemers met elkaar vergelijken, dan kunnen we ruimte en tijd van het ene systeem transformeren naar ruimte en tijd in het andere systeem.²⁶ Einstein had een aparte transformatieformule voor de ruimte en een aparte transformatieformule voor de tijd. Hij behandelde ruimte en tijd als twee aparte grootheden, d.w.z. niet als twee onafhankelijke, maar als twee eigensoortige grootheden. Namelijk de ruimte zoals wij die ervaren met onze meetlat en de tijd zoals wij die ervaren met onze klok. Maar tegelijk werden ruimte en tijd in de transformatieformules aan elkaar gekoppeld en met elkaar verenigd.²⁷ Als een voorwerp gaat bewegen door de ruimte, levert het iets van zijn tijd in aan de ruimte, waardoor de tijd vertraagt. Maar tegelijkertijd wordt de ruimte door de tijd tegengehouden om zich volledig te ontplooiën; de ruimte manifesteert zich als gekrompen ruimte. En deze effecten worden sterker naarmate het voorwerp harder beweegt. Pas wanneer een voorwerp ‘in rust’ verkeert, d.w.z. op dezelfde plaats blijft staan, is de ruimte volledig aanwezig en beweegt het voorwerp zich enkel nog in de tijd.

We zien hier hoe Einstein uitgaat van een ruimte-tijd systeem in rust. Ruimte en tijd zijn dan de coördinaten van onze vertrouwde ruimte en tijd. De ruimte die zich oneindig uitstrekt en de tijd die eindeloos door tikt. Het is alsof we weer terug zijn in de ons vertrouwde wereld van ruimte en tijd. Maar schijn bedriegt. Want Einstein laat voorwerpen bewegen in een wereld waar de lichtsnelheid een maximale snelheid aangeeft in het heelal. *En dit heelal is ons minder vertrouwd.* Het ruimte-tijd systeem waar Einstein van uitgaat, lijkt in eerste instantie een normaal systeem waarmee ook Newton werkt. Het lijkt op een systeem waarin ruimte en tijd onafhankelijk van elkaar werken. Als we de snelheid willen *meten* dan hoeven we slechts naar een afstand in de ruimte en een periode in de tijd te kijken. Meer hebben we, althans in de theorie van Newton, niet nodig. Maar Einstein merkt op dat metingen in een bewegende referentiesysteem gebruik maken van een andere ruimte en een andere tijd. Kijken we nogmaals naar het beroemde voorbeeld van Einstein: de trein, het perron en de bliksemflitsen die zogenaamd gelijktijdig plaatsvinden. Het voorbeeld laat helder zien *dat en hoe* de persoon in de trein *geen* gelijktijdigheid *meet*.

Als we Einstein echt willen begrijpen, dan moeten we ons oefenen in de vergelijking tussen twee systemen: het systeem in rust (het perron) en het systeem in beweging (de trein). De transformatieformules helpen ons daarbij. Ze transformeren de tijd van het systeem in rust naar de tijd van het systeem in beweging. En ze transformeren de ruimte van het systeem in rust naar de tijd van het systeem in beweging. Wie de transformatieformules toepast zal zien hoe

26 Het gaat om een transformatie vanuit het coördinatenstelsel in rust (x,t) naar een coördinatenstelsel in beweging (x',t') .

27 Namelijk via de functies $x' = f(x,t)$ en $t' = f(x,t)$

daarin *ruimte en tijd met elkaar verbonden* worden. In feite laten de formules zien dat er sprake is van een eenheid van ruimte en tijd. Wanneer de tijd vertraagt krimpt ook de ruimte, en omgekeerd. We zien hier dus al een overgang van ruimte en tijd naar een ruimte-tijd, een wisselwerking tussen ruimte en tijd.

3.e De ruimtetijd wereld van Minkowski

Voor Einstein kwam het echter toch als een complete verrassing toen Minkowski, een vroegere hoogleraar van hem, aantoonde dat de speciale relativiteitstheorie met zijn transformatieformules een compleet nieuwe wereld introduceerde, een wereld namelijk van *fysische gebeurtenissen die plaatsvinden in de ruimtetijd*. Einstein was in eerste instantie niet te spreken over deze nieuwe benadering van de speciale theorie. Hij vond dat Minkowski een wiskundige truc had gebruikt die weinig bijdroeg aan de fysische betekenis van zijn theorie. Hij zag niet in hoe ruimte en tijd, die toch heel verschillend waren (ruimte gemeten met een meetlat, tijd gemeten met een uurwerk), nu opeens als twee gelijkwaardige grootheden konden functioneren. Dat kon alleen een wiskundige bedenken die slechts met abstracties werkte. Bovendien zag hij niet in hoe we de beweging van een voorwerp konden beschrijven als ruimte en tijd enkel wiskundige grootheden waren zonder fysische betekenis.

Maar Einstein onderschatte één ding. Ruimte en tijd zijn niet alleen twee aparte grootheden, ze geven ons ook de mogelijkheid om gebeurtenissen in de fysische wereld *te noteren* via (getalsmatige) punten in de ruimte-tijd. En dát was wat Minkowski opmerkte. Hij voelde aan dat eigenlijk allerlei soorten fysische processen kunnen worden weergegeven in *een volgorde van gebeurtenissen*. Dat geldt bijvoorbeeld voor de beweging van een voorwerp: het verschijnt steeds ergens anders *in de ruimtetijd*, d.w.z. we zien het voorwerp bewegen via een serie plekken in een geometrische ‘ruimte’, waarbij elke plek ‘puur algebraïsch’ wordt weergegeven met *vier cijfers* (drie voor de ruimte en een voor de tijd). Zo kunnen we een stromende rivier laten bewegen *in de ruimtetijd*, we kunnen de planeten laten bewegen *in de ruimtetijd*, we kunnen de botsing van deeltjes in een deeltjesversneller of de ontploffing van een atoombom beschrijven als processen *in de ruimtetijd*, etc.²⁸

Wat Minkowski ontdekte was dat de ruimte en tijd van Einstein’s theorie behoorden tot *een bijzondere ruimte-tijd wereld*. Het was een wereld waarbij een

28 Ruimte en tijd worden door Minkowski behandeld als puur abstracte dimensies van een ‘geometrische ruimte’. Met het begrip geometrische ruimte wordt hier bedoeld een wiskundige ruimte, d.w.z. een ruimte die uit een willekeurig aantal dimensies kan bestaan. Geometrische ruimte moet dus niet verward worden met fysische ruimte! Op de geometrische ruimte kan de wiskundige een zuiver mathematische analyse loslaten. Interessant is dat daardoor bepaalde kenmerken van de ruimtetijd kunnen verschijnen die de fysicus enkel met een fysische analyse nooit zou ontdekken.

speciale geometrie hoorde. Het was niet zo dat de fysische wereld nu opeens veranderde in een geometrische wereld waarin vooral de wiskundige het voor het zeggen had. Dat was de argwaan van Einstein die zijn theorie zag verdwijnen in de handen van wiskundigen. Minkowski had het doen voorkomen alsof *de essentie* van de speciale relativiteitstheorie nu pas begrepen kon worden met behulp van het ‘beeld’ van een ruimtetijd wereld. Maar daarin ging hij te ver. Wat hij in feite had gedaan was een geometrische constructie bouwen en uitwerken voor twee coördinatenstelsels die voldeden aan de transformatieformules van Einstein’s speciale theorie. Met andere woorden, hij veranderde niets aan de fysische inhoud van de theorie, hij veranderde slechts iets aan de manier waarop twee systemen – het ene in rust en het andere in beweging – aan elkaar gekoppeld konden worden binnen een en dezelfde ruimtetijd wereld. En daarmee creëerde Minkowski *een zuiver geometrische wereld* die op haar manier heel elegant de effecten van Einstein’s theorie helder en duidelijk weergaf.

3.e.1 Een nieuw ruimtetijd systeem

In de speciale relativiteitstheorie van Einstein komen twee invalshoeken bij elkaar. Enerzijds de fysische invalshoek van bewegende voorwerpen en de snelheid van het licht, anderzijds de geometrische invalshoek van het coördinatenstelsel waarmee gebeurtenissen in de ruimtetijd kunnen worden weergegeven. Het blijkt dat deze geometrische invalshoek een nieuwe interpretatie toelaat van Einstein’s theorie. Om dat te begrijpen moeten we eerst iets zeggen over de aard van een coördinatenstelsel. Een coördinatenstelsel is een referentiesysteem dat gebruik maakt van twee loodrecht op elkaar staande assen, een ruimte-as (weergegeven als x-as, ingedeeld in bijv. meters) en een tijd-as (weergegeven als y-as, ingedeeld in bijv. minuten). De loodrechte stand van de assen garandeert dat ruimte en tijd als onafhankelijke grootheden fungeren. Het stelsel als geheel fungeert als een soort achtergrond waartegen we allerlei bewegingen kunnen ‘refereren’. We zien dan in één oogopslag waar een voorwerp zich bevindt op welk moment en we kunnen via een grafiek-lijn zijn beweging volgen.

Einstein beheerste de techniek (die in de 19de eeuw ontwikkeld was) om *twee coördinatenstelsels* met elkaar te vergelijken. Het was een techniek waarmee het relativiteitsbeginsel van Galilei kon worden toegepast. Het ene stelsel fungeerde als referentiesysteem voor de waarnemer in rust, het andere als referentiesysteem voor de waarnemer in beweging. In het geval van Einstein’s beroemde voorbeeld met perron en trein stond de waarnemer in rust precies in het midden van het perron (d.w.z. in de oorsprong van *zijn* ruimte-tijd referentiesysteem) en stond de waarnemer in beweging precies in het midden van de trein (d.w.z. in de oorsprong van *zijn* ruimte-tijd referentiesysteem).

Einstein had uiteraard de Galilei transformaties tot zijn beschikking waarmee normaal gesproken de waarnemer in rust kan uitrekenen waar de waarnemer in beweging zich bevindt op welk moment. De berekening laat zien hoe we van het ene coördinatenstelsel (in rust) kunnen overstappen naar het andere stelsel (in beweging). Ruimte en tijd behouden daarbij hun onafhankelijkheid! De Galilei transformaties voldoen uitstekend bij lage snelheden, maar zoals Einstein liet zien, zij voldoen niet meer bij (super)hoge snelheden, d.w.z. snelheden die de lichtsnelheid benaderen. Dan moeten we gebruik maken van de zg. Lorentz transformaties, die een wisselwerking laten zien tussen ruimte en tijd. Ruimte en tijd zijn niet langer meer onafhankelijk! Ze worden onder invloed van de transformatieformules a.h.w. gedwongen om te krimpen dan wel te vertragen.

Het is de onderlinge wisselwerking tussen ruimte en tijd die Minkowski op het spoor zette van een nieuw soort ruimtetijd systeem. Nog steeds gebruikte hij het coördinatenstelsel dat gebruik maakt van twee loodrecht op elkaar staande assen, een ruimte-as (weergegeven als x-as, ingedeeld in bijv. meters) en een tijd-as (weergegeven als y-as, ingedeeld in bijv. minuten). Maar nu garandeert de loodrechte stand van de assen niet meer dat ruimte en tijd fungeren als onafhankelijke grootheden. We hebben hier te maken met een ander soort van geometrische weergave: het coördinatenstelsel ‘in rust’ wordt nu doorsneden door een bijzondere lijn die mede een rol gaat spelen in de transformaties van ruimte en tijd. Het gaat hier om de beweging van het licht in de ruimtetijd van het in rust verkerende referentiesysteem. Volgens het licht-postulaat in Einstein’s theorie geldt dat de snelheid van het licht overal in het heelal gelijk is, *in welke situatie dan ook*. Oftewel, de beweging en daarmee de snelheid van het licht is voor de waarnemer in rust precies hetzelfde als voor de waarnemer in beweging. Dus ook voor het systeem in beweging geldt dezelfde beweging van het licht en daarmee ook dezelfde doorsnijding in zijn coördinatenstelsel! Zodra we de beweging van het licht als een grafiek-lijn uitzetten in de coördinatenstelsels, creëren we een derde unieke referentielijn (naast de twee assen van ruimte en tijd), waarmee we (op bijna wonderlijke wijze) in één oogopslag het referentiesysteem van de bewegende waarnemer kunnen vergelijken met dat van de waarnemer in rust.

Via Minkowski’s geometrische invalshoek – met zijn ruimtetijd systeem, bestaande uit drie referentielijnen voor ruimte, tijd en licht – kunnen we sneller en beter begrijpen wat er precies gebeurt met de ruimte en met de tijd. We zien namelijk nu twee coördinatenstelsels waarvan het ene nog loodrechte assen laat zien (het referentiesysteem in rust), maar waarvan het andere een draaiing van de assen laat zien (het referentiesysteem in beweging). Het zijn nu assen die scheef op elkaar staan en daarmee geven ze al aan dat er iets gebeurt met de ruimte en tijd in het bewegende systeem! Via het Minkowski diagram gaan we het volgende begrijpen. Het bewegende systeem krijgt *een andere schaalverdeling*

voor ruimte en tijd dan het systeem in rust. Anders gezegd, ruimte en tijd binnen het bewegende systeem hebben andere getalwaarden vergeleken met ruimte en tijd binnen het systeem in rust. Wanneer we ons identificeren met het referentiesysteem ‘in rust’, d.w.z. wanneer we vanuit de ons vertrouwde ruimte en tijd gaan kijken naar het referentiesysteem ‘in beweging’, dan ‘zien’ we als het ware hoe de getalwaarden van ruimte en tijd veranderen binnen het systeem in beweging.²⁹

Dat nu is precies de geometrische werking van het Minkowski diagram waardoor ruimte en tijd als eenheden van een coördinatenstelsel, dus als geometrische eenheden, veranderingen kunnen ondergaan. Veranderingen die zich afspelen rond die derde referentielij: de beweging van het licht. We zien hier eigenlijk een merkwaardige eenheid van ruimte, tijd én licht tot ontwikkeling komen. Een eenheid die afgedwongen wordt door de transformatieformules van Einstein.

3.e.2 De geometrie van Minkowski

Het bijzondere van Minkowski's geometrie is het feit dat zij ons kennis laat maken met een bijzondere wiskunde. Het Minkowski diagram heeft een bijzondere werking; het laat ons een oneindig aantal werelden zien waarin ruimte en tijd steeds weer net iets anders zijn. In geen enkele van deze werelden zijn ruimte en tijd hetzelfde. Eigenlijk is dat ongelooflijk, en misschien had Einstein gelijk toen hij in eerste instantie dacht dat het hier ging om een wiskundige truc. Maar het is geen wiskundige truc. Ruimte en tijd gedragen zich als een bijzonder systeem, een ruimtetijd systeem, een systeem waarvan, voordat Einstein en Minkowski het ontdekten, nog niemand had gehoord.

Niemand? In de 19de eeuw waren een paar wiskundigen geïnteresseerd geraakt in zogenaamde niet-Euclidische meetkundes. Het gaat dan om geometrieën die niet meer beschreven worden via de axioma's en definities van de Euclidische meetkunde. Het zijn geometrieën die op het eerste gezicht puur wiskundige gedachtenconstructies lijken te zijn. Waarom zou je de punten, lijnen, vlakken en ruimtes van de Euclidische meetkunde, waarmee eenieder vertrouwd is, vervangen door andere punten, lijnen, vlakken en ruimtes waar nog nooit iemand van gehoord heeft? En daar ook nog eens axioma's voor bedenken die op het eerste gezicht volkomen onlogisch lijken, zoals het axioma dat twee evenwijdige lijnen elkaar kunnen snijden?

De niet-Euclidische meetkunde staat ook wel bekend als de meetkunde van gekromde ruimtes. Daaronder vallen alle ruimtes die niet vlak zijn en daarom ook niet-Euclidisch. De Euclidische meetkunde staat immers bekend als de meetkunde van vlakke ruimtes. Het gaat dan om ruimtes waarin de assen van coördinatenstelsels loodrecht op elkaar staan, zoals in een plat vlak de assen van

²⁹ Zie bijlage 2.

lengte en breedte, en in een normale ruimte de assen van lengte, breedte en hoogte. Het standaardvoorbeeld van een Euclidische, vlakke ruimte is de kubus.

De geometrie van Minkowski is een niet-Euclidische geometrie. Dat is een merkwaardige vaststelling. En klopt zij wel? We zien toch dat Minkowski zich in zijn ruimtediagram blijft bezig houden met vlakke ruimtes. Weliswaar ontstaan er schuine assenstelsels voor de bewegende referentiesystemen, maar die kunnen heel netjes getekend worden in de vlakke ruimte van het referentiesysteem 'in rust'. Wat is er eigenlijk 'gekromd' aan het ruimtetijd systeem van Minkowski? Het antwoord is onthullend. In de ruimtetijd bestaat *een ruimtetijd 'afstand'*, die niet overeenkomt met de 'afstand' in een Euclidische ruimte. De ruimtetijd bevat een bepaald *soort* afstand die niet meer terug te voeren is op het soort afstand dat we kennen in een normale ruimte. En daarmee wijkt de Minkowski geometrie af van een 'normale', Euclidische geometrie.³⁰

Wat is dan die bijzondere *ruimtetijd 'afstand'* in Minkowski's ruimtetijd systeem? En wat maakt die 'afstand' zo bijzonder? In een normale ruimte, bijvoorbeeld een plat vlak, worden afstanden berekend door lengte en breedte samen te voegen (dus op te tellen) via de formule van Pythagoras ($a^2 + b^2 = c^2$). In de ruimte geometrie van Minkowski worden afstanden berekend, niet door optelling maar door aftrekking, namelijk volgens de formule $t^2 - r^2 = s^2$, waarbij t staat voor de *tijd* afstand (de tijdsperiode tussen twee gebeurtenissen), r voor de *ruimte* afstand (de ruimtelijke afstand tussen twee gebeurtenissen) en s voor de *ruimtetijd* afstand (de weg door de ruimtetijd tussen twee gebeurtenissen).

Het is goed om dit even tot ons te laten doordringen. Er bestaat dus een 'afstand' in de ruimtetijd, d.w.z. een afstand tussen gebeurtenissen (!), die niet meer voldoet aan de afstand in een Euclidische ruimte. Er bestaat dus een verschil tussen de wereld van de ruimtetijd (de wereld van gebeurtenissen) en de wereld van de Euclidische meetkunde (de wereld van lijnen en vlakken)! Als we ruimte en tijd gaan verenigen in één systeem, dus als we ruimte en tijd a.h.w. gaan mixen tot een nieuwe eenheid, een nieuw systeem van ruimtetijd, dan gebeuren er wonderlijke dingen. Niet alleen gedragen ruimte en tijd zich heel anders dan we gewend zijn, maar ook komen we terecht in een 'ruimte' die niet meer te herkennen is. We denken dat gebeurtenissen zich voltrekken in onze normale ruimte, maar Minkowski laat zien dat gebeurtenissen (van fysische processen) zich voltrekken in een wiskundige ruimte.

De geometrie van Minkowski is voor de fysica van enorm belang. Zonder deze geometrie kunnen we niet interpreteren wat er gebeurt in deeltjesversnellers. Sterker nog, zonder deze geometrie, hadden we nooit deeltjesversnellers kunnen

³⁰ Het blijkt, zoals we later nog zullen zien, dat de Minkowski geometrie een grensgeval is van een omvangrijkere, niet-Euclidische geometrie, de geometrie van de gekromde ruimtetijd. In de gekromde ruimtetijd komen allerlei soorten van gekromde ruimtetijd systemen voor, waarbij het Minkowski systeem een grensgeval vormt.

bouwen! Het is dus maar goed dat we beschikken over deze geometrie, ook al moeten we er ontzettend aan wennen. Het is een geometrie die ons de wereld laat zien via een lichtkegel.³¹ Ook hier speelt dus het licht een bijzondere rol. De referentielijn die de beweging van het licht weergeeft, komt overeen met een bijzondere ruimtetijd afstand. Op die lijn is de ruimtetijd afstand namelijk nul. Kijken we naar de formule: $s^2 = t^2 - r^2$, dan zien we dat deze nul wordt bereikt als $t^2 = r^2$. We zitten dan precies op de referentielijn van het licht! Maar we weten ook dat naarmate een bewegend systeem nadert tot de lichtsnelheid, zijn ruimte krimpt en zijn tijd vertraagt. Dat zien we aan de schaalverdeling op de schuine assen. Dus als het bewegende systeem de snelheid *zou kunnen* bereiken van het licht, dan zou zijn ruimte (afstand) gekrompen zijn tot nul en zijn tijd (afstand) vertraagd tot nul. We zouden dan in feite het systeem zien van het licht zelf, een systeem namelijk met een ruimtetijd ‘afstand’ nul!

3.f Ruimtetijd als interpretatiekader (deel 2)

We hebben eerder al geconstateerd dat er niks mis is met Newton’s visie op ruimte en tijd (zie par. 2.f). Sterker nog, deze visie heeft de fysica enorm geholpen om zich te ontwikkelen tot een volwaardige wetenschap. Uit deze wetenschap kon een indrukwekkende technologie ontstaan. Newton’s mechanica is alom geaccepteerd, en met succes, zoals bijvoorbeeld de resultaten van staalconstructies ons overal laten zien. Newton’s gravitatie-theorie wordt ook nog steeds op een betrouwbare manier toegepast, zoals de successen van de ruimtevaart bewijzen. Kortom, als deze theorieën van Newton goed blijken te werken in de praktijk, wat is er dan mis met zijn theorie van ruimte en tijd? Dat is een interessante vraag! Het antwoord is net zo interessant! Er is niets mis met deze theorie, omdat er iets anders aan de hand is.

A. Wetenschap, en met name fysica, lijkt een zaak van ‘harde feiten’.

Staalconstructies blijven overeind omdat ze exact uitgebalanceerd zijn in een evenwicht van krachten. Satellieten draaien om de aarde en planeten draaien om de zon, exact zoals de gravitatiewet van Newton aangeeft. En omdat dit alles plaatsvindt in ruimte en tijd, lijkt het aannemelijk om te veronderstellen dat ook ruimte en tijd horen tot ‘de harde feiten’.

B. Maar wetenschap kent ook een zachte kant, ‘conceptueel gezien’.

Niet dat de staalconstructies nu in elkaar zouden kunnen zakken of dat de satellieten en planeten uit de hemel zouden kunnen vallen. Die harde kant van de wetenschap blijft overeind. Het gaat hier om iets anders, om de fundamenten van de wetenschap zelf. Einstein voelde dat als geen ander aan. Hij dacht na over de status van natuurwetten, over de betekenis van het relativiteitsbeginsel, over de begrippen van ruimte en tijd. Hij was behalve wetenschapper ook filosoof.

31 Zie Bijlage 3.

3.f.1 Het interpretatiekader van Einstein

Voor Einstein was de wetenschap op een soort missie. Met wetenschap werd het mogelijk om de wereld te leren kennen *als één groots samenhangend geheel*. Hij was geobsedeerd door de idee van eenheid in de wereld. Waarschijnlijk werd hij hierin geïnspireerd door de filosofie van Kant. We kunnen de eenheid van de wereld nooit zien, het is een regulatief beginsel van de rede, geen ordenende categorie van het verstand. Maar haar functie is buitengewoon: zij laat ons mensen er naar streven om alle verschijnselen samen te voegen tot een eenheid, namelijk tot de idee van de wereld.

Einstein heeft in zijn jeugd Kant's 'Kritiek van de zuiver Rede' gelezen en daaruit kunnen opmaken hoe belangrijk het is om eerst onze concepten goed te definiëren zodat ze bruikbaar worden voor toepassing door ons verstand. En vooral als het gaat om basisconcepten als ruimte en tijd is het helemaal van groot belang deze goed te definiëren. Want het is vanuit basisconcepten dat we onze kennis kunnen gaan opbouwen en ontwikkelen. En dat zien we terug in het werk van Einstein; hij was eigenlijk voortdurend bezig om wetenschap en filosofie met elkaar te verbinden.

Net als andere wetenschappers in zijn tijd was Einstein aanvankelijk sterk onder de indruk van de kracht van Newton's theorie. Maar er was nog een andere theorie die hem evenzeer fascineerde, en dat was Maxwell's theorie van het elektromagnetisme. Deze theorie begon door te dringen in de wereld via allerlei praktische toepassingen, zoals de elektrische verlichting, de ontwikkeling van elektromotoren, de uitvinding van de radio, etc. Er kwam een elektrotechnische industrie tot ontwikkeling waar ook Einstein's vader deel van uitmaakte met een eigen bedrijf.

De fysica kende in Einstein's tijd een groot probleem: de theorie van Newton en de theorie van Maxwell lieten zich niet verenigen in één samenhangende theorie. Er werd een ether bedacht die Maxwell's theorie moest inpassen in het raamwerk van Newton's theorie, maar dat ging niet altijd even makkelijk. De snelheid van het licht trok zich namelijk niks aan van het bestaan van zo'n ether en dat vonden veel fysici verontrustend. Want niemand wilde de theorie van Newton aanvallen. Eigenlijk was de situatie zoals Newton die zelf had ervaren in zijn tijd. Destijds waren de meesten overtuigd van Descartes' theorie waarin contactkrachten centraal stonden. Hoewel de botsingswetten van Descartes al snel moesten worden gecorrigeerd, bleef men vasthouden aan de idee dat krachten alleen via contactwerking konden worden overgebracht. Toen Newton kwam met zijn idee van 'krachten op afstand', werd hij daar sterk op aangevallen. Pas toen zijn theorie veel succesvoller bleek te zijn, gingen de geleerden overstag en zagen ze zijn krachtbegrip a.h.w. door de vingers.

Iets soortgelijks overkwam ook Einstein. Zoals Newton zich keerde tegen Descartes, zo moest Einstein zich op zijn beurt keren tegen Newton. Er was

echter één verschil ten opzichte van Newton's situatie. Einstein kon gewoon doorwerken op de theorie van ruimte en tijd die ten grondslag lag aan Newton's theorie. Die theorie was niet persé fout; zij was eigenlijk nog onvoldoende uitgewerkt. Met name had Newton geen aandacht besteed aan de rol van het licht bij het doen van metingen. Hij ging er van uit dat gebeurtenissen in de wereld gelijktijdig konden plaatsvinden, hoe ver die gebeurtenissen ook van elkaar verwijderd waren. Op zich geen onaannemelijke gedachte, maar wel een met een bepaalde vóóronderstelling, nl dat zo'n gelijktijdigheid meetbaar was voor iedereen, of men nu in rust was of in beweging. Einstein testte deze aanname. Hij stelde zich voor hoe hij een klok kon lezen terwijl hij zelf voortbewoog met de snelheid van het licht. Hij realiseerde zich dat het beeld van de klok met dezelfde snelheid zou reizen als hijzelf. Hij keek dus naar een bevroren beeld. De klok liep niet meer, hij stond stil! Wat was er met de 'tijd' gebeurd?

Zoals gezegd borduurde Einstein voort op de theorie van Newton. Hij hoefde die theorie slechts aan te passen door iets scherper te kijken naar de wijze waarop we ruimte en tijd meten. Maar het effect van zijn aanpassing was verbluffend: ruimte en tijd worden vloeibaar, d.w.z. het zijn geen harde concepten meer zoals bij Newton, maar het worden zachte concepten waarmee en waardoor het begrip van ruimte en tijd verbreed en verdiept wordt. Een dergelijk effect is vooral een gevolg van filosofie. Anders dan wetenschap kan filosofie tot de kern van een concept *als* concept doordringen. Dat is juist de taak van filosofie: ons denken (in concepten) uiteenrafelen en weer samenbrengen in steeds nieuwe vormen. Filosofie zet ons denken aan het denken, en zo moet het ook bij Einstein zijn gegaan, met name in zijn gedachtenexperimenten.

Einstein ondervond tijdens zijn speurtochten, hoe er een enorme worsteling in zijn denken plaatsvond. Hij moest afscheid nemen van de vertrouwde begrippen van ruimte en tijd, maar dat lukte hem jarenlang niet. Het lukte pas op het moment dat hij de klok letterlijk stil zag staan. Dat wil zeggen, de klok zoals hij die voor zijn geestes oog zag. Het was in zijn denken dat er een licht op ging. Een licht dat zijn eigen denken radicaal veranderde. Een licht zoals alleen filosofen kunnen laten schijnen over hun eigen denken. Het moet het eigen denken kunnen veranderen en transformeren, anders heeft de filosoof er geen voordeel van. Zo pakte Einstein zijn filosofisch voordeel uit het beeld van de stilstaande klok. En toen kon hij aan de slag. Zijn denken was veranderd; hij kon nu *een ander soort denken over ruimte en tijd* tot ontwikkeling brengen.

Natuurlijk is wat de vorige alinea beschrijft niet letterlijk gebeurd bij Einstein. We weten gewoon niet hoe hij tot zijn nieuwe inzichten is gekomen. Maar het lijkt aannemelijk dat zijn filosofische 'gevoeligheid' hem uiteindelijk geholpen heeft om afscheid te nemen van de vertrouwde begrippen van ruimte en tijd. En daarmee kon hij essenties uit de theorie van Newton gaan corrigeren. Ruimte en tijd bleven op een Newtoniaanse wijze meetbaar, maar ze functioneerden niet

meer als een vast decor dat ons omringt. Op een onverwachte, maar heldere wijze ontstonden nu werelden van ruimte en tijd die de meetinstrumenten als het ware vloeibaar maakten. De meetlat kon krimpen en de klok kon trager gaan lopen. Het had ook te maken met de rol van het licht in een lichtklok. We kunnen de tijd laten aangeven door een lichtklok.³² Wanneer de lichtklok gaat bewegen door de ruimte zien we hoe het licht in de klok extra tijd nodig heeft. De lichtklok gaat langzamer lopen.

Onze waarneming is dus gebonden aan werkingen van ruimte en tijd, werkingen die ook de loop van het licht in een lichtklok beïnvloeden. Het zijn werkingen die optreden zodra systemen gaan bewegen. Einstein beredeneerde de effecten hiervan *via* zijn voorbeeld van perron, trein en bliksemflitsen. Daarmee vond hij de formules van de Lorentz transformatie. En het waren deze formules die de relatieve werking van ruimte en tijd tot uitdrukking brachten. Deze formules bepaalden in feite hoe ruimte en tijd zich gedroegen in bewegende systemen. De transformatieformules werden *een transformatiewet voor ruimte en tijd*.

De transformatiewet vormde nu het interpretatiekader waarmee Einstein naar de fysische wereld keek. Zelf formuleerde hij het als volgt:

“De ervaring heeft tot de overtuiging geleid dat enerzijds het relativiteitsprincipe geldt en dat anderzijds de voortplantingssnelheid van licht in vacuüm gelijk gesteld moet worden aan een constante *c*. *Door deze beide postulaten te verenigen ontstond de transformatiewet...* Dit is een bepaalde mathematische voorwaarde die de relativiteitstheorie oplegt aan een natuurwet; daardoor wordt de theorie een waardevol heuristisch hulpmiddel bij het zoeken naar algemene natuurwetten.”³³

Oftewel, wanneer we naar de fysische wereld kijken via een abstracte formule (de Lorentz formule), dan kunnen we fysische verschijnselen beter gaan interpreteren (zoals het effect van beweging op ruimte en tijd), maar ook nieuwe fysische verbanden gaan onderscheiden (waarvan de beroemdste: $E = mc^2$).

3.f.2 Het interpretatiekader van Minkowski

De speciale relativiteitstheorie van Einstein is geen simpele theorie. Ruimte, tijd en licht komen hier op een bijzondere manier bij elkaar. Wat Einstein zich niet direct realiseerde toen hij de theorie publiceerde was het inzicht dat hij in feite een nieuwe wereld had geschapen, de wereld van de ruimtetijd.

Einstein dacht dat hij een correctie had aangebracht in de manier waarop Newton naar ruimte en tijd keek. Maar hij realiseerde zich niet dat Newton in feite al naar de wereld keek via een ruimte-tijd kader. Het ging Newton niet zozeer om een

32 In een lichtklok tikt een lichtstraal heen en weer tussen twee spiegels. Het tikken geeft dan het tempo weer van de tijd. Als wij zo'n lichtklok zien bewegen door de ruimte, dan zien we dat de lichtstraal een grotere afstand moet afleggen tussen de spiegels. De duur tussen twee tikken wordt langer; het tempo van de tijd vertraagt.

33 Albert Einstein, *Relativiteit*, Aula Paperback 130, tweede druk 1988, pag. 33.

afzonderlijke ruimte en een afzonderlijke tijd. Hij was bezig de bewegingen in de wereld te bestuderen via snelheden en veranderingen in snelheden. En voor het meten van de snelheid heb je ruimte én tijd nodig. Aldus kon Newton een duidelijk onderscheid maken tussen uniforme bewegingen, bewegingen met een uniforme snelheid, en versnelde bewegingen, bewegingen als gevolg van een kracht. Dit onderscheid vormde de basis van zijn theorie. We zien dit terug in de formulering van de eerste twee bewegingswetten.

Het was Minkowski die Einstein er op wees dat de speciale relativiteitstheorie een theorie is over een nieuwe ruimtetijd. Zij biedt ons een nieuw kader waarmee we naar de wereld kunnen kijken. Om die nieuwe eenheid van ruimte en tijd te kunnen zien heb je wel wat meer nodig dan de simpele wiskunde waar Einstein mee werkte. Minkowski was vertrouwd met de niet-Euclidische meetkunde en deze verschaftte hem de mogelijkheid om de ruimte en tijd die Einstein had ontdekt, onder te brengen in een speciale ruimtetijd geometrie met een eigen metriek, namelijk de ruimtetijd ‘afstand’. Minkowski werd dus niet geïnspireerd door filosofie, maar door de mogelijkheden die de moderne wiskunde van zijn tijd hem bood. Het was dan ook niet voor niets dat Einstein hem wantrouwde, omdat hij zelf juist via zijn gedachtenexperimenten gebruik had gemaakt van een filosofische reflectie op ruimte en tijd. Bovendien was Einstein toen van mening dat wiskunde slechts een ondergeschikte rol moest spelen in de theorieën van de fysica.

Hoewel Minkowski zijn ideeën via de wiskunde ontwikkeld had, presenteerde hij ze met een filosofische lading. En terecht, want deze nieuwe ruimtetijd wereld was niets meer of minder dan *een ware revolutie in ons denken over ruimte en tijd*. Zo wees hij er op dat de geometrie van de ruimte die tot dan toe het denken van fysici had gedomineerd (een geometrie die de ruimte beschrijft als een Euclidische ruimte van drie dimensies), niet langer moest worden beschouwd als een fundamentele weergave van fysische eenheden. Deze eenheden moesten nu worden weergegeven als de invarianten van een vierdimensionale structuur.

“(Wij) moeten toegeven *dat het de vier dimensies zijn* die maken dat de relaties die we hier bezien, voor het eerst *hun innerlijke essentie in volledige eenvoud* aan ons openbaren.”³⁴

Minkowski verving het relativiteitspostulaat van Einstein door het postulaat van *de absolute wereld*, te weten *de nieuwe ruimtetijd wereld* die hij met zijn geometrie had geïntroduceerd (zie par 3.e.2). Dit postulaat behelst in feite twee dingen:

1) de fysische wereld is een wereld die gehoorzaamt aan de ruimtetijd structuur van het Minkowski diagram (besproken in par. 3.e.1), en

³⁴ Naar een citaat uit DiSalle, pag. 115.

2) de ruimtetijd structuur van het Minkowski diagram laat een diepere structuur van ruimte en tijd zien dan de transformatie wet van Einstein (zie par 3.f.1) tot expressie brengt.

Minkowski claimde dus een geometrie (= ruimtetijd structuur) te hebben gevonden die op een sterkere wijze de essentie van de wereld ‘openbaart’ dan de speciale theorie van Einstein dat doet. Eigenlijk zei Minkowski dat Einstein nog geen adequate geometrie had gevonden. Het mag dan ook niet verbazen dat Einstein in eerste instantie niet te spreken was over de geometrie van Minkowski. Alsof deze geometrie het laatste woord zou hebben.

Dat nu is, ook filosofisch gezien, een interessante kwestie. We kunnen de kwestie ook anders formuleren door te vragen: hoe serieus is het ‘absolute wereld postulaat’ van Minkowski, d.w.z. hoe serieus is zijn nieuwe ruimtetijd structuur? Oftewel, hoe serieus is deze nieuwe geometrie van ruimte en tijd?

We hebben al eerder besproken dat ruimte en tijd *geen* factoren zijn waarmee fysische verschijnselen worden verklaard (zie par 2.f). De verklaring van fysische verschijnselen geschiedt op basis van natuurwetten. Ruimte en tijd dienen niet als verklaringskader, maar eerst en vooral als beschrijvingskader. Ruimte en tijd zijn bijvoorbeeld nodig om de beweging van een object te kunnen beschrijven, qua vorm (rechtlijnig of via een gebogen lijn) en qua snelheid (ruimte gedeeld door tijd). Datzelfde geldt ook voor de beweging van een object door de ruimtetijd: ruimte en tijd in het Minkowski diagram laten zien hoe een object beweegt van gebeurtenis naar gebeurtenis en met welke snelheid dat gebeurt.

Het punt is echter dat een beweging door de ruimtetijd van Minkowski een ander soort beweging is dan een beweging door de ruimte-tijd van Newton. Bij Newton beweegt een object van ruimtepunt naar ruimtepunt (bijvoorbeeld van Amsterdam naar Rotterdam) en dat in een bepaalde tijd. Maar bij Minkowski beweegt een object van gebeurtenis naar gebeurtenis, d.w.z. van ruimtetijdpunt naar ruimtetijdpunt.³⁵ In de beweging van het object ligt de tijd al opgesloten! En dat betekent dat we ook *een ander soort ‘afstand’* krijgen. In de ruimte-tijd van Newton is enkel sprake van een afstand in de ruimte, in de ruimtetijd van Minkowski gaat het om een ruimtetijd afstand, een afstand tussen twee gebeurtenissen. En dat is een afstand die radicaal verschilt van een afstand in de ruimte-tijd van Newton. We hebben hier dan ook uitvoerig aandacht aan besteed in par. 3.e.2.

35 Wanneer we iemands reis volgen door de ruimtetijd van Minkowski, kijken we voortdurend waar-wanneer iemand verschijnt in de ruimtetijd. Als hij vertrekt uit Amsterdam zien we dat als de eerste gebeurtenis A (ruimte₁ , tijd₁) en als hij aankomt in Rotterdam als de tweede gebeurtenis B (ruimte₂, tijd₂). En vervolgens bepalen we dan de ruimtetijd afstand s via: $s^2 = t^2 - r^2$ (zie par. 3.e.2), oftewel $\Delta s^2 = \Delta t^2 - \Delta r^2$. Dus: $\Delta s^2 = (\text{ruimtetijd afstand tussen A en B})^2 = (\text{tijd}_2 - \text{tijd}_1)^2 - (\text{ruimte}_2 - \text{ruimte}_1)^2$

We zien dus dat in de ruimtetijd van Minkowski het verschijnsel ‘beweging’ op een andere manier wordt beschreven dan in de ruimte-tijd van Newton. Via de Minkowski ruimtetijd gaan we op een andere manier *kijken* naar de fysische wereld met zijn bewegingen. Oftewel, de Minkowski ruimtetijd biedt ons een nieuw interpretatiekader, d,w,z, een nieuw kader om fysische verschijnselen te interpreteren. We gaan nu een ander *soort* beschrijving geven van het verschijnsel ‘beweging’ op basis van een andere ruimte-tijd ‘bril’. Ruimte en tijd krijgen nu een nieuwe betekenis. Ze worden niet meer los van elkaar gezet (zoals nog bij Newton), maar juist in een bijzondere verwevenheid bij elkaar gebracht. En dat heeft interessante gevolgen.

1) We gaan nu dingen ‘zien’ die we anders nooit te zien krijgen. Een beweging door de ruimtetijd is een beweging van gebeurtenis naar gebeurtenis en deze beweging is alleen te begrijpen als we bereid en in staat zijn om te werken met de Minkowski geometrie, meer specifiek het Minkowski diagram. We zullen als het ware onze oriëntatie op de fysische wereld moeten herzien. Niet dat onze vertrouwde ruimte en tijd zouden moeten veranderen. Waar het om gaat is dat we een interpretatiekader krijgen aangeboden waarmee we *nieuwe verschijnselen* kunnen zien, zoals een beweging door de ruimtetijd!

2) Nogmaals, de ruimtetijd van Minkowski laat ons dingen zien die we anders nooit te zien krijgen. Een spectaculair gevolg van de speciale theorie van Einstein is de mogelijkheid om te reizen door de tijd en al reizende jong te blijven. In een Minkowski diagram zien we hoe dit effect tot stand komt.³⁶ We reizen langs *wereldlijnen die ons jong houden*, doordat de tijd vertraagd wordt. Bij onze familie op aarde gaat de tijd sneller. We zien dit op een speciale manier terug in de ruimtetijd afstand. De ‘afstand’ van onze bewegende raket door de ruimtetijd is korter dan de ‘afstand’ van onze familie op aarde door de ruimtetijd.

3) Wereldlijnen in het Minkowski diagram zijn van cruciaal belang voor een goed begrip van de ruimtetijd. Ze geven een bepaald type bewegingen weer. Niet alleen gaat het om specifieke bewegingen door de ruimtetijd, maar het zijn ook bewegingen die vrij zijn van krachten. Het zijn de kortste bewegingen tussen twee gebeurtenissen en worden daarom ook, meetkundig gezien, *geodeten* genoemd. We geven dan deze bewegingen weer als de kortste verbinding tussen punten in een geometrische ruimte. Vanuit de ruimtetijd gezien kunnen we deze geodeten interpreteren als rechte lijnen die *sporen door de tijd* trekken. Geodeten worden dan een meetkundige uitdrukking voor bewegingen die zich manifesteren langs deze sporen. Het zijn tevens sporen in de ruimtetijd waarlangs alle uniforme bewegingen zich moeten (!) voltrekken.

³⁶ Zie Bijlage 4.

4) Stel, we bevinden ons op de aarde en we kijken naar een raket die langs een aantal planeten beweegt. We houden contact met de bemanning van de raket en nu zien we iets bijzonders gebeuren in onze ruimtetijd. We zien de raket bewegen langs geodeten door de ruimtetijd. We beginnen te begrijpen wat er gebeurt in de raket. Iemand die in de raket zit, ziet enkel zijn klok bewegen. Hij beweegt enkel in de tijd en reist dus langs een geodeet. Via de ruimtetijd afstand, berekend *vanuit* onze ruimtetijd, zien wij dat zijn geodeet een bijzonder spoor trekt door de tijd, nl *een langere weg (in het diagram) met een (voor hem) kortere afstand (in tijd)*. De bemanning kan niet anders dan dit spoor door de tijd volgen, want de geodeet bepaalt de beweging van de raket door de ruimtetijd. Zo kun je dus ook jong blijven!

5) Wat is de betekenis van de ruimtetijd in filosofische zin? Zoals hiervoor uitdrukkelijk is opgemerkt, opent de ruimtetijd een nieuwe wereld, *een nieuwe werkelijkheid met nieuwe verschijnselen*. Maar wat betekent dat voor de wereld en voor onze ervaring van de werkelijkheid?

DiSalle stelt in zijn boek ‘Understanding space-time’ dat ruimte en tijd een heel aparte status hebben als het gaat om het begrip van fysische verschijnselen. Ruimte en tijd fungeren in de fysica als een interpretatiekader, d.w.z. als een kader dat we nodig hebben om fysische verschijnselen te kunnen interpreteren. Het is goed om hier even bij stil te staan. Ruimte en tijd maken het mogelijk om een *beschrijving* te geven van de structuur en dynamiek van fysische systemen, zoals de samenstelling en bewegingen van het planetenstelsel. Zonder ruimte en tijd kunnen we eigenlijk niets beginnen! Hoe zouden we dan de beweging van een object moeten beschrijven?

6) Dat zegt dus al iets over de status van ruimte en tijd. Het zijn factoren die de werkelijkheid als het ware een skelet geven waarmee wetenschappers vervolgens kunnen bouwen aan theorieën. Newton voelde als eerste aan hoe krachtig dit skelet – met name als een ruimte-tijd kader – kon werken in samenhang met de natuurwetten die hij onderzocht en toepaste. Einstein kwam vervolgens tot de ontdekking dat ruimte en tijd weliswaar nodig waren als meetinstrumenten, maar dat zij in die functie plooibaar waren. Gedwongen door de snelheid van het licht werden onze waarnemingen van ruimte en tijd relatieve waarnemingen. Het skelet werd nu als het ware gevoelig voor vervormingen.

7) Het was Minkowski die liet zien hoe de elasticiteit van het skelet van ruimte en tijd te begrijpen was als een nieuw soort geometrie. Waar voorheen de meetkunde als vanzelfsprekend invulling gaf aan de structuur van de ruimte (punten, vlakken en driedimensionale figuren zoals de kubus), daar bleek nu een nieuw soort meetkunde beschikbaar te zijn die invulling kon geven aan een superstructuur, de structuur van de ruimtetijd. Aldus kreeg de wetenschap een nieuw soort skelet van ruimte en tijd aangemeten. Het waren nu (waar-wanneer)

gebeurtenissen in de wereld die onze visie inkleurden. Wat leerde deze nieuwe geometrie, gekoppeld aan onze manier van waarnemen, namelijk via een constante lichtsnelheid?

8) Als je reist door de kosmos met een snelheid van 99,99% van de lichtsnelheid, wat ervaar je dan? Je zou misschien denken dat dingen dan krimpen en klokken trager gaan lopen. Maar niets is minder waar, want vanuit jouw positie zie je juist dat dingen elders krimpen en klokken elders trager lopen. Is dan wat je ziet, een illusie? In zekere zin wel, maar je kunt ook beseffen dat *vanuit jouw perspectief* dit ‘echt’ gebeurt. Vervormingen in ruimte en tijd zijn niet te begrijpen als objectieve eigenschappen van objecten in beweging. De relativiteitstheorie van Einstein, geholpen door de ruimtetijd geometrie van Minkowski, laat ons zien dat vervormingen in ruimte en tijd *perspectivische eigenschappen* zijn. Het gaat hier niet om een optisch effect, maar om een frame afhankelijk effect, dat zijn ‘echtheid’ of werkelijkheid ontleent aan de nieuwe wereld van de ruimtetijd. Het is een wereld die ons laat ervaren hoe onze waarneming verbonden is met effecten van ruimte en tijd.

9) Begrijpen we nu ook wat ruimte en tijd ‘voorstellen’? DiSalle laat ruimte en tijd functioneren als begrippen die een interpretatiekader opleveren. Het zijn dus geen begrippen die verwijzen naar de ruimte of de tijd om ons heen. Het zijn vooral filosofisch-wetenschappelijke begrippen die een fysicus helpen om de natuur begrijpelijk te krijgen. Maar dan speelt ook de wiskunde een belangrijke rol. Met name in de niet-Euclidische geometrie openen zich mogelijkheden, die het denken in termen van ruimte en tijd verruimen. Ruimte en tijd laten zich meenemen in gedachteconstructies.

In het geval van de speciale theorie gaat het om een bijzondere wisselwerking tussen enerzijds de wiskundige Lorentz transformatie en anderzijds een ruimte en een tijd die zich laten ‘plooien’ (krimpen, vertragen). *Dat is opmerkelijk!* Blijkbaar gaat het om begrippen die meer te betekenen hebben dan enkel de wereld om ons heen te beschrijven via meetlat of klok. De overgang van Newton’s ruimte-tijd naar de ruimtetijd van Einstein en Minkowski heeft de fysica maar ook de wiskunde in een stroomversnelling gebracht. Laten we eens kijken hoe dit zich heeft uitbetaald bij Einstein’s analyse van de ruimtetijd in een gravitatieveld.

4. Uitgangspunten en betekenis van de algemene relativiteitstheorie

De algemene relativiteitstheorie van Einstein wordt door DiSalle in één hoofdstuk samen met de speciale theorie behandeld. Het gaat hem om een betoog dat laat zien hoe de begrippen van ruimte en tijd zowel een wetenschappelijke alsook een filosofische betekenis hebben. Althans, dat is de interessante stelling die hij inneemt in zijn boek. Het is een stelling die laat zien hoe door een wisselwerking tussen wetenschap en filosofie vooruitgang kan worden geboekt in de fysica. We zien dan een verrassende maar ook verhelderende lijn die loopt van Newton's theorie naar de theorie van Einstein. In de algemene relativiteitstheorie onderzoekt Einstein met name het gravitatie begrip dat in het wereldsysteem van Newton een dominante rol speelt. Om te begrijpen wat Einstein doet met dit begrip is het goed om eerst te begrijpen wat Newton er mee deed.

4.a Versnelde bewegingen in de ruimte-tijd

Wat zijn voor Newton *versnelde bewegingen*? Het zijn bewegingen waarin de snelheid van een voorwerp gaat toenemen (versnellen) of afnemen (vertragen) onder invloed van een inwerkende kracht: een versnellende of vertragende kracht. Gooien we bijvoorbeeld een bal recht omhoog de lucht in, dan zien we een rechte lijnige beweging waarbij de snelheid van de bal eerst afneemt (vertraagt), vervolgens nul wordt en daarna toeneemt (versnelt) onder invloed van de zwaartekracht. Deze rechte lijnige beweging doet denken aan een uniforme beweging die ook rechte lijnig is, maar waarbij de snelheid constant blijft. Voor Newton was *de uniforme beweging* (zoals we gezien hebben in par. 2.f.1) een ideale, spontane, krachtenvrije beweging, een beweging die voorwerpen als vrije vogels door de ruimte laat zweven, ongehinderd door welke inwerking maar ook. Het gaat om een soort absolute beweging, een beweging door een ruimte en een tijd die als een universele, kosmische omgeving functioneren. Via de uniforme beweging suggereerde Newton dat er een ruimte-tijd bestond (of zou kunnen bestaan) die als een universeel referentiesysteem voor alle soorten bewegingen zou kunnen gelden. Daarmee heeft hij onnodige verwarring gewekt. Termen als absolute ruimte, absolute tijd en absolute beweging kregen een metafysische bijklank die hij zelf er niet had ingelegd.

Wat was er aan de hand? Newton zocht naar een geschikte onderzoeksomgeving voor zijn berekeningen. Hij ontwikkelde en beschouwde de ruimte-tijd als een ideaal laboratorium voor zijn reken-experimenten. In onze tijd zouden wij zeggen dat hij op zoek was naar een simulatie-model, waarmee hij allerlei berekeningen kon uitproberen en uitwerken. Met name was hij geïnteresseerd in de bewegingen van planeten, manen en kometen. De grote vraag in zijn tijd was hoe de bewegingen van deze hemel-objecten konden worden begrepen als men er vanuit

ging dat er een kracht bestond die in de richting van de zon werkte, en waarvan de sterkte omgekeerd evenredig was met de afstand tot de zon.

Newton ontwierp voor deze grote vraag een ruimte-tijd systeem op basis van het begrip ‘uniforme beweging’. Het ging hem om een beweging over exact gelijke afstanden in exact gelijke tijden. Daartoe dienden zijn begrippen van absolute ruimte en absolute tijd. Met deze begrippen kon hij de uniforme beweging laten plaatsvinden in een ruimte-tijd systeem (tegenwoordig zouden we zeggen: een referentie- of assenstelsel) dat de mogelijkheid schiep om die beweging in een perfect rechte lijn weer te geven. Het was een lijn die liet zien dat en hoe de snelheid van het object voortdurend constant kon blijven. Daarmee had Newton een ruimte-tijd systeem in handen waarmee hij andere lijnen van beweging kon bestuderen, zoals de ellipsvormige bewegingen van de hemellichamen. Die lijnen moesten dan logischerwijs snelheden laten zien die niet-uniform maar versnellend waren.

Er was echter een rechthoekige beweging die niet in dat systeem paste, en dat was de valbeweging van voorwerpen die naar de aarde vielen. Galilei had de valwet ontdekt die luidt dat alle objecten (hoe licht of zwaar ze ook zijn) met dezelfde versnelling naar beneden vallen. Hoe kon nu de valbeweging die een versnelling weergaf, ook rechthoekig zijn? De rechte lijn was immers weggelegd voor de uniforme beweging? Maar Newton zag hoe hij deze rechthoekige beweging als een bijzondere rechte lijn kon meenemen in zijn ‘experimenten’. Het was namelijk de lijn waarlangs de zwaartekracht werkte! Door deze rechte lijn (via ontleding van vectoren) te onderscheiden van de rechte lijn die hoort bij de uniforme beweging, kreeg hij opeens *een wereld van bewegingen* te zien die sterk overeenkwam met de bewegingen van de planeten, manen en kometen. Hij kon nu precies laten zien hoe deze bewegingen tot stand kwamen als een combinatie van uniforme en versnelde beweging. En daarmee presenteerde hij een indrukwekkend antwoord op de grote vraag van zijn tijd.³⁷

Dat Newton ruimte en tijd gebruikte als een ‘simulatie-model’ voor zijn berekeningen, blijkt uit een aantal teksten in zijn Principia. Robert DiSalle geeft in zijn boek ‘Understanding space-time’ een aantal voorbeelden.³⁸ Het voorbeeld van het manenstelsel rond Jupiter is verhelderend. Om dit stelsel te kunnen analyseren, betoogde Newton dat het stelsel in zijn geheel met een bepaalde versnelling naar de zon toe bewoog. Dat betekende dat er in dat stelsel gelijke versnellingskrachten waren ten opzichte van de zon en dat die niet van invloed waren op de versnellingen die de manen ondergingen ten opzichte van Jupiter. De planeet Jupiter kon dus worden beschouwd als het centrum van een stelsel manen dat enkel beïnvloed werd door lokale gravitatie krachten, zijnde de krachten die de planeet uitoefende op zijn manen.

³⁷ Zie Bijlage 6.

³⁸ Zie DiSalle, met name pagina 47-52 en 125-128.

Door nu tevens te veronderstellen dat het centrale zwaartepunt van alle massa's in dit manenstelsel precies in het centrum van Jupiter lag, kon Newton aan de slag om de versnellingen van de diverse manen te bepalen. Het enige dat hij hoefde te doen was zijn laboratorium van ruimte en tijd precies in dit ruimtelijk zwaartepunt te plaatsen. Het was namelijk het punt waarin de gravitatiekracht van Jupiter precies balanceerde met de gravitatiekracht van alle manen om hem heen. Krachten die elkaar in dat punt (vanwege actie en reactie) in evenwicht hielden. Het zwaartepunt was aldus 'een krachtenvrij punt' en daarmee een ideaal punt in de ruimte om er een ruimte-tijd systeem te vestigen van waaruit uniforme bewegingen konden worden onderscheiden van versnelde bewegingen. Maar hoe praktisch deze methode ook was om de bewegingen van de manen te 'simuleren', de vraag bleef knagen of Newton hier wel op een juiste manier naar de wereld van versnelde bewegingen keek.

4.b Gravitatie en versnelling

Newton ging uit van een gravitatie kracht. Het was een kracht die rechtstreeks door de ruimte op massa's inwerkte. Grote massa's, zoals de aarde en de maan of de zon en haar planeten, trokken elkaar aan met een wederzijdse kracht die sterk afnam naarmate de massa's verder van elkaar afstonden. Newton kon op basis van een universele gravitatie wet en gesteund door zijn drie bewegingswetten exact uitrekenen dat de banen die bijv. planeten volgden rondom de zon, een ellipsvorm hadden met de zon in een van de brandpunten. Met deze berekeningen konden fysici van moment tot moment volgen waar een planeet zich bevond in de ruimte. De theorie was zelfs zo nauwkeurig dat daarmee in de 19de eeuw een nieuwe planeet werd ontdekt die anders waarschijnlijk lange tijd aan het oog van de astronoom ontsnapt zou zijn. Dat was de planeet Neptunus.

Newton's theorie kende een speciale positie toe aan versnelde bewegingen. Versnelling was de manifestatie van een versnellende kracht, tot uitdrukking komend in zijn tweede bewegingswet ($F=ma$). Die kracht hoefde niet persé een contactkracht te zijn; Newton doorbrak het streng mechanistisch denken van zijn tijd. Het ging hem om de invloed van een gravitatiekracht die rechtstreeks op massa's kon inwerken. Daartoe diende de versnelling van vallende voorwerpen ($F=mg$). In zijn wereldsysteem stonden massa's en krachten centraal; de versnelde bewegingen moesten dit kenmerk van zijn wereldsysteem accentueren en dankten daaraan hun speciale positie. Deze bewegingen moesten dan ook duidelijk worden onderscheiden van de uniforme bewegingen uit de eerste bewegingswet, zodat ze er op logische wijze mee konden 'samenwerken'.

Dat betekende dat de versnelde beweging ook voor de meeste fysici in de tijd van Einstein een bijzondere positie had. Je kon immers duidelijk voelen wanneer je in je beweging werd versneld of afgeremd. Er moest iets zijn in de natuur waardoor je die specifieke versnellings- of afremmingskracht kon ervaren. Bijvoorbeeld,

zoals Mach voorstelde, was het de invloed van alle massa's in het heelal die de versnelde beweging voelbaar maakte. En Einstein ging daar aanvankelijk in mee. Maar er voltrok zich in hem een bijzonder soort mentale helderheid toen hij dieper en dieper ging nadenken over de aard van een versnelde beweging in het gravitatieveld.

Allereerst realiseerde Einstein zich dat een gravitatieveld wel eens een veld zou kunnen zijn vergelijkbaar met een elektrisch of magnetisch veld. We zien ook hier de invloed van Maxwell op zijn denken. Zoals een elektrische lading een elektrisch veld opwekte zo zou ook een (grote) massa (bijvoorbeeld de aarde of de zon) *een gravitatieveld opwekken*. Analoog redenerend opperde Einstein dat de gravitatie werking zich voortplantte in een gravitatieveld, zoals de elektrische kracht zich voortplantte in een elektrisch veld. Het was dus niet zo, zoals Newton beweerde, dat de gravitatie werking zich overal *direct* manifesteerde in de ruimte-tijd; de gravitatie werking moest zich zelf eerst voortplanten door een veld, dat waarschijnlijk een ander soort ruimtetijd zou bevatten.

Een citaat uit Einstein's boek over relativiteit ³⁹ :

“De invloed van de aarde op een vallende steen komt *indirect* tot stand. De aarde wekt in haar omgeving een gravitatieveld op. Dit beïnvloedt de steen en veroorzaakt zijn valbeweging. De ervaring leert ons dat de sterkte van de gravitatie werking op een voorwerp afneemt als men zich verder van de aarde verwijderd, volgens een heel bepaalde wet. Dat betekent in onze opvatting: De wet die de ruimtelijke eigenschappen van het gravitatieveld bepaalt, moet een heel bepaalde wet zijn om de afname van de gravitatie werking met de afstand tot de aantrekkende massa correct voor te stellen. Het is ongeveer als volgt: de massa (bijv. de aarde) wekt direct het veld op in zijn onmiddellijke omgeving; de sterkte en richting van het veld op grotere afstand volgen hieruit dan met behulp van de wet die de *ruimtelijke eigenschappen* van de gravitatievelden zelf bepaalt.”

Het gravitatieveld is dus een veld dat zich voortdurend ontwikkelt in de ruimte onder invloed van een (grote) massa. Althans, zo kunnen we dit wel in eerste instantie formuleren. En dat veld heeft bepaalde ruimtelijke eigenschappen.

Maar Einstein realiseerde zich nog iets anders, iets dat nog nooit iemand voor hem had bedacht. En dat idee zou onze visie op gravitatie radicaal veranderen. Kort gezegd kwam het er op neer dat de versnellende beweging van een vallende steen niet meer kon worden beschouwd als een beweging met een aparte status. De versnellende beweging was tot dan toe als een aparte groep beschouwd die streng moest worden onderscheiden van de groep eenparige bewegingen. ⁴⁰ Alleen voor de laatste groep gold het relativiteitsbeginsel van Galilei. Einstein had er gebruik van gemaakt in zijn speciale relativiteitstheorie. Fysici konden dit

39 Albert Einstein, *Relativiteit, speciale en algemene theorie*, Aula pocket natuurkunde, 1988, pag. 46.

40 Het begrip 'eenparige beweging' is identiek aan het eerdere begrip 'uniforme beweging'.

nog goed begrijpen. Maar nu lanceerde Einstein in verband met het gravitatieveld het idee dat versnelde bewegingen net zo goed als eenparige bewegingen voldeden aan het relativiteitsbeginsel. Dat was eigenlijk een ongelooflijke gedachte, want hoe kon een versnelde beweging op één lijn worden gesteld met een eenparige beweging? Dreef Einstein hier de relativiteit niet al te ver door? Wat is eigenlijk dat relativiteitsbeginsel? Wat houdt het in? We hebben het summier besproken in verband met Einstein's speciale theorie, waar het als postulaat net zo fundamenteel was als het lichtsnelheid postulaat. Het beginsel werd voor het eerst geformuleerd door Galilei. Modern vertaald luidt het als volgt. Wanneer twee systemen uniform ten opzichte van elkaar bewegen, dan blijven de natuurwetten in beide systemen onveranderd. Neem bijvoorbeeld een vliegtuig dat met een constante snelheid van 900 km/uur beweegt ten opzichte van de aarde. Stel dat we in dat vliegtuig zitten en dat de ramen van het vliegtuig zijn geblindeerd. We kunnen dan aan niets maar ook werkelijk aan niets in het vliegtuig merken *dát* het beweegt! Het is alsof het vliegtuig 'in rust' is. Alle bewegingen *binnen in* het vliegtuig zijn precies hetzelfde als op aarde. Het maakt dus niet uit of het vliegtuig zelf beweegt of stilstaat. Dat is 'relatief'. Door fysici wordt dit gegeven van relatieve beweging algemeen geaccepteerd. Zolang er sprake is van eenparige beweging kunnen we geen verschil zien tussen een systeem in rust en een systeem in beweging. Beweging is in die zin relatief, en dat komt omdat de ruimte geen voorkeurspositie kent: er bestaat niet zo iets als een absolute ruimte waarin we een absolute beweging zouden kunnen zien. *De ruimte maakt eenparige bewegingen relatief!* Maar hoe kan dan een versnelde beweging net zo 'relatief' zijn? Want als het vliegtuig opstijgt of gaat dalen voelen we wel degelijk dat de bewegingssituatie *binnen in* het vliegtuig verandert. We worden dan bij de start in onze stoel naar achter gedrukt en bij het afremmen tijdens de landing voelen we een beweging naar voren. Ook als het vliegtuig geblindeerd is weten we met zekerheid dat het vliegtuig beweegt. De versnellende of vertragende beweging is dus wel degelijk merkbaar in de ruimte. Of niet?

Einstein voert ons mee naar het gravitatieveld. Hij ziet in gedachten een vliegtuig dat geen brandstof meer heeft en in een vrije val terecht komt. Wat ervaren we dan? Stel het vliegtuig is geblindeerd en we kijken om ons heen. Wat zien we dan? We ervaren en zien dan verschijnselen die dagelijks worden waargenomen door de astronauten in het internationale ruimte station (ISS) dat rond de aarde draait op een hoogte van circa 400 kilometer. De beweging van het ruimte station bestaat uit twee componenten: een voorwaartse beweging die ISS haar snelheid geeft en een valbeweging die er voor zorgt dat ISS een nagenoeg perfecte cirkelvormige baan rond de aarde beschrijft. Het ruimte station is voortdurend aan het vallen, zij het op steeds dezelfde hoogte; het versnellende tempo blijft constant. Het vliegtuig is ook aan het vallen, maar nu in een alsmaar versnellend tempo, namelijk als een vallende steen die steeds sneller valt.

In het vliegtuig worden ondanks zijn alsmaar versnellende beweging hetzelfde soort verschijnselen waargenomen als in het ruimte station. Namelijk twee soorten *verschijnselen die typerend zijn voor 'de vrije val beweging'*:

a) Alle voorwerpen in het vliegtuig bewegen met dezelfde snelheid; het is dus net alsof *binnen in* het vliegtuig alles 'in rust' verkeert!

b) Voor alle voorwerpen geldt dat ze gewichtloos zijn; ze zweven door de ruimte, niet meer gehinderd of beïnvloed door externe krachten!

Het was Einstein die deze typerende eigenschappen van de vrije val voor het eerst opmerkte, en hij verbond er verbijsterende conclusies aan.

Ad a) Als we in een geblindeerd vliegtuig zitten en we zien om ons heen dat alles met dezelfde snelheid beweegt, dan kunnen we niet meer constateren of we in een eenparige beweging zijn dan wel in een vrije val. Net als bij een eenparige beweging lijkt alles 'in rust'. Althans, aan enkel de bewegingen van voorwerpen hebben we geen houvast. En dat is karakteristiek voor een gravitatieveld: alle voorwerpen vallen daarin *met dezelfde snelheid*, hoe klein of groot hun massa ook is. Dus qua *beweging* is er geen verschil tussen een systeem dat eenparig beweegt en een systeem dat in een vrije val verkeert. De eenparige beweging en de vrije val beweging zijn dus relatief ten opzichte van elkaar en vallen dus nu beide onder het relativiteitsbeginsel. Het speciale relativiteitsbeginsel wordt nu een algemeen relativiteitsbeginsel! Op het eerste gezicht lijkt er een verschil te zijn. We zagen hoe in een vliegtuig dat eenparig beweegt alles normaal verloopt. Maar in een vliegtuig in vrije val gaat alles 'zweven' en daarmee is er dus toch een onderscheid. We hebben echter te maken met twee verschillende situaties waarvoor *identieke, versnellende krachten* gelden, namelijk $F=mx_a$ voor het eenparige bewegende vliegtuig en $F=mx_g$ voor het vliegtuig in vrije val.

Ad b) Einstein herinnert ons er aan dat we nog steeds in het gravitatieveld zitten. De vrije val beweging is een beweging door het gravitatieveld. En die beweging blijkt niet alleen relatief te zijn, ze maakt ook ons en alle voorwerpen *gewichtloos*. Wat gebeurt hier precies? En wat betekent het dat we gewichtloos zijn in een vrije val? Het is hier dat Einstein een geniale gedachte lanceert. Hoe komen we aan ons gewicht? We voelen ons gewicht doordat we in onze vrije val worden gestuit door de bodem waarop we staan. We verkeren dus ook op aarde voortdurend in een vrije val, maar we worden ook voortdurend tegengehouden door de grond die ons draagt en die als een kracht op ons inwerkt (via $F=mx_g$). Het is deze tegenwerkende kracht tegen de valbeweging die we kunnen aflezen op de weegschaal. We lezen dan onze *zware massa*, de massa die ons gewicht geeft. Valt echter de grond onder onze voeten weg, dan verdwijnt ook de kracht die ons draagt. We zijn enkel in een versnellende beweging. En die beweging wordt bepaald door onze *trage massa*, de massa die zich volgens de tweede bewegingswet van Newton manifesteert als een massa in versnelde beweging ($F=mx_a$). Hier komen de twee versnellende krachten bij elkaar.

Nu Einstein's geniale gedachte: waarom zou er een verschil zijn tussen de zware massa en de trage massa? Het gaat per slot om één en dezelfde massa, die zich in de ene situatie manifesteert als *gewicht veroorzaakt door een externe kracht* die de versnelde beweging verhindert en zich in de andere situatie manifesteert als *een massa in vrije, versnelde beweging*. We voelen enkel gewicht wanneer we in onze vrije val worden gehinderd en we voelen geen gewicht als we vrij uit kunnen vallen. Zou dat niet kunnen betekenen dat in het gravitatieveld massa's enkel een versnelling ondergaan *en meer niet*? Met andere woorden, is de versnellende beweging die voorwerpen in een gravitatieveld ondergaan, niet *puur en alleen* de manifestatie van de manier waarop het gravitatieveld 'werkt'? Of nog anders gezegd: is gravitatie niet enkel en alleen versnelling? Zonder een kracht?!

Het is deze gedachte – *gravitatie = versnelling* – die Einstein uiteindelijk leidde naar zijn algemene relativiteitstheorie. De equivalentie van zware en trage massa in het gravitatieveld bleek een enorme sprong voorwaarts voor ons inzicht in de feitelijke werking van gravitatie. Gravitatie is geen kracht op zich; ze uit zich pas als een kracht wanneer de versnellende werking van het gravitatieveld wordt verhindert (via $F=mxg$). Maar in de versnelde beweging *als zodanig* kunnen we geen kracht waarnemen. Newton's idee dat voorwerpen versnellen onder invloed van een externe kracht ($F=mx a$) geldt *niet* voor het gravitatieveld! In het geval van gravitatie is de versnelling van de vrije val geen manifestatie van een versnellende kracht! Het is enkel en alleen een manifestatie van *de versnellende werking van het gravitatieveld zelf*. Voor het gravitatieveld geldt niet meer: $F=mx a$, maar er geldt nu $mx a =$ werking gravitatieveld zonder F !

Versnelde bewegingen zijn dé expressie van het gravitatieveld. Ze laten zien hoe het veld 'werkt', dus wat de eigenlijke 'werking' van het veld is nl.: *versnellen!* De versnelde beweging is een manifestatie van de *vorm* van het ruimtelijke gravitatieveld. Bij een versnelde, vrije val beweging volgt het voorwerp (ongeacht de grootte van zijn massa) een specifiek spoor door de ruimte. Of moeten we zeggen: door de ruimtetijd?

Maar als we dat zeggen, komen we vanzelf terecht in de taal van de speciale relativiteitstheorie, zoals die ontwikkeld is door Minkowski! De vrije val beweging wordt dan *een serie gebeurtenissen in de ruimtetijd!* En dat was precies wat Einstein ontwikkelde in zijn algemene relativiteitstheorie. Hij ontdekte een specifieke ruimtetijd die er voor zorgde dat de vrije val beweging en alle andere bewegingen in het gravitatieveld voldeden aan de eis dat, Einstein citerend en aanvullend uit het boven beschreven citaat:

“ de sterkte en richting (dus de werking!) van het veld op grotere afstand volgen hieruit (d.w.z. uit een gravitatie opwekkende massa, zoals de aarde of de zon) met behulp van *de wet die de ruimtelijke eigenschappen* van de gravitatievelden (rond aarde en zon) zelf bepaalt”.

En dat werd een wet die, wiskundig gezien, de gedaante aannam van een complexe niet-Euclische geometrie. Deze wet bepaalde een ruimtetijd, waarin voorwerpen konden bewegen langs allerlei paden in een overal variërende gekromde ruimtetijd. *Gravitatie werd een wetenschap van de gekromde ruimtetijd.* In zijn algemeenheid bepaalde de relativiteitstheorie nu allerlei soorten van gekromde tot zelfs dynamische ruimtes. De algemene relativiteitstheorie werd *een ontdekkingsbron van nieuwe verschijnselen*, zoals het zwarte gat, de uitdijing van het heelal, de oerknal en de werking van gravitatie golven. Al deze verschijnselen zijn toe te schrijven aan de allereerste ontdekking van deze ‘moderne’ ruimtetijd door Einstein.

4.c De kromming van de ruimtetijd

We hebben in het vorige hoofdstuk kennis gemaakt met de ruimtetijd van Minkowski. We hebben gezien en besproken hoe hiermee een totaal nieuwe wereld van ruimte en tijd werd geïntroduceerd, een wereld waarvan niemand het bestaan had vermoed. De (fysische) wereld bestond niet langer meer uit een afzonderlijke ruimte en een afzonderlijke tijd, zoals Newton en velen na hem nog dachten. Ook al had Newton een ruimte-tijd systeem opgebouwd waarmee hij uniforme en versnelde bewegingen van elkaar kon onderscheiden (zie par. 4.a), toch had niemand het idee dat ruimte en tijd wel eens nauwer met elkaar verweven zouden kunnen zijn. Het was Minkowski die de uiterste consequentie trok uit Einstein’s speciale relativiteitstheorie en verklaarde dat we hiermee *een wereld van gebeurtenissen* binnengingen waarin ruimte en tijd een dynamische, geometrische eenheid – de ruimtetijd – vormden. Dynamisch in de zin dat ruimte en tijd konden krimpen c.q. vertragen. En geometrisch omdat het een nieuwe wereld betrof, voorzien van een eigen metriek, nl. de ruimtetijd ‘afstand’. Het was logisch dat Einstein in zijn algemene relativiteitstheorie zou voortbouwen op deze nieuwe wereld, die door de geometrie van Minkowski tevoorschijn was gekomen. Einstein stelde als hypothese dat de ruimtetijd van Minkowski op de een af andere manier gekromd werd in het gravitatieveld. *Het was een vreemde gedachte.* Het was een gedachte die Einstein zelf slechts met veel moeite wist te accepteren, maar voor de fysici in zijn tijd was het een compleet ‘absurde’ gedachte. Ze hield in dat ruimte en tijd in het gravitatieveld hun status als ‘vaste’ grootheden volledig kwijt raakten. De ruimte zelf kon gewoon overal, op elke ‘plaats’, veranderen, en voor de tijd gold hetzelfde. Maar dat is volstrekt bizar. Want dat gaat volledig in tegen onze intuïtie.

Dat de ruimte kan krimpen en de tijd kan vertragen, dat is nog te accepteren. We kunnen ons hier namelijk enige voorstelling van maken. Zo laat Minkowski’s ruimtetijd zien hoe in een bewegend voorwerp de ruimte krimpt en de tijd vertraagt al naar gelang zijn snelheid. We zien dan dat de ruimte in de lengterichting krimpt, maar wel gelijkmatig krimpt, d.w.z. overal langs de

lengterichting in gelijke ruimte-eenheden. Hetzelfde geldt voor de tijd; ook die vertraagt in gelijke mate, d.w.z. de tijd blijft, zij het langzamer, wel in eenzelfde tempo doorlopen. Enige voorstelling kunnen we ons hierbij nog maken.⁴¹

Dat gaat niet meer op voor Einstein's geniale idee van een kromming in de ruimtetijd. Hier schiet ons voorstellingsvermogen te kort. We moeten ons nu gaan voorstellen hoe de ruimte zelf wordt uitgerekt en de tijd zelf wordt vervormd.⁴²

Weliswaar zijn de uitrekking en vervorming gekoppeld aan de 'plaats' in het gravitatieveld, maar dan nog blijft het uiterst vreemd. Denk aan een grote massa dat om zich heen een gravitatieveld opwekt. We moeten ons dan gaan voorstellen hoe ruimte en tijd *in zichzelf* veranderen al naar gelang de posities in dit statische veld. Het leidt eigenlijk tot veel fundamentele vragen:

. *Hoe 'bestaat' het dat de ruimte in zichzelf kan veranderen?*

. *Hoe 'bestaat' het dat de tijd in zichzelf kan veranderen?*

Met wat voor gedachteconstructie hebben we hier te maken? Het is net alsof ruimte en tijd volstrekt vluchtige begrippen zijn geworden. Wat kunnen we nog eigenlijk 'denken' van 'ruimte' en 'tijd'? Terwijl deze begrippen in de Minkowski ruimtetijd nog enigszins te begrijpen zijn, lijkt het alsof elk begrip dat we nog zouden kunnen hebben van ruimte en tijd, verdwijnt zodra we te maken krijgen met de gekromde ruimtetijd. En wat is dat voor *eenheid* van ruimte en tijd, die gekromde ruimtetijd? Heeft zij nog wel een eigen metriek? Of is ook die verdwenen?

41 Neem bijvoorbeeld een voorwerp dat beweegt met driekwart van de lichtsnelheid ($v=0,75c$). Het voorwerp beweegt dan door een Minkowski ruimtetijd die specifieke (relativistische) effecten heeft op de ruimte en tijd van het voorwerp.

a) De ruimte in het voorwerp wordt 'her-schaald', d.w.z. de meetlat met een lengte van 1 meter, dus 100 centimeters, krijgt nu een nieuwe schaal. Er ontstaat in het voorwerp een 'lengte' van 1,5 meter, d.w.z. een schaal waarbij de 100 eenheden onderverdeeld (her-schaald) zijn in 150 eenheden. De ruimte-eenheden zijn kleiner geworden; een centimeter in het voorwerp is nog maar $\frac{2}{3}$ van wat het was: de ruimte krimpt.

b) De tijd in het voorwerp wordt 'her-schaald', d.w.z. de tijdsduur van 1 minuut op de klok, dus 60 seconden, krijgt nu een nieuwe schaal. Er ontstaat in het voorwerp een 'tijdsduur' van 1,5 minuut, d.w.z. een schaal waarbij de 60 eenheden onderverdeeld (her-schaald) zijn in 90 eenheden. De tijdseenheden zijn kleiner geworden; één seconde is nu slechts voor $\frac{2}{3}$ verstreken: de tijd vertraagt.

42 In een gravitatieveld wordt de ruimte uitgerekt. Bijvoorbeeld bij de vrije val beweging wordt er in gelijke tijdseenheden telkens een steeds grotere afstand afgelegd. Met andere woorden, de ruimte vergroot zichzelf gedurende de beweging van de vrije val. Deze beweging, uitgedrukt in gelijke tijdseenheden, manifesteert zich in een continu uittrekkende ruimte. Nu is de beweging door de ruimtetijd ook een manifestatie van gebeurtenissen. Een gebeurtenis geeft weer waar-wanneer een voorwerp te voorschijn komt in de ruimtetijd. Het gaat dus bij de vrije val beweging om een serie gebeurtenissen waarin de tijd gelijkmatig blijft doorlopen maar de ruimte voortdurend verspringt. Er is hier geen sprake meer van een gelijkmatig doorlopende ruimte zoals dat nog in de Minkowski ruimtetijd gold. We hebben hier te maken met een heel ander soort ruimtetijd.

Dat Einstein daar zelf niet uitkwam, is bekend. Hij moest de hulp van wiskundigen inroepen om dit probleem te kunnen oplossen. Hij wist dat er naast de Euclidische ook een niet-Euclidische geometrie bestond. Maar zijn kennis van dit specifieke vakgebied was beperkt en bovendien voelde hij zichzelf meer fysicus dan wiskundige. Toch was hij zeker van zijn zaak: de ruimtetijd van het gravitatieveld moest gekromd zijn. Het was een gedachte die niet zomaar bij hem was opgekomen. Hij durfde die gedachte te denken, met alle gevolgen van dien. Als versnelde bewegingen *de enige en echte expressies* waren van het gravitatieveld, dan lieten ze zien hoe het veld *als veld* ‘werkte’, dus wat de eigenlijke ‘werking’ van het veld zelf was. De versnelde beweging was dan een manifestatie van de ruimtetijd *geometrie* van het gravitatieveld. Hoe moeten we ons dat voorstellen?

4.c.1 Geodeten en beweging

Laten we even terugkeren naar het ruimtetijd diagram van Minkowski (zie par. 3.e.1). Aan de hand van dit diagram hebben we leren begrijpen dat de ruimte samen met de tijd een wereld van gebeurtenissen scheidt. Het diagram laat ons kennis maken met een nieuwe wereld, de wereld van de ruimtetijd, die zich manifesteert als een bijzondere vierdimensionale geometrie (drie dimensies voor de ruimte en een dimensie voor de tijd). Deze geometrie heeft een eigen *metriek*: de ruimtetijd ‘afstand’ (zie par. 3.e.2). Het is een eenheidsmaat (een soort meetlat) waarmee we afstanden kunnen bepalen in de ruimtetijd, te weten *afstanden tussen gebeurtenissen*. Maar dit zijn wel bijzondere afstanden, niet te vergelijken met de afstanden die we gewend zijn in de ruimte om ons heen. In de ‘normale’ ruimte werken we met afstanden tussen posities in de ruimte, oftewel tussen twee ruimtepunten. Daarbij geldt dat de kortste afstand tussen twee punten – ook wel *geodeet* genoemd – een rechte lijn is.

In het ruimtetijd diagram van Minkowski zien we ook rechte lijnen die gelden als geodeten, namelijk geodeten in de ruimtetijd geometrie. Ze geven de kortste verbinding weer tussen twee gebeurtenissen in het diagram. Het gaat hier echter niet meer om een afstand tussen twee ruimtepunten (zoals in de ‘normale’ ruimte), maar om een afstand tussen twee *ruimtetijd* punten. Dat maakt de ruimtetijd als nieuwe wereld wel bijzonder. Want nu kijken we naar verbindingen tussen gebeurtenissen en kunnen we ons afvragen wat deze verbindingen ‘voorstellen’. Het antwoord is fascinerend: de verbindingen laten sporen zien in de ruimtetijd. Het zijn sporen waarlangs voorwerpen kunnen bewegen. De ruimtetijd opent als het ware wegen waarover voorwerpen kunnen reizen. Een object (zoals een planeet) beweegt dus niet meer door de ruimte, maar door een ruimtetijd waarin sporen zijn uitgezet. Het object wordt dus gedwongen om zo’n spoor door de ruimtetijd te volgen. Deze sporen staan ook wel bekend als *wereldlijnen*.

Uiteraard kan een object een geheel eigen spoor volgen door de ruimtetijd. Bijvoorbeeld kan een raket die vertrekt van de aarde een reis maken door de ruimtetijd en na vele omzwervingen langs een aantal planeten weer terugkeren naar de aarde. Zo'n reis voltrekt zich niet langs één geodeet maar langs meerdere geodeten. Telkens wanneer de raket op weg gaat naar een nieuwe planeet, volgt hij een nieuw spoor door de ruimtetijd. Het is een bijzondere reis in die zin dat de raket vooral bezig is *gebeurtenissen te ondergaan*. De bemanning in de raket kan het gevoel hebben dat ze een pad kiezen door de ruimte, maar in werkelijkheid reizen ze door een wereld die hen dwingt langs bepaalde geodeten te reizen. Het zijn de gebeurtenissen die hun reis domineren!

Het is niet makkelijk om te wennen aan deze wereld waarin een beweging afgedwongen wordt door een geodeet. Maar het is wel de manier om te begrijpen wat er gebeurt in de ruimtetijd. Bewegingen zijn verbindingen tussen gebeurtenissen. Anders geformuleerd, bewegingen zijn manifestaties van sporen in de ruimtetijd. De ruimtetijd bepaalt hoe een voorwerp beweegt. Geodeten in de ruimtetijd geometrie zijn sporen waarlangs objecten moeten bewegen. Objecten kunnen niet anders dan bewegen over die sporen.

Wat we zien verschijnen in het ruimtetijd diagram van Minkowski is een specifiek type wereldlijn, een lijn waarlangs een bepaald type beweging zich kan manifesteren. Niet alleen gaat het om een specifieke beweging door de ruimtetijd, *het is ook en vooral een beweging vrij van krachten*. In de speciale relativiteitstheorie van Einstein gaat het om eenparige, uniforme bewegingen. Het zijn bewegingen van het type die we al bij Newton tegenkwamen, maar nu weergegeven in een andere wereld van ruimte en tijd. Ze vinden niet meer plaats in de ruimte-tijd wereld van Newton, maar ze manifesteren zich nu in de ruimtetijd wereld van Minkowski. Krachten-vrije bewegingen zijn rechte lijnige bewegingen en vormen aldus de kortste verbindingen tussen twee gebeurtenissen. Via de ruimtetijd afstand krijgen deze geodetische bewegingen een opmerkelijke karakterisering.

Concentreren we ons nogmaals op het Minkowski diagram. Het diagram bestaat uit een ruimte-as en een tijd-as. Maar het is een bijzondere combinatie van assen; ze geven weer *waar-wanneer* iets gebeurt. Ze vormen een kader waarbinnen gebeurtenissen plaatsvinden. Met name betreft het *de gebeurtenis van een krachten-vrije beweging*, d.w.z. de verschijning van een vrij bewegend object op verschillende ruimtetijd punten in het diagram. Samen vormen deze ruimtetijd punten een wereldlijn, een lijn van gebeurtenissen. En wanneer we de afstand bepalen van twee gebeurtenissen op zo'n wereldlijn, dan noteren we een bijzonder soort afstand, nl. een ruimtetijd afstand, in formulevorm weergegeven met: $s^2 = t^2 - r^2$ (zie par. 3.e.2). Dit is tevens de kortste afstand tussen twee ruimtetijd punten in het diagram, m.a.w. de wereldlijn valt samen met een geodeet in Minkowski's ruimtetijd geometrie. Bijzonder aan deze geodeet is de volgende, eigenaardige karakterisering: het is *de kortste weg (in het diagram)*

met de langste ruimtetijd (= eigentijd) afstand.⁴³ Geodeten in de ruimtetijd geometrie vormen lijnen die deze eigenaardige essentie tot uitdrukking brengen in haar metriek.

4.c.2 Geodeten en gravitatie

Het is nu niet meer zo moeilijk om te zien en te begrijpen hoe geodeten in de ruimtetijd geometrie van het gravitatieveld deze eigenaardige essentie – als de kortste weg (in de geometrie) met de langste (eigentijd) afstand – vasthouden. Want ook de ruimte van het gravitatieveld moet gekoppeld worden aan de tijd zodat we de *gebeurtenissen in het gravitatieveld* kunnen beschrijven met behulp van een ruimtetijd structuur. Het probleem is echter dat Minkowski's ruimtetijd, zoals we die hebben leren kennen, niet geschikt is om versnelde bewegingen te onderzoeken. Het is namelijk een ruimtetijd diagram waarin we enkel rechtlijnige bewegingen kunnen analyseren. Zodra we een kromlijnige beweging zien in dit diagram weten we dat de speciale theorie van Einstein er niet meer op van toepassing is. We zullen dan een ander soort diagram moeten maken waarmee we deze kromlijnige beweging wel kunnen analyseren.⁴⁴ En die zullen we moeten analyseren met een meer algemene theorie.

Hoe kunnen we ons wereldlijnen voorstellen in een gekromde ruimtetijd? Wereldlijnen zijn, zoals we gezien hebben, manifestaties van gebeurtenissen in de ruimtetijd. In de gekromde ruimtetijd functioneren ze tevens als geodeten d.w.z. als sporen waarlangs objecten (zoals planeten) gedwongen zijn te bewegen. Het bijzondere van deze wereldlijnen – dus wereldlijnen in de *gekromde* ruimtetijd – is dat ze niet meer zichtbaar zijn, immers ruimte en tijd veranderen alsmaar en dit kunnen we niet meer weergeven in een ruimtetijd diagram! Het zou namelijk betekenen dat we ruimte en tijd in zo'n diagram voortdurend moeten aanpassen, maar daar kunnen we geen 'beeld' bij maken!⁴⁵ We kunnen echter wel *begrijpen* wat we doen als we ruimte en tijd alsmaar laten veranderen, ook al kunnen we ons daar geen beeld bij vormen.

Het is de wiskunde van de niet-Euclidische 'ruimte' die ons daarbij helpt.⁴⁶ Zij laat ons een gekromde ruimtetijd zien waarin versnelde bewegingen worden weergegeven als geodeten in een niet-Euclidische ruimtetijd geometrie. Het is een mondvol woorden – geodeten in een niet-Euclidische ruimtetijd geometrie – maar het geeft wel de situatie weer waarin Einstein verzeild raakte toen hij

43 Zie Bijlage 7.

44 Zie Bijlage 8.

45 We merken hier hoe we op de grenzen stuiten van ons voorstellingsvermogen. Onze beeldvorming is gekoppeld aan een vaste ruimte om ons heen. Maar zodra die ruimte zelf gaat veranderen in een 'onvaste' ruimte, hebben we geen houvast meer om tot een ruimtelijk 'beeld' te komen. De relatie ruimte-beeld is dan verbroken.

46 Wiskundige spreken over een 'ruimte' en bedoelen daarmee een wiskundige ruimte van abstracte symbolen en formules. Dus dit begrip van ruimte moet niet verward worden met het fysische begrip van ruimte!

probeerde om voor zijn categorie van versnelde bewegingen een geschikt ruimtetijd kader te vinden. We zagen in par. 4.b hoe Einstein met de vrije val beweging een nieuwe categorie toevoegde aan de wereld van ‘krachten-vrije’ bewegingen. Het gaat om wereldlijnen die gebeurtenissen weergeven in een gekromde ruimtetijd. Ze passen niet in een vlakke ruimtetijd, ze kunnen zich alleen manifesteren in een gekromde ruimtetijd geometrie.

‘Kromlijnige’ wereldlijnen zijn niets anders dan wereldlijnen in een gekromde ruimtetijd. Hun kromlijnigheid is nog wel ‘zichtbaar’ in een Minkowski diagram, maar in de geometrie van de gekromde ruimtetijd functioneren ze enkel als abstracte (onzichtbare) wiskundige geodeten, d.w.z. als de kortste geometrische verbinding tussen twee gebeurtenissen. En nu kunnen we zien en begrijpen wat er gebeurt in de gekromde ruimtetijd, als objecten (zoals planeten) een spoor gaan volgen door de kromming van de ruimtetijd. Bewegingen door het gravitatieveld worden nu series gebeurtenissen die laten zien *hoe versnelde bewegingen zich manifesteren als geodeten in een gekromde ruimtetijd*. Laten we ons verplaatsen in de voorwerpen die zo’n beweging, d.w.z. zo’n volgorde van gebeurtenissen doorlopen (bijv. de planeten). We zien dan hoe beide soorten ‘krachten-vrije’ bewegingen – de uniforme, eenparige beweging en de versnelde, vrije val beweging – zich als één gecombineerde beweging gaan manifesteren. We krijgen dan een complexe geodeet die de kortste verbinding vormt tussen twee punten in de gekromde ruimtetijd.

De constructie van zo’n geodeet lukt op wonderbaarlijke wijze via de bijzondere niet-Euclidische geometrie die door Einstein ontwikkeld werd in zijn algemene relativiteitstheorie. Deze geometrie van de gekromde ruimtetijd maakt het mogelijk om een rechte lijn te laten ‘meereizen’ met een bepaalde kromming van de geometrie! De rechte lijn geeft dan de neiging van het voorwerp weer om alsmäär eenparig, rechtdoor te reizen. Want dat is de natuurlijke, krachten-vrije beweging van het object zelf door de vlakke ruimtetijd (geanalyseerd in de speciale relativiteitstheorie van Einstein!). Maar in het gravitatieveld reist het voorwerp ook door een gekromde ruimtetijd. De kromming van de geometrie brengt tot uitdrukking hoe het voorwerp versneld wordt in het gravitatieveld. De versnelde beweging is net als de eenparige beweging een krachten-vrije beweging en volgt dus op haar wijze het spoor van een geodeet. Het gaat daarbij om de kortste verbinding tussen twee punten in de kromming van de ruimtetijd (door Einstein geanalyseerd in zijn algemene relativiteitstheorie via het equivalentie beginsel).

Aldus krijgen we een samengesteld spoor door een niet-Euclidische ruimtetijd geometrie. Een spoor dat door wiskundigen wordt uitgedrukt in een complexe geodeet die tevens de metriek van de niet-Euclidische geometrie bevat. De metriek bepaalt de structuur die vastlegt hoe voorwerpen gaan bewegen door de ruimtetijd. Het object in beweging (zoals een planeet) is gedwongen om het spoor van deze complexe geodeet te volgen. Want bewegingen zijn verbindingen

tussen gebeurtenissen. Anders geformuleerd, bewegingen zijn manifestaties van sporen in de ruimtetijd. De ruimtetijd bepaalt hoe een voorwerp beweegt. Geodeten in de ruimtetijd zijn sporen waarlangs objecten moeten bewegen. Objecten kunnen niet anders dan bewegen over die sporen.

Dit is dus Einstein's antwoord op de grote vraag die destijds aan Newton werd gesteld (zie par. 4.a). Newton antwoordde nog via de idee van een ruimte-tijd wereld die gevuld was met krachten. Einstein veranderde deze wereld in een nieuwe ruimtetijd wereld die gevuld was met geodeten. De krachten werden vervangen door geodeten, en daarmee schiep Einstein een onwaarschijnlijk, ontzagwekkend heelal waarin massa's in dynamische wisselwerking stonden met hun ruimtetijd omgeving. Het is een heelal waar de ruimtetijd ons nog voor veel verrassingen zal plaats. ⁴⁷

4.d Ruimtetijd als interpretatiekader (deel 3)

We herhalen nogmaals onze intentie met de analyses van ruimte en tijd. We volgen daarbij het betoog van DiSalle in zijn boek 'Understanding space-time'; hij stelt dat ruimte en tijd in de fysica een bijzondere positie innemen, zowel wetenschappelijk als filosofisch gezien. Ruimte en tijd zijn zeker *geen* factoren waarmee fysische verschijnselen worden verklaard. De verklaring van fysische verschijnselen geschiedt op basis van natuurwetten.

Ruimte en tijd dienen eerst en vooral als een faciliterend beschrijvingskader. Ze maken het ons mogelijk om met meetlat en klok allerlei processen te beschrijven die zich voordoen in de fysische wereld om ons heen. Wat DiSalle laat zien is dat ze daarnaast een functie hebben als interpretatiekader. En dat is hun filosofische betekenis. Ruimte en tijd zijn begrippen die we hanteren vanuit onze ervaring. We denken dat ze verwijzen naar entiteiten in de wereld: de ruimte en de tijd. Maar het zou ook anders kunnen zijn, nl. dat ze niet zozeer verwijzen naar ruimte en tijd, maar dat ze vooral bruikbaar zijn als begrippen waarmee en waardoor we fysische verschijnselen kunnen gaan interpreteren. We zien dan die verschijnselen als het ware voor het eerst *begrijpelijk verschijnen* – d.w.z. vatbaar voor 'goede' theorie – want zonder dat kader zouden ze weliswaar zichtbaar zijn maar nog steeds ontsnappen aan ons begrip. Newton was de eerste wetenschapper die consequent ging werken met een ruimte-tijd kader. Sindsdien is dit kader niet meer weg te denken uit de fysica. Het functioneert als een onmisbare achtergrond voor tal van onderzoeken in de natuurwetenschap.

De filosofisch-wetenschappelijke analyse van ruimte en tijd (à la DiSalle) laat ons een fascinerend beeld zien van de ontwikkeling die de *begrippen* ruimte en tijd hebben doorgemaakt. Einstein heeft het (waarschijnlijk) aldus verwoord:

⁴⁷ Zie Bijlage 9.

– *Ruimte en tijd zijn modi waarin we denken, geen condities waarin we leven.* ⁴⁸
Het is in feite een ontwikkeling in drie fasen. De eerste fase begint bij Newton die zag hoe ruimte en tijd bruikbaar konden worden gemaakt om bewegingen te beschrijven en om uniforme bewegingen te onderscheiden van versnelde bewegingen. We hebben gezien hoe Newton tot zijn begrip van (absolute) ruimte en tijd kwam via de eerste bewegingswet. De wet was van invloed op de definitie van ruimte en tijd, en omgekeerd waren deze nieuwe begrippen van ruimte en tijd van invloed op de concretisering van de wet. Zijn doel was uiteindelijk om te laten zien hoe de wereld van sterren en planeten beheerst werd door een kosmische gravitatie kracht. (zie par. 2.f.1 en 2.g).

De tweede fase begint bij Einstein en Minkowski. De speciale theorie werd door Einstein ontwikkeld om een probleem met de elektromagnetische theorie van Maxwell te kunnen oplossen. In zijn tijd meenden fysici dat deze theorie niet voldeed aan Galilei's relativiteitsprincipe; de beweging van het licht zou net als andere bewegingen relatief zijn en geen uitzonderingspositie mogen innemen. Het licht zou zich bovendien moeten voortplanten in een medium: de ether. Maar Einstein lanceerde de gedachte dat de beweging van het licht wel degelijk een cruciale rol speelde; de constante lichtsnelheid was een constante van de natuur en daarvoor was geen ether als medium nodig. Het licht hield zichzelf in stand als elektromagnetische golf en als een stroom quanta.

Einstein liet in zijn speciale theorie zien hoe Galilei's relativiteitsbeginsel kon worden verbonden met het beginsel van een constante lichtsnelheid. Hij ontdekte dat ruimte en tijd zich lieten 'plooien' in bewegende voorwerpen. Hoe sneller een object bewoog des te sterker werd het effect: een ruimte die alsmaar sterker ging krimpen (in de lengterichting) en een tijd die alsmaar sterker vertraagde (in alle processen). Bovendien was er sprake van een gestage massavergroting die tot oneindig kon oplopen bij de grens van de lichtsnelheid. In deeltjesversnellers verwerven elektronen en protonen, hoe minuscuul klein ze ook zijn, een enorme kracht die tot spectaculaire botsingen kan leiden. Kortom, Einstein's theorie met zijn speciale rol voor ruimte en tijd opende een nieuwe wereld die tot dan toe volledig onbekend was. En Minkowski begreep dat ruimte en tijd een diepere eenheid lieten zien, namelijk een ruimtetijd bestaande uit gebeurtenissen (waarwanneer) die een nieuw interpretatiekader vormden. Opeens verschenen via dit kader nieuwe verschijnselen die zonder dat kader onzichtbaar bleven. *Het was alsof ruimte en tijd ons denken konden verruimen.*

Dat leidde naar de derde fase in de ontwikkeling van de begrippen ruimte en tijd. Einstein omarmde het ruimtetijd begrip van Minkowski en paste het toe op de analyse van het gravitatieveld. We zien hier hoe een wisselwerking tussen deze twee aspecten – ruimtetijd en gravitatieveld – Einstein leidde naar zijn algemene

48 Dit citaat wordt aan Einstein toegeschreven, maar de bron is onbekend. Desalniettemin geeft het citaat goed weer wat er met de *begrippen* ruimte en tijd is gebeurd in de loop van de geschiedenis van de fysica.

theorie. De ruimtetijd was een wereld van krachten-vrije bewegingen, en het gravitatieveld een wereld van versnelde bewegingen. Einstein wist deze twee werelden bij elkaar te brengen via het equivalentiebeginsel (zijn eerste geniale gedachte) en de idee van een gekromde ruimtetijd (zijn tweede geniale gedachte). Door deze wisselwerking opende zich *een nieuw interpretatiekader*, een nieuwe gedachteconstructie om fysische verschijnselen op een begrijpelijke wijze te interpreteren.

Wat als de versnelde beweging zich zou kunnen voltrekken in een gekromde ruimtetijd?

a) Zou dat mogelijk zijn?

b) En met welke ruimtetijd geometrie?

Ad a) Het idee van een gekromde ruimtetijd was een idee dat oorspronkelijk door wiskundigen werd geopperd in de 19de eeuw. Maar fysici konden er weinig mee. Totdat Einstein zich realiseerde dat een gekromde ruimtetijd wel eens een gedachteconstructie zou kunnen zijn waarmee de werking van het gravitatieveld veel begrijpelijker werd. Zo'n kromming van de ruimtetijd zou ruimte en tijd dusdanig kunnen krommen dat bewegingen door de ruimtetijd de manifestatie werden van *gebeurtenissen die in die kromming plaatsvonden*. Met name gebeurtenissen waarin een versnelde beweging tot expressie kwam.

Ad b) De Minkowski geometrie moest dan wel worden aangepast. Maar wanneer Einstein eenmaal zou beschikken over een aangepaste ruimtetijd geometrie, dan zou hij ook over een nieuw interpretatiekader beschikken waarmee hij (tot dan toe) onverklaarde verschijnselen zou kunnen 'begrijpen' en nieuwe (nog nooit gedachte) verschijnselen zou kunnen 'zien'. Dat was het fascinerende perspectief van zijn algemene theorie. De theorie zou veel meer kunnen opleveren dan enkel de verklaring van de versnelde beweging. De gekromde ruimtetijd zou als een nieuwe 'bril' voor fysici kunnen werken.

Newton maakte gravitatie zichtbaar in een kracht op afstand, waarbij ruimte en tijd dienden voor de inkadering van die kracht via een versnelde beweging, zijnde een continue verandering van snelheid. Bij Einstein werd gravitatie zichtbaar in een kromming van de ruimtetijd, waarbij ruimte en tijd zelf continu veranderden en daardoor een versnelde beweging konden afdwingen. Het was de beslissende overgang van fase 1 naar fase 3, de overgang van Newton's visie naar Einstein's visie. Lange tijd had de fysica de wereld van sterren en planeten gezien als een ruimte-tijd wereld waarin veranderingen van snelheid plaatsvonden onder invloed van een kracht. En nu werd de wereld van sterren en planeten een ruimtetijd wereld waarin veranderingen van ruimte en tijd plaatsvonden onder invloed van een kromming. De gravitatie kracht van Newton verdween en werd vervangen door de gekromde ruimtetijd van Einstein.

Aldus zijn we aanbeland bij een wereld waarin de ruimtetijd ons uitnodigt om *anders te denken*, hoe vreemd dat denken soms ook lijkt. Maar we hebben nog

steeds een houvast aan objecten zoals sterren en planeten; we kunnen ze namelijk volgen via hun bewegingen. En die bewegingen blijven ons fascineren. Zo werd Newton gefascineerd door de idee dat er krachten werkzaam zijn achter deze bewegingen. Maar Einstein stelde zich voor hoe deze bewegingen moesten lopen langs de sporen van geodeten. Aldus werd een wereld van krachten vervangen door een wereld van geodeten.

Het zijn de geodeten die samen een krachtig netwerk vormen. Het zijn de geodeten die bepalen hoe bewegingen zich voltrekken. Het zijn de geodeten die de spoorlijnen vormen van de ruimtetijd. Geodeten leggen verbindingen tussen gebeurtenissen; het zijn de kortste verbindingen tussen gebeurtenissen, en daarmee de lijnen waarlangs alle natuurlijke (krachten-vrije) bewegingen lopen. Maar geodeten zijn ingebed in de niet-Euclidische geometrie van ruimte en tijd. Het is uiteindelijk deze ruimtetijd geometrie met al zijn (onvermoede) mogelijkheden die het fysisch denken ingrijpend verandert.

4.e Het wereldsysteem van Einstein

De ruimtetijd is een wereld van gebeurtenissen. Ze vertelt waar-wanneer iets gebeurt. Bijvoorbeeld op welke plek in de ruimte en op welk moment in de tijd een voorwerp ‘verschijnt’. Maar de ruimtetijd vertelt ook iets meer. Ze vertelt ook hoe in onze waarneming ruimte en tijd elkaar beïnvloeden. Zodra een voorwerp gaat bewegen, zien we ruimte en tijd gezamenlijk reageren. Hoe harder we een voorwerp zien bewegen, des te sterker zien we de ruimte krimpen en des te trager zien we de tijd lopen. Dat we dit allemaal kunnen ‘waarnemen’ komt door de begrenzendende rol van de lichtsnelheid die nl. in de verschillende situaties een constante blijft. Het gaat hier specifiek om een Minkowski ruimtetijd, d.w.z. een geometrische verwevenheid van ruimte en tijd zoals die afgeleid kan worden uit de transformatiewet van Einstein’s speciale theorie.

Maar ook voor versnelde bewegingen geldt een onderlinge beïnvloeding van ruimte en tijd. Hier is de beweging onderworpen aan een gekromde ruimtetijd, d.w.z. aan een geometrie waarvan de geodeten spoorlijnen vormen door een netwerk van ruimte en tijd. Het zijn lijnen waarlangs voorwerpen in vrije val gedwongen worden te bewegen. De spoorlijnen worden getrokken in een speciale niet-Euclidische geometrie. De ruimte in deze geometrie krimpt niet maar rekt uit, en de tijd vertraagt niet maar varieert in tempo. Het is alsof ruimte en tijd zich soepel kunnen voegen in een voor de fysicus geschikte geometrie. Of het nu gaat om krimpen en vertragen, of dat het gaat om uitrekken en variëren in tempo, ruimte en tijd schrikken er niet voor terug.

Al eerder hebben we opgemerkt dat dit iets heel opmerkelijks is. Ruimte en tijd laten zich meenemen in wiskundige gedachteconstructies die nut opleveren voor de fysicus. Het zijn zoals Einstein opmerkte ‘modi waarin we denken’. Vooral in de algemene theorie ontstaan via de niet-Euclidische geometrie mogelijkheden die het denken in termen van ruimte en tijd verruimen. De begrippen ruimte en

tijd kunnen ons een wereld binnen leiden, waarvan de verschijnselen soms onmogelijk te ontdekken laat staan te begrijpen waren. Het verhaal van de uitdijning van het heelal is daarvan een sprekend voorbeeld. Het is goed om hierbij te blijven beseffen dat het een verhaal is van *de ruimtetijd*, een ruimte en tijd die *verenigd* zijn, en niet het verhaal van een aparte ruimte en een aparte tijd.

Het verhaal van de ruimtetijd begint bij de vertaling die Minkowski gaf aan de speciale theorie van Einstein. Het verhaal werd uitgebreider door de ontdekking van de werking van een gekromde ruimtetijd in het gravitatieveld. En toen kwam de ontdekking van de uitdijning van het heelal! Hubble ontdekte in de jaren twintig van de vorige eeuw via een serie observaties dat hoe verder een sterrenstelsel van ons vandaan staat des te sneller het zich van ons af beweegt. Ook hier dus weer een speciaal type beweging dat de natuur ons laat zien, naast de al bekende uniforme en versnelde bewegingen. Voor deze laatste typen van bewegingen golden de speciale en algemene theorie van Einstein als verklaringsmodel. Maar welke theorie kon nu dit nieuwe type Hubble beweging verklaren?

Met de ontdekking van de uitdijning van het heelal kwam het verhaal van de ruimtetijd in een stroomversnelling. Nog niet lang daarvoor was er al een opmerkelijke uitwerking gegeven aan het verhaal, en wel via Einstein en Friedmann. De een als fysicus en de ander als wiskundige waagden zich aan een theoretische verklaring van het heelal *als geheel*. Er waren in die tijd allerlei speculaties rondom de kosmos.⁴⁹ Het was niet zo dat Einstein en Friedmann deze speculaties wilden oplossen, maar ze wilden wel eens nagaan in hoeverre de veldvergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie een ‘beeld’ konden geven van het heelal als geheel. Dit was eigenlijk nog door niemand geprobeerd. Hoezo kon je gaan ‘rekenen’ aan het heelal ‘als geheel’? Dat dit nu kon kwam omdat de algemene theorie een verbazingwekkende samenhang had blootgelegd tussen de energiedichtheid van een massa en de ruimtetijd van het (daardoor opgewekte) gravitatieveld.

De heelal-modellen van Einstein en Friedmann laten iets bijzonders zien. Ruimte en tijd maken via de ruimtetijd deel uit van een groter fysisch systeem. Wheeler, een fysicus uit het eind van de vorige eeuw vatte de algemene theorie van Einstein als volgt samen: *materie vertelt ruimte(tijd) hoe te krommen, en ruimte(tijd) vertelt materie hoe te bewegen*. Zie daar in één zin de samenhang

49 De kosmos was in de 19de en begin 20ste eeuw nog grotendeels een mysterieus object. Men had al een idee van de enorme uitgebreidheid van de kosmische ruimte, en men kreeg ook al een idee van de leeftijd van het heelal. Maar verschillende informatiebronnen (vanuit de astrofysica, de astronomie, de geologie, de evolutieleer e.d.) lieten zich niet met elkaar verenigen. Gegevens spraken elkaar tegen, bijvoorbeeld als het ging om de leeftijd van een ster en de leeftijd van de aarde. Of bijvoorbeeld als het ging om het ons vertrouwde melkwegstelsel, waarvan sommigen beweerden dat er nog meer melkwegstelsels waren.

tussen massa en ruimtetijd, ze vormen als het ware een omvattend fysisch systeem. Materie, energie, ruimte en tijd zijn niet onafhankelijk van elkaar, ze beïnvloeden elkaar voortdurend. Dit principe van een alomvattend fysisch systeem leek uitstekend geschikt om te rekenen aan het heelal als geheel. Het heelal werd nu namelijk precies dat omvattende systeem!

Einstein ging er voor zijn heelal-model van uit dat het heelal 'als geheel' voldoet aan *het kosmologisch principe*: de materie in het heelal is op grote schaal homogeen (d.w.z. gemiddeld heerst overal dezelfde dichtheid) en isotroop (d.w.z. in alle richtingen hetzelfde). Het beginsel houdt in dat je op elke plek in het heelal eenzelfde beeld ziet waar je je ook bevindt en in welke richting je ook kijkt. Dit principe geldt nog steeds als richtinggevend voor moderne heelal-modellen. Het betekent in feite dat wij op geen enkele manier een bevoorrechte positie in het heelal innemen. Copernicus had dat destijds al geopperd met betrekking tot de aarde en de zon. Waarom zou de aarde een bijzondere positie innemen in het planetenstelsel? En nu, waarom zou de aarde een bijzondere positie innemen in het heelal?

Met deze randvoorwaarde analyseerde Einstein dat zijn heelal beheerst moest worden door twee krachten: de gravitatiekracht van alle materie in het heelal en een anti-gravitatiekracht. Hij ontdekte via zijn veldvergelijkingen dat de materie van het heelal heel snel zou instorten als er niet een afstotende kracht zou werken die het heelal tot een stabiel geheel maakte. Einstein ontwierp een heelal waarin de twee krachten volstrekt in evenwicht waren. En hij liet via zijn niet-Euclidische ruimtetijd geometrie zien dat de ruimte van het heelal daardoor een kromming maakte rondom de tijd-as van het heelal. Zijn heelal-model ziet er uit als een cilinder met de tijd als cilinder-as en de ruimte gesitueerd op het oppervlak van de cilinder. De kosmische tijd in zijn heelal is oneindig (er is geen begin noch een eind van de tijd) en de ruimte van het heelal is weliswaar eindig maar onbegrensd. Een lichtstraal door dit geheel zou op enig moment weer terugkeren op de plaats van uitstraling.

Nadere analyse van dit Einstein-heelal leert dat het evenwicht tussen de aantrekkende en afstotende kracht een zeer labiel evenwicht is. Er hoeft maar iets te gebeuren of het heelal trekt samen of het gaat oneindig uitdijen. Blijkbaar is er in het heelal, d.w.z. in het heelal als omvattend fysisch systeem (materie, energie, ruimte en tijd) *iets* dat haar een onvermijdelijke *dynamiek* geeft. Het was Friedmann die dit voor het eerst goed onderzocht en uitwerkte. Hij ging net als Einstein uit van het kosmologisch beginsel, maar nu nam hij aan dat de materiedichtheid in het heelal kon fluctueren. En toen ontdekte hij dat het heelal zich gedroeg als een ruimtetijd systeem dat voortdurend veranderde, d.w.z. de ruimte reageerde voortdurend op de veranderingen in materiedichtheid. Als het heelal begon met een hoge dichtheid, dan reageerde de ruimte van het heelal met een uitdijning die na verloop van tijd overging in een inkrimping. Een dergelijk heelal noemde Friedmann *een gesloten heelal*. En hij had hiervoor

bijzondere belangstelling omdat het suggereerde dat het heelal kon instorten waarna het weer kon uitdijen. Het leek dan alsof het heelal in- en uitademde door een oneindige tijd. Maar Friedmann waagde zich niet aan een fysische verklaring, dat liet hij over aan de fysici. Hij ontdekte echter ook dat als het heelal begon met een lage dichtheid, de ruimte van het heelal reageerde met een voortdurende uitdijning. Dit heelal noemde hij *een open heelal*. Aan het einde der tijden zou dit heelal tot een oneindig geheel uitgegroeid zijn.

Er was nu ook een tussenoplossing mogelijk. Dat was de situatie waarbij het heelal begon met een kritische materiedichtheid. De ruimte van het heelal zou ook hier gaan uitdijen maar na verloop van tijd eindigen bij een bepaalde omvang en deze oneindig lang vasthouden. Een dergelijk heelal staat vandaag bekend als *een vlak heelal*. Dit heelal-model is voor de moderne kosmologie van groot belang nu uit allerlei waarnemingen blijkt dat het heelal een vlak heelal is, dus een heelal met een kritische materiedichtheid. Het is mede van belang omdat we nu de samenstelling van deze kritische materiedichtheid kunnen 'voorspellen'. De hypothese is dat de materie van het heelal bestaat uit 5% gewone materie, 25% donkere materie en 70% donkere energie.

De ruimtetijd van de speciale en algemene relativiteitstheorie (zoals tot expressie komend in de Lorentztransformatie en in de veldvergelijkingen die horen bij een niet-Euclidische geometrie), deze in het denken van fysici en wiskundigen (te beginnen bij Einstein, Minkowski en Friedmann) uitgegroeide gedachteconstructie van de (gekromde) ruimtetijd, deze ruimtetijd is het die ons een beeld van de wereld laat zien waarin zelfs de kosmos haar ware gedaante toont. Maar het is voorsnog een gedaante waar we sterk aan moeten wennen. Want we worden nu geconfronteerd met allerlei soorten ruimtes, variërend van krimpende en krommende ruimtes tot uitdijende en instortende ruimtes. Met name die laatste soort kosmische ruimtes zijn heel bijzonder, want ze laten ons zien waaruit de ruimte van het heelal 'als geheel' feitelijk uit bestaat. Het gaat om de kosmische ruimte *tussen* de sterrenstelsels.

Het is alsof Minkowski met zijn begrip van ruimtetijd een doos van Pandora heeft geopend. Want de kosmische ruimte is samen met de kosmische tijd een fysische kracht van jewelste geworden. Ruimte en tijd vormen samen met materie en energie een gigantisch kosmisch systeem. Het is het wereldsysteem van Einstein. Het is een systeem met een ontzagwekkend creatieve kracht (de oerknal) en met een ontzagwekkend destructieve kracht (het zwarte gat). Ruimte en tijd bepalen mede de kracht van dit systeem. Ten eerste als een kosmische kracht zoals hiervoor beschreven in de heelal-modellen, maar ook als een lokale kracht (via de speciale theorie toegepast in bijvoorbeeld deeltjesversnellers) en als een gravitatiekracht (via de algemene theorie toegepast op planetenstelsels of zelfs hele melkwegstelsels). Het wereldsysteem van Einstein is wellicht het mooiste dat de fysica ooit heeft gezien.

Samenvatting

De inspiratie voor onze uiteenzetting over de geschiedenis van ruimte en tijd is het boek van Robert DiSalle 'Understanding space-time'. Hij laat daarin zien hoe de begrippen ruimte en tijd steeds in wisselwerking stonden met de behoefte van de fysicus om verschijnselen in de natuur 'begrijpelijk' te krijgen.

– Zo wilde Newton begrijpen hoe de planeten konden bewegen onder invloed van versnellende krachten. Hij ontwierp daartoe een absolute ruimte en tijd.

– Zo wilde Einstein begrijpen hoe uniforme bewegingen begrensd werden door een constante lichtsnelheid. Hij ontdekte dat ruimte en tijd relatief zijn.

– Zo ontwierp Minkowski een ruimtetijd waarin ruimte en tijd volledig verweven raakten met elkaar. Er ontstond een volstrekt nieuw interpretatiekader.

– Met Minkowski's ruimtetijd kon Einstein verklaren hoe versnelde bewegingen tot stand kwamen in een gravitatieveld. De ruimtetijd kreeg nu een kromming.

Zie hier in een notendop hoe de begrippen ruimte en tijd in de loop van de geschiedenis van de fysica alsmar vruchtbaarder werden om fysische verschijnselen te begrijpen, te verklaren en te voorspellen.

Fysici kunnen nu onbekende werelden gaan verkennen. Zij worden daarbij geholpen door wiskundigen. Wat ze vaak niet beseffen is de rol van de filosofie.

Einstein had op die rol gewezen, maar een nuchtere fysicus gelooft daar niet in.

Wetenschap is voor wetenschappers en filosofie voor filosofen. Toch is het de moeite waard om stil te staan bij de ontwikkeling die begrippen als ruimte en tijd hebben ondergaan. De rol van de filosofie in de fysica is heel subtiel. Fysici moeten vaak even wennen aan nieuwe inzichten.

– Toen Hubble de uitdijing van het heelal puur op basis van observatie had ontdekt, was het aan de theoretische fysici om opnieuw via ruimte en tijd een verklarend model op te stellen. Het duurde zeker 30 jaar voordat kosmologen zich konden vinden in een oerknal model dat tevens het ontstaan en de evolutie van ruimte en tijd omvatte.

Laten we dit nog wat meer in detail nalopen.

Allereerst een algemene opmerking over de begrippen ruimte en tijd. Deze begrippen hebben een bijzondere positie in de fysica, zowel wetenschappelijk als filosofisch gezien. Zoals al eerder opgemerkt, ruimte en tijd zijn zeker geen factoren waarmee fysische verschijnselen te verklaren zijn. Want dat zou betekenen dat we een helder beeld hebben van wat ruimte en tijd zijn. Maar dat is nu juist het probleem. We weten nauwelijks waar ruimte en tijd voor staan. Er is een aparte tak van de filosofie die zich bezig houdt met de vraag: wat is ruimte, wat is tijd? Maar juist deze vraag wordt op tal van wijzen beantwoord door de filosofen. En dus komen we daar niet verder mee.

DiSalle volgt een ander spoor in zijn boek. Het is eigenlijk niet zo van belang om te weten wat ruimte en tijd zijn en waarvoor ze staan. Veel interessanter is de

vraag hoe ruimte en tijd in de fysica worden gebruikt. En dan zien we iets opmerkelijks. We zien dan hoe in de geschiedenis van de fysica de begrippen ruimte en tijd een deels wetenschappelijke, deels filosofische ontwikkeling hebben doorgemaakt. Deze begrippen lenen zich voor *begripsontwikkeling*. Dat zegt al iets over de status van deze begrippen. Ze vormen eerder een deel van ons denken over de natuur dan dat ze een specifieke inhoudelijke betekenis hebben. Bij ruimte en tijd denken we in eerste instantie aan een meetlat waarmee we de ruimte opmeten en een klok waarmee we de tijd meten. In die zin zijn ruimte en tijd vooral praktische begrippen; ze verwijzen naar een manier van meten. Maar vanaf Newton worden ruimte en tijd ook gebruikt als theoretische begrippen. En dan gebeurt er iets opmerkelijks. Dan blijkt dat we deze begrippen kunnen gebruiken om verschijnselen in de kosmische natuur ‘begrijpelijk’ te krijgen. Ruimte en tijd gaan dan functioneren als een interpretatiekader, d.w.z. als een kader waarmee en waardoor we fysische verschijnselen kunnen gaan interpreteren. Aldus krijgen deze begrippen voor de fysica een filosofische functie. Ze hebben het vermogen om ons *denken* over de natuur te verhelderen en aan te scherpen. Met als resultaat dat er nieuwe inzichten en nieuwe theorieën kunnen ontstaan waarmee we allerlei verschijnselen beter gaan begrijpen en zelfs nieuwe verschijnselen kunnen voorspellen. Ruimte en tijd worden zo een faciliterend kader voor ons *begrip van de natuur*.

Filosofie heeft in het denken over ruimte en tijd vooral een motiverende rol. Filosofie kan fysici motiveren om creatief en innovatief te werk te gaan. Daartoe biedt zij *begripsontwikkeling*, *gedachte-constructie* en *interpretatiekader* aan als gereedschap.

– *Begripsontwikkeling* is de basis. We zien hoe de begrippen ruimte en tijd in de loop van de geschiedenis van de fysica kunnen veranderen. Bij Newton was er sprake van een absolute tijd en ruimte, bij Einstein werden ruimte en tijd relatief, bij Minkowski versmolten ze tot een nieuw begrip ruimtetijd, bij Einstein werd dit begrip vervolgens ontwikkeld tot gekromde ruimtetijd en bij de uitdijning van het heelal kregen ruimte en tijd weer een nieuwe betekenis.

– *Gedachte-constructie* is de uitwerking. Het gaat hier vooral om de bruikbaarheid van ruimte en tijd in wiskundige bewerkingen. Zo kon Newton ruimte en tijd toepassen als perfect gelijkmatige coördinaten, Einstein slaagde er in om ruimte en tijd via de Lorentz transformatie om te vormen tot relatieve grootheden, waarna Minkowski met behulp van niet-Euclidische meetkunde ruimte en tijd liet functioneren als een wereld van gebeurtenissen. Vandaag de dag worden ruimte en tijd onderworpen aan weer andersoortige bewerkingen. Het einde is nog niet in zicht.

– *Interpretatiekader* is de toets. *Begripsontwikkeling* en *gedachte-constructie* zijn op zich al de moeite waard om mee te werken. Maar uiteindelijk zal de fysicus moeten laten zien dat zijn werk ook vruchtbaar is voor de fysica. Uiteindelijk gaat het er om dat het inzicht in fysische verschijnselen er door verrijkt en

verhelderd wordt. Pas dan kunnen de begripsontwikkeling en gedachteconstructie als succesvol worden beschouwd.

Nemen we om te beginnen de theorie van Newton. In deze theorie gaan de begrippen van ruimte en tijd een extra rol spelen. Behalve dat ze een beschrijving geven van bewegingen door ruimte en tijd, gaan ze nu ook een ondersteunend deel uitmaken van de theorie waarmee Newton de wereld adequaat wil begrijpen. Ze krijgen een extra functie als interpretatiekader. Toen Newton nadacht over zijn bewegingswetten, had hij behoefte aan een basiswet waarmee hij twee soorten bewegingen kon onderscheiden: de uniforme beweging en de versnelde beweging. De basiswet werd de eerste bewegingswet, de wet die vastlegt wat een uniforme beweging is. Daartoe dienden de absolute ruimte en de absolute tijd als ondersteunende begrippen. Het ging hier niet om inhoudelijke vaststellingen, maar om bruikbare definities.

Het vaststellen van heldere definities is vooral een filosofische aangelegenheid. Het gaat om een conceptuele invulling die eerst en vooral het heldere inzicht dient. Wat moeten we verstaan onder ruimte en tijd *opdat* deze begrippen ons helpen om helder te kunnen denken over de natuur? Dat is nog niet zo simpel. Het vraagt van de fysicus dat hij terugkeert naar zijn basisbegrippen. Er zijn niet veel fysici die dat beheersen. Newton en Einstein zijn de weinige voorbeelden die ons laten zien hoe zo iets als begripsontwikkeling kan ‘werken’.

In het geval van Newton zien we hoe er een wisselwerking is tussen de eerste bewegingswet en de definities van ruimte en tijd. Wil de wet van uniforme krachten-vrije bewegingen enige nuttige toepassing krijgen, dan is het ‘bestaan’ van een universele ruimte en een universele tijd wel zo handig. En omgekeerd, willen de definities van ruimte en tijd enige betekenis krijgen, dan is het concept van een uniforme beweging wel zo belangrijk. Want daardoor worden ruimte en tijd ‘bestaanbaar’ als eenheden die zich gelijkmatig in alle richtingen doorzetten (de ruimte) of zich gelijkmatig in één richting ontwikkelen (de tijd).

Stappen we over naar de theorie van Einstein. De begrippen van ruimte en tijd gaan ook daar een extra rol spelen. Uiteraard blijven ze operationeel als meetinstrumenten. Maar nu functioneren ze in een theorie die wordt beheerst door twee postulaten: het relativiteitsbeginsel dat geldt voor uniforme bewegingen en het beginsel van de constante lichtsnelheid die in eerste instantie een nieuwe definitie oplevert van ‘gelijktijdigheid’. Het is deze definitie die de begrippen van ruimte en tijd op de proef stelt. Bestaat er wel zo iets als een gemeenschappelijke tijd? En bestaat er wel zo iets als een gemeenschappelijke ruimte? Dat was het probleem waar Einstein zich voor gesteld zag. Wilde hij kunnen werken met zijn twee postulaten, dan leek het nodig om kritisch te kijken naar de definities van ruimte en tijd zoals die door Newton waren opgesteld. Bovendien was Einstein erg gecharmeerd van de theorie die Maxwell had

opgesteld ten aanzien van elektromagnetische verschijnselen. Hoe was deze theorie in te passen in zijn postulaten-theorie?

Ook hier is het vaststellen van heldere definities een filosofische aangelegenheid. Het gaat om een conceptuele invulling die eerst en vooral het heldere inzicht dient. Wat moeten we verstaan onder ruimte en tijd *opdat* deze begrippen ons helpen om helder te kunnen denken over de natuur? Zoals gezegd, dat is nog niet zo simpel. Het vraagt van de fysicus dat hij terugkeert naar zijn basisbegrippen. Einstein doet dat door het begrip tijd aan een kritisch onderzoek te onderwerpen. Zijn definitie van gelijktijdigheid behelst een heldere bijdrage van het licht aan onze waarneming: *er is sprake van gelijktijdigheid wanneer het licht gelijke afstanden in gelijke tijden aflegt*. Let wel, het gaat hier om een definitie. Er wordt niet gezegd *dát* het licht gelijke afstanden in gelijke tijden aflegt. Er wordt enkel gezegd dat wanneer het licht dat doet, dat er dan sprake is van gelijktijdigheid. Hoe we het gelijktijdig zijn van gebeurtenissen moeten ‘begrijpen’ en toepassen, wordt hiermee vastgelegd.

Einstein’s definitie van gelijktijdigheid heeft enorme consequenties gehad. Het leidde hem naar de relativiteit van ruimte en tijd in uniform bewegende objecten. Uiteraard was Einstein’s opgave veel ingewikkelder. Nemen we zijn gedachte-experiment van perron en trein weer in gedachten, dan zien we dat hij werkte met twee referentiestelsels die hij bij elkaar wilde brengen. Hij wilde begrijpen hoe de twee waarnemers (de man op het perron en de man in de trein) dezelfde gebeurtenissen (de twee bliksemflitsen) anders konden waarnemen. De een zag ze gelijktijdig, de ander niet. Einstein schrijft over zijn opgave:

“Is er een relatie tussen plaats en tijd van de afzonderlijke gebeurtenissen ten opzicht van beide referentiestelsels denkbaar met de eigenschap dat *iedere lichtstraal* ten opzichte van het perron en ten opzichte van de trein zich voortplant met snelheid c ? Deze vraag leidt tot een zeer duidelijk bevestigend antwoord voor de ruimte-tijd-grootheden van een gebeurtenis bij *overgang* van het ene referentiestelsel naar het andere.”⁵⁰

Het moet gezegd, Einstein gebruikt hier een sterk geconcentreerde formulering van zijn opgave. Maar wie het citaat meerdere malen leest zal gaandeweg begrijpen waar het hem nu precies om ging. Hij zocht een transformatiewet die het mogelijk maakte dat wetten in het ene stelsel geldig bleven in het andere stelsel, zoals Galilei’s relativiteitsbeginsel eiste. Het ging hier in principe om uniform bewegende stelsels. En tegelijk wilde hij voldoen aan de eis van een constante lichtsnelheid. Want daarmee kwam tot uitdrukking dat gelijktijdigheid een relatief begrip was. Het resultaat is algemeen bekend; de transformatiewet bestaat uit een nieuw soort transformatie voor ruimte en tijd. De Galilei

50 Zie Einstein, *Relativiteit*, Aula Paperback 130, Het Spectrum 1988, pag. 26. Cursivering in citaat zijn mijnerzijds. Ook heb ik enige aanpassingen gemaakt. Referentiestelsel i.p.v. referentielichaam, en perron i.p.v. spoorbaan.

transformatie wordt ingeruild voor de Lorentz transformatie. Ruimte en tijd worden grootheden die kunnen krimpen en vertragen.

De oplettende lezer zal waarschijnlijk hebben opgemerkt dat we de benaderingen van Newton en Einstein hier vooral hebben beschreven met behulp van de twee filosofische gereedschappen begripsontwikkeling en gedachte-constructie. Maar wat leverden deze bewerkingstappen op? Wat was het uiteindelijk resultaat in de vorm van ruimte en tijd als interpretatiekader?

Newton ging met zijn basis materiaal – de eerste bewegingswet en de definities van ruimte en tijd – aan de slag om een wereldsysteem op te bouwen en daarmee de versnelde bewegingen van planeten, manen en kometen te verklaren en te voorspellen. (Zie par. 2.g.). Hij was daarmee zo succesvol dat zijn theorie (inclusief de definities van de begrippen ruimte en tijd) twee eeuwen lang als standaard gold voor al het natuurwetenschappelijk onderzoek. Zo werd de lichtsnelheid nog als relatief beschouwd tegen de achtergrond van een hypothetische ether.

Einstein had mindere vooruitzichten dan Newton toen hij zijn speciale relativiteitstheorie opstelde. Zijn nieuwe definities van ruimte en tijd en zijn gedachte-constructie via de Lorentz transformatie werden bij lange na niet gedeeld door zijn collega fysici. De theorie werd algemeen beschouwd als een speculatieve theorie, d.w.z. als een theorie die mogelijk zou kunnen dienen als een nuttig interpretatiekader, maar voorlopig nog niet.⁵¹ Het waren vooral toepassingen in de toekomst die de theorie al of niet zijn bruikbaarheid als fysische theorie zouden verlenen. Te noemen zijn in dit verband de uiterst succesvolle toepassing in deeltjesversnellers 20 tot 30 jaar later.

Zoals eerder opgemerkt, vandaag de dag worden ruimte en tijd onderworpen aan weer andersoortige bewerkingen. Het einde is nog lang niet in zicht. Maar het begin blijft een leerzaam gebeuren. Het is bijvoorbeeld fascinerend om te zien hoe de begrippen ruimte en tijd zich leenden voor de ontwikkeling van de zg. Minkowski ruimtetijd. Minkowski was een deskundige op het gebied van de niet-Euclidische wiskunde. Hij liet zien hoe de referentiestelsels waar Einstein mee had gewerkt, meetkundig in elkaar pasten. Daarbij ontdekte hij een nieuwe geometrie, de geometrie van de ruimtetijd. Het ging hier duidelijk om een gedachte-constructie.

De ruimtetijd was een logisch gevolg van de speciale theorie van Einstein. De relativistische effecten die Einstein had ontdekt werden nu verklaard vanuit een bijzondere samenhang tussen ruimte en tijd. Minkowski introduceerde het nieuwe begrip ‘ruimtetijd’, een begrip dat de fysica ingrijpend zou gaan beïnvloeden. Maar wat moesten we dan verstaan onder dat begrip ruimtetijd? Het ging Minkowski om een nieuwe wereld die door de samenhang van ruimte

⁵¹ Einstein heeft nooit de Nobelprijs gekregen voor zijn speciale noch voor zijn algemene relativiteitstheorie. Dat is een teken aan de wand.

en tijd werd gecreëerd, *de wereld van gebeurtenissen*. Het begrip ‘gebeurtenis’ kwam centraal te staan, een begrip dat tot dan toe aan de inzichten van fysici was ontsnapt. Het is een merkwaardig maar ook een vruchtbaar begrip. Minkowski introduceerde een nieuw interpretatiekader passend bij de gedachte-constructie die hij had uitgewerkt via een niet-Euclidische ruimtetijd geometrie. In zijn visie is de bestudering van verschijnselen in de natuur niet gebaat bij een aparte ruimte en een aparte tijd. Het gaat er om dat fysici een diepere dimensie onder ruimte en tijd gaan verkennen. Dit is duidelijk een gewaagde visie, maar Minkowski had wel een punt. Ruimte en tijd lenen zich voor wiskundige gedachte-constructies. Dat is het bijzondere aan deze begrippen. Dat is ook waarom filosofische benaderingen vruchtbaar kunnen zijn. Ze kunnen de fysicus ondersteunen in nieuwe ideeën en gedachte-constructies die mogelijk leiden tot succesvolle interpretatiekaders.

Deze samenvatting afsluitend kunnen we stellen, dat het vooral Minkowski’s begrip van ruimtetijd is geweest dat het denken over ruimte en tijd in een stroomversnelling heeft gebracht. Terugkijkend in onze beschouwing is dan ook veel aandacht besteed aan dit nieuwe begrip ‘ruimtetijd’. Het is ontstaan uit de begrippen ruimte en tijd, maar heeft gaandeweg een steeds belangrijker rol gekregen in de ontwikkeling van de moderne fysica. Voor de filosofie van ruimte en tijd is het een begrip dat de filosoof op nieuwe gedachten kan brengen. Gedachten waarmee de fysicus zijn voordeel zou kunnen doen.

Zoals Einstein eens heeft beweerd:

“Ruimte en tijd zijn modi van denken, geen condities waarin we leven”.

Zo kunnen we ook stellen:

“Ruimte en tijd zijn de omhulling van een diepere dimensie, die ons laat weten dat we de diepte van de wereld waarin we leven, nog lang niet kennen”.