

INHOUD

INLEIDING	7
DANKWOORD	8
1 MIKI, WAAR BEN JE?	9
Zoeken	9
Klokkijken	11
Alledaagse wonderen	12
2 DE EERSTE RELATIVITEITSTHEORIE	15
Klassieke mechanica	15
Natuurlijke beweging	16
Klassieke relativiteit	17
3 LOF VAN HUYGENS	19
Galilei en Huygens	19
4 RELATIVITEIT EN BOTSINGEN	24
Beweging is stilstand	24
Gelijke deeltjes	25
Dubbele deeltjes	27
5 DE SNELHEID VAN HET LICHT	32
Schieft je schaduw	32
Jupiter als klok	33

6	ABSOLUTE SNELHEID	37
	Vreemd licht	37
	Etherische proeven	38
	Invariante lichtsnelheid	40
	Huygens en licht	42
7	RELATIEVE TIJD	44
	Klokken en intuïtie	44
	Psychische hindernissen	45
	Een theoretische klok	47
	Tijddilatatie en maximumsnelheid	49
	Wat maakt het uit?	51
8	DÉ FORMULE	52
	Snappiknie kanniknie	52
	Licht in een doos	54
9	GOED OP WEG MET EINSTEIN	58
10	REIZEN DOOR HET HEELAL	60
	In de tweeëntwintigste eeuw	60
	REGISTER	64

INLEIDING

Over de relativiteitstheorie is ongelooflijk veel onzin in omloop. Van foute dooedoeners, zoals ‘Alles is relatief’, tot en met sprookjes waarin Einstein de relativiteitstheorie van zijn vrouw zou hebben gegapt. Alleen over leven en evolutie wordt nog meer kletsboek uitgekraamd. Dat is jammer, want de relativiteitstheorie is veel te mooi om te verknoeien.

In dit deel leg ik uit hoe die theorie wèl in elkaar zit. Om geen onzin te verkopen, heb ik het alleen over wat wij zeker weten – zo zeker als $2 \times 2 = 4$. Ik doe dat zo veel mogelijk in dagelijkse taal. Taal is niet altijd nauwkeurig genoeg, wat al blijkt als je niet 2×2 schrijft, maar: ‘twee maal twee’ zegt. ‘Ik wou dat de Zon scheen’ is kletsboek, je bedoelt: ‘Ik wou dat het niet bewolkt was’. Maar je zegt het toch, evenals: ‘De Zon gaat onder’ in plaats van: ‘De Aarde draait’. Om exact $2 \times 2 = 4$ neer te zetten, hebben wij de wiskunde uitgevonden. Dus leg ik in Deel 2 alles nog eens uit, maar dan met gebruik van wiskunde.

In het eerste deel komen aan de orde: relativiteit van ruimte en tijd; relativiteit van snelheid; verandering van snelheid, ofwel versnelling; traagheid en massa. Dan hebben we de enige echte relativiteitstheorie in beeld, beter bekend als *klassieke mechanica*. Vervolgens zijn we toe aan de grote omwenteling: het Heelal heeft ons een kool gestoofd, want er is wèl een absolute snelheid, namelijk de snelheid van het licht. Dus moet die mooie klassieke relativiteitstheorie op de helling om er een ‘absoluutheidstheorie’ van te maken, waarin het licht onder alle omstandigheden met dezelfde snelheid beweegt. En uitgerekend die

absoluutheidstheorie heeft men ‘relativiteitstheorie’ genoemd. Ten slotte twee van de meest opmerkelijke en beroemde gevolgen van de absoluutheid van de lichtsnelheid: de gelijkheid van massa en energie $E = mc^2$, en de relativiteit van gelijktijdigheid, beter bekend als de ‘tweelingparadox’.

Dankwoord

Een oeroud gezegde in de popularisatie luidt: bij iedere formule verlies je de helft van je lezers. Als dat waar was, zou er van dit boek nog niet één bladzijde verkocht zijn. Dank aan Bertram Mourits en uitgeverij Contact voor hun durf, en aan Jelle Ritzerveld voor het proeflezen van de tekst en de formules in kwestie. Vele lezers stuurden mij opmerkingen en voorstellen voor correcties; onder hen wil ik in het bijzonder H. van Haeringen bedanken.

De eerste aanzet tot dit manuscript werd geschreven tijdens een mini-sabbatical, dat wil zeggen zeven dagen werk in het prachtige huis van Hanneke Roelofsen en Jean-Jacques Maouche in Jorwert. Ik dank hen en Charlotte Lemmens, die niet alleen dit begin organiseerde, maar ook de voltooiing van het manuscript, en nog heel veel meer dat niet is te beschrijven in welke formule dan ook.

1. MIKI, WAAR BEN JE?

Zoeken

Een van Julia's favoriete boeken is *Miki, waar ben je?* Daarin verliest het meisje Asa haar zusje Miki even uit het oog, en Asa rent rond in een wilde zoektocht om het peutertje terug te vinden voordat er iets ergs gebeurt. Natuurlijk loopt het goed af, zodat Julia opgelucht kan ademhalen en haar pappa zich kan verwonderen over het gedrag van de ruimte. Immers, Miki is helemaal niet zoek, zij is waar zij is. Waar het om gaat is dat de afstand van Asa tot Miki zo groot is dat er een heleboel huizen, bomen en struiken tussen hen in staan.

Deze beschrijving is niet bedoeld als de manier van een natuurkundige vader om het boek van zijn dochtertje onnodig moeilijk te maken. De zigzagweg die Asa al hollend aflegt van



Fig. 1-1 Julia wordt voorgelezen uit het boek *Miki, waar ben je?*
(Foto Charlotte Lemmens)

haar huis naar de hoofdstraat, dan weer terug, en van daar naar de zandbak in het park, is geen spoor door ‘de ruimte’, maar een pad ten opzichte van alle dingen in haar omgeving. Kortom, haar *beweging is relatief*, niet absoluut.

Stel dat de vader van Asa en Miki eens en voor altijd wil weten waar zijn dochttertjes zijn, zodat niemand in de familie zich nodeloos ongerust hoeft te maken, dan zou hij zijn kinderen kunnen voorzien van een klein zendertje dat hun plaats in de ruimte bepaalt. Maar het Heelal staat dat niet toe. Het lijkt wel alsof een GPS-apparaatje iets dergelijks doet, maar dat is niet zo: het *Global Positioning System* meet slechts de relatieve positie ten opzichte van een zwerm satellieten die om de Aarde bewegen. Het toestel geeft door waar de ontvanger is *ten opzichte van* bepaalde, maar overigens willekeurige, merktekens op Aarde.

Deskundologen op onderwijsgebied toeteren steeds dat wij toch vooral moeten aanknopen bij de dagelijkse ervaring. Maar het voorbeeld van Miki en Asa laat zien hoe hopeloos dat is. Bijna iedereen heeft een intuïtief gevoel van plaats, een soort hierben-ik, dat heel absoluut lijkt. Ons Heelal heeft het anders bekokstoofd. Niks ‘hier’ of ‘daar’, maar: *er is geen absolute plaats in de ruimte*, positie is relatief. Let maar eens op als er naast jou een gesprek per mobieltje wordt gevoerd. De eerste vraag is altijd: ‘Waar ben je?’ Het antwoord is nooit, helemaal nooit: ‘Hier!’ maar altijd iets als: ‘In de trein’, of: ‘Bij de bakker’. Nu ja, nooit... ik heb Julia wel eens ‘Hier’ horen antwoorden, maar dat komt doordat zij nog zo jong is dat ze nog helemaal openstaat voor de wonderen van het Heelal. Wie antwoordt: ‘Op de fiets’, is allang opgehouden zich te verbazen over de relativiteit van verplaatsing.

Zo is ons Heelal ingericht: alle plaatsen zijn relatief, en aan helemaal niets kun je aflezen waar een voorwerp zich bevindt. De ruimte is geen ruitjespapier waarop het Heelal eens en voor altijd is getekend. Laat het vooral duidelijk zijn dat dit een ervaringsfeit is, geen logische noodzaak. Er is ons geen enkele reden

bekend waarom niet elk deeltje in ons Heelal een soort ingebouwd tellertje zou hebben waarop te zien is waar het zich bevindt. Asa's pappa zou misschien graag in zo'n heelal leven, maar ik hoef dat niet. Het is genoeg om te weten waar Julia is *ten opzichte van* razende auto's, diepe grachten en onopgevoede honden.

Klokkijken

Wie per mobieltje meldt: 'In de puree' in plaats van: 'Hier', heeft een van de basisregels van ons Heelal zo goed tot zich laten doordringen dat het niet eens meer opgemerkt wordt. Des te opmerkelijker is het dat, als je iemand vraagt: 'Weet u hoe laat het is?' je altijd iets te horen krijgt als: 'Het is acht minuten voor drie'. Let op het gebruik van het werkwoord 'zijn': het 'is' zus-en-zo laat, alsof de tijd iets absoluuts is. Maar dat is niet zo. Ons Heelal heeft het anders ingericht. Niks 'toen', 'nu' of 'straks', maar: *er is geen absoluut moment in de tijd*, elk tijdstip is relatief.

Zo is ons Heelal ingericht: aan helemaal niets kun je aflezen hoe laat het op een bepaalde plaats is. De tijd is geen onzichtbare filmstrook waarop het Heelal plaatje voor plaatje is afgebeeld. Evenals met de relativiteit van de ruimte is dit een ervaringsfeit, geen logische noodzaak. Er is ons geen enkele reden bekend waarom niet elk deeltje in ons Heelal een soort ingebouwd tellertje zou hebben waarop staat hoe laat het is.

Grappig genoeg hebben de meeste mensen over het verschijnsel tijd meer vragen en verwondering dan over ruimte. Misschien komt het doordat wij zo sterk zijn ingesteld op het gebruik van onze ogen dat wij ruimte vanaf onze geboorte natuurlijk en gewoon vinden. Wij hebben geen zintuig voor tijd. Ons geheugen helpt wel een beetje, maar dat kan zeer bedrieglijk zijn. Dus denken mensen wel te weten wat ruimte is, maar over tijd vraagt men: wat is het eigenlijk?

In de natuurkunde gebruiken wij de toevoeging 'eigenlijk'

nooit, want een vraag waarin dat woord voorkomt is niet te beantwoorden. Wat we wel doen, is vragen: wat doet het? Verwacht dus geen vraag als: ‘Wat is een electron eigenlijk’, zelfs niet: ‘Wat is een electron’. Wel proberen wij antwoord te geven op vragen als: ‘Wat doet een electron?’ We verwachten hoogstens een gedeeltelijk antwoord op zo’n vraag, want de kans is erg klein dat je alle eigenschappen van een natuurverschijnsel volledig in kaart kunt brengen.

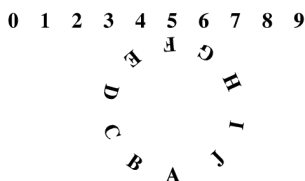


Fig. 1-2 Beweging van twee deeltjes, weergegeven door de plaats van het ene deeltje (0...9) en het andere (A...J) aan te tekenen op tien achtereenvolgende tijdstippen.

Alledaagse wonderen

In het geval van ruimte en tijd stellen we soortgelijke vragen: hoe gedragen zij zich? Wat zijn hun eigenschappen? In tegenstelling tot wat oude filosofen dachten, zijn die vragen niet op te lossen door alleen maar nadenken. Zoals de boer en de timmerman zal de natuurkundige de handen vuil moeten maken om iets tot stand te brengen. De resultaten zijn dan meestal verbluffend, en bijna altijd anders dan je naïeve ervaring lijkt te leren. Als je erover nadent, is de wereld van alledag helemaal niet zo alledaags. Alleen al het bepalen van plaats en tijd brengt je in aanraking met het principe van relativiteit! Klassieke mechanica is even wonderlijk als de speciale relativiteitstheorie.

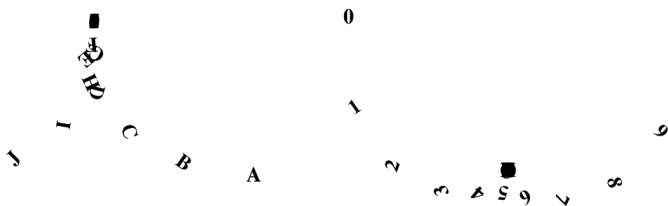


Fig. 1-3 De posities van deeltjes in ruimte en tijd zijn relatief. Deze twee figuren zijn identiek aan die in fig. 1-2, maar nu in relatieve vorm: links de baan van het 'letter'-deeltje zoals gezien vanaf het 'cijfer'-deeltje, rechts de baan van het cijferdeeltje zoals gezien vanaf het letterdeeltje.

Wegens de relativiteit van ruimte en tijd kun je bewegingen op oneindig veel manieren in kaart brengen, maar die zijn niet allemaal even handig. Wie wil, mag doen alsof de Zon rond de Aarde beweegt, anderen mogen gerust het omgekeerde denken. De eerste keuze, die van Ptolemaeus, geeft een kluwen van baanbewegingen; de tweede, van Copernicus, is veel overzichtelijker. Maar ook het copernicaanse beeld heeft moeilijke varianten: stel dat je ons zonnestelsel zou beschrijven vanaf de Zon, maar dan meebewegend met de draaiing van de Zon. Dat mag, want plaats en tijd zijn relatief, maar de banen van de planeten zouden er dan heel anders uitzien, bijvoorbeeld zoals in de rechterhelft van fig. 1-2.

Dit lijken allemaal spelletjes om het moeilijk te maken, maar dat is niet zo. Mensen hebben een onuitroeibare zucht naar het woord 'eigenlijk' (het was het eerste abstracte woord dat Julia gebruikte, nog voordat ze goed en wel twee jaar oud was). Er is flink wat oefening voor nodig om de dingen in het Heelal te zien 'ten-opzichte-van' = relatief, in plaats van 'zoals-ze-eigenlijk-zijn' = absoluut. Daarom begin ik met gewone dingen, zoals dagelijkse deeltjes in ruimte en tijd, voordat we aan Einsteins werk kunnen toekomen. Dus gaan we eerst kijken wat we met die relatieve ruimte en tijd kunnen doen. Het zal blijken dat die ruim-

te-tijd-relativiteit een reusachtige stap voorwaarts betekent. Een nog grotere stap is de relativiteit van de snelheid, zoals bedacht door Christiaan Huygens. Pas de laatste stap in dit boek is die van 'de' relativiteit van Albert Einstein, en uitgerekend die stap is gebaseerd op iets wat niks relatief is: de snelheid van het licht.

2. DE EERSTE RELATIVITEITS- THEORIE

Klassieke mechanica

Duizenden jaren lang hebben onderzoekers geprobeerd te begrijpen wat er om ons heen gebeurt. Na heel veel gissen en missen is ten slotte één vraag overgebleven die deze hele speurtocht samenvat in slechts vier woorden: *waar is wat wanneer?* Iets minder kort door de bocht luidt deze vraag: wat is de positie van een voorwerp in ruimte en tijd? Het antwoord wordt gegeven door een theorie van beweging die wij *klassieke mechanica* noemen. In de simpelste vorm van die theorie wordt een voorwerp vereenvoudigd door het te laten inkrimpen tot een punt dat een baan door de ruimte beschrijft in de loop van de tijd. Als er meer puntvoorwerpen zijn, onderscheiden zij zich door slechts één eigenschap, de *massa*.

Dat lijkt zo eenvoudig, maar pas op. De exacte wiskundige vorm van de klassieke mechanica werkt met een ideaalbeeld, een abstractie, die je in werkelijkheid nooit tegenkomt. Puntdeeltjes bestaan niet: echte voorwerpen zijn groot, en hebben dus meer eigenschappen dan alleen massa. Een echt voorwerp heeft een inwendige beweging, bijvoorbeeld draaiing (effectbal) en een inwendige samenstelling (hard, zacht, elastisch of taai). Bovendien hebben we in werkelijkheid altijd te maken met heel veel deeltjes tegelijk, waardoor de wetten van de mechanica nooit zonder meer zijn af te lezen uit wat we zien gebeuren.

Vooraf de aanwezigheid van talloos veel deeltjes staat ons begrip in de weg. In een gas, bijvoorbeeld de lucht die is opgesloten in een fietspomp, merken wij de gevolgen in de vorm van

luchtdruk en temperatuur. Bij vloeistoffen en vaste voorwerpen merken wij de botsingen tussen de deeltjes in de vorm van wrijving. Pas toen men ging kijken naar de planeten die rondom onze Zon bewegen kon men de mechanica in pure vorm zien, omdat de wrijving tussen een planeet en zijn omgeving in het bijna perfecte vacuüm van de ruimte verwaarloosbaar klein is. Daarom was de sterrenkunde zo'n drijvende kracht achter de schepping van de mechanica.

Natuurlijke beweging

Al in de Oudheid hadden grote denkers geprobeerd de beweging van voorwerpen in de natuur te verklaren door een beroep te doen op het 'volgen van de natuurlijke baan' en het 'zoeken naar de eigen plaats'. Wat is de natuurlijke beweging van een voorwerp? Men leek er een beweging mee te bedoelen die zichzelf in stand houdt – met andere woorden, een beweging die in dezelfde vorm eeuwig kan blijven doorgaan zonder dat een ingreep van buitenaf nodig is.

De enige algemeen aanvaarde 'natuurlijke beweging' van die tijd was de cirkelbeweging. Daar wordt soms een beetje lacherig over gedaan, maar zo onnozel was het helemaal niet, te denken dat een cirkelbeweging zichzelf eeuwig in stand kan houden. Galilei schrijft in zijn dialogen: 'Een cirkelbeweging is een beweging waarbij de punten in zichzelf overgaan'. Zo'n beweging zou eeuwig kunnen duren. Immers, bij een draaiing gaat de cirkel in zichzelf over, daar is het een cirkel voor. Er verandert dus eigenlijk niets.

Natuurlijk wist de wiskundige Galilei dat er andere meetkundige vormen zijn die je in henzelf kunt overvoeren, met name de rechte lijn. Maar hij schrijft: 'De rechte lijn kan onmogelijk een natuurlijke beweging zijn. Want het is wel juist dat er niets verandert als ik een rechte lijn langs zichzelf verplaats. Maar een rechte lijn is oneindig en wij weten dat het heelal niet

oneindig is. Dus kan een rechte lijn geen natuurlijke beweging zijn in ons heelal.’ Dat evenwel de cirkelbeweging geen natuurlijke beweging is, weet iedereen die wel eens een steen aan een touw heeft rondgeslingerd: als je het touw loslaat, blijft de steen geen rondjes draaien.

Klassieke relativiteit

Christiaan Huygens beroept zich niet op ‘natuurlijkheid’. Hij leidt een formule af voor de middelpuntvliedende kracht die je voelt bij het rondslingeren van een steen, een formule die wetenschappelijk exact is en eeuwig zal standhouden. Huygens bedenkt en gebruikt het begrip relativiteit. In plaats van te speculeren over de vraag: ‘wat is de ideale beweging?’ stelt hij een veel scherpere vraag, namelijk: *welke verandering kan ik in een mechanisch systeem aanbrengen zonder dat er aan de bewegingen iets verandert?*

Dit is de spil waarom de mechanica, en alle moderne fundamentele fysica, draait. Het is een vraag over de onveranderlijkheid van een mechanisch systeem. Hoe ideaal, hoe onveranderlijk zijn bewegingen? Is er een bepaald soort verandering die ik kan aanbrengen in een mechanisch systeem, zonder dat de bewegingen zelf veranderen? Als je het wat kortaf formuleert, klinkt het zelfs tegenstrijdig: kan ik iets veranderen zonder dat er iets verandert?

Een dergelijke eigenschap noemen wij *invariantie*, *symmetrie* of *relativiteit*. Invariantie wordt meestal gebruikt als we bedoelen dat een bepaald verschijnsel niet afhankelijk is van de schaalgrootte of de eenheid waarmee wordt gemeten. Het woord symmetrie komt te pas als we het hebben over een wetenschappelijke bewerking, zoals verschuiving of draaiing. Relativiteit wordt vooral gebruikt met betrekking tot veranderingen van de snelheid.

Omdat moderne theorieën over de wisselwerking tussen

deeltjes sterk wiskundig van aard zijn, gebruiken wij meestal het woord 'symmetrie', maar hier volg ik Huygens en gebruik zijn term 'relativiteit'. Hij ziet beweging niet als absoluut, maar als relatief, en schrijft: *'Motus inter corpora relativus tantum est'*.

Het woord *tantum* wordt er in slordige citaten wel eens uitgelaten, maar is buitengewoon belangrijk voor een fysicus. De onderlinge beweging van voorwerpen is 'tantum', *in alle opzichten*, relatief. Wij zullen straks zien hoe het probleem van de 'natuurlijke' of 'ideale' beweging kan worden opgelost in deze klassieke relativiteitstheorie.

Het opmerkelijke is dus dat Huygens, staande aan de wieg van de klassieke mechanica, van meet af aan een symmetrie-principe hanteert. In een brief van 10 augustus 1669 aan H. Oldenburg schrijft hij:

...volgens mij kunnen beweging en rust slechts betrekkelijk zijn, en hetzelfde voorwerp waarvan sommigen zeggen dat het in rust is, kan gezegd worden te bewegen ten opzichte van andere voorwerpen, en aldus is de ene beweging niet meer werkelijk dan de andere.

In die tijd was dit heel bijzonder, omdat hij erin slaagde om op grond van dit postulaat een hele mechanica op te bouwen. Verderop schrijft Huygens: 'Of lichamen stilstaan of bewegen is niet vast te stellen, tenzij ten opzichte van elkaar'. Dus alleen als de afstanden tussen lichamen in een mechanisch systeem onderling veranderen, kun je zeggen dat zij bewegen. Huygens hamert dat er drie zinnen verderop nog eens in: wij hoeven niet na te gaan of iets in het Heelal nu 'eigenlijk' stilstaat of niet. Niet omdat je te onnozel bent om zo'n meting te bedenken, maar omdat de natuur dat eenvoudig niet toestaat. Wie aan een voorwerp zelf wil aflezen waar het is en hoe snel het gaat, moet maar in een ander heelal gaan wonen.