

De sublieme eenvoud van relativiteit

Een visuele inleiding

Waar ik in het leven aan hecht is niet zozeer kwantiteit als wel kwaliteit, net zoals in de natuur de algemene principes een hogere realiteit tot uitdrukking brengen dan het afzonderlijke object.

Albert Einstein



DE SUBLIEME EENVOUD VAN RELATIVITEIT

Een visuele inleiding

Sander Bais

AMSTERDAM UNIVERSITY PRESS



Amsterdam
University
Press

Dankwoord

Tweede druk: 2007

Derde druk: 2007

Vierde druk: 2016

Ontwerp omslag en binnenwerk:
Gijs Mathijs Ontwerpers, Amsterdam

Vertaling: Anne Löhnberg, Amsterdam

ISBN 978 94 6298 278 9

ISBN 978 90 4851 001 6 (pdf)

NUR 910 / 925

© Sander Bais / Amsterdam University Press B.V., 2016

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

Graag wil ik het Yukawa-instituut voor theoretische fysica van de Universiteit van Kyoto in Japan bedanken voor inspiratie en gastvrijheid tijdens het schrijven van delen van dit boek; Jan Bais, Bernd Schroers, Joost Slingerland en Jan Pieter van der Schaar wil ik bedanken voor hun scherpzinnig commentaar en advies, en Gerard 't Hooft voor zijn voorwoord. Gijs Klunder ben ik dank verschuldigd voor de inspirerende vormgeving en Laura van der Noort voor haar hulp bij de uitvoering. Ook dank aan Anne Löhnberg voor de vertaalslagen en aan iedereen bij AUP voor hun begeleiding en geduld bij de totstandkoming van dit boek.

Sander Bais



Amsterdam
University
Press

Voorwoord

door Gerard 't Hooft

Geen intellectuele held spreekt meer tot onze verbeelding dan Albert Einstein met zijn speciale en algemene relativiteitstheorie. Deze magistrale constructies van de menselijke geest inspireren niet alleen natuurkundigen, maar spreken ook studenten en het grote publiek aan. Einsteins vernuft en ideeënrijkdom bezorgden hem al tijdens zijn leven zo'n legendarische reputatie dat hijzelf ooit uitriep: 'Ja zeg, ik ben geen Einstein...!' Een bijkomstigheid van deze roem is dat wij natuurkundigen ook tegenwoordig nog regelmatig brieven krijgen van mensen die het beter denken te weten dan Einstein en zijn theorieën willen 'verbeteren' of 'weerleggen'.

Maar zo werkt de wetenschap niet. Wij vervangen theorieën niet zomaar, we bouwen erop voort. Een cruciaal aspect van de natuurwetenschappen is daarbij dat we de zaken steeds verder vereenvoudigen. Wat er ooit ingewikkeld uitzag, is nu simpel en duidelijk. Zo is het ook gegaan met de speciale relativiteitstheorie. In zekere zin gaat het daar gewoon om meetkunde. De euclidische meetkunde van driehoeken, bollen en kegels is niet moeilijk om je voor te stellen, en die leren we dan ook op de middelbare school. Eigenlijk is de speciale relativiteitstheorie weinig meer dan de meetkunde van ruimte en tijd. Voeg wat klokken toe aan de euclidische meetkunde, en je bent er. Nou ja, niet helemaal, omdat er iets gekks aan de hand is met lichtstralen waardoor de meetkunde van de ruimtetijd ondanks haar eenvoud toch sterk tegen onze intuïtie in gaat. Daardoor is er wat meer oefening nodig om er vertrouwd mee te raken.

In veel populair-wetenschappelijke werken over de speciale relativiteitstheorie worden woorden gebruikt in plaats van diagrammen en formules. Je zou denken dat het daar makkelijker van wordt: mensen die niet gewend zijn aan wiskunde of geometrie vinden gewone tekst makkelijker dan vergelijkingen.

Toch klopt dat niet helemaal. Als de diagrammen en vergelijkingen worden weggelaten, wordt het verhaal over de relativiteitstheorie juist ingewikkelder. Daarom kwam Sander Bais op het lovenswaardige idee om juist veel meetkundige figuren te gebruiken bij zijn uitleg aan de geïnteresseerde leek, de student en het grote publiek. Dat resulteerde in dit prachtige boekwerk.

Als u eenmaal doorheeft hoe u de figuren moet lezen, wordt de speciale relativiteitstheorie glashelder in al haar schoonheid. In één oogopslag wordt duidelijk dat deze theorie niet op verbetering of weerlegging ligt te wachten. Ze is net zo nuttig als de euclidische meetkunde was voor de oude Grieken, en allebei zijn ze dat tot op de dag van vandaag gebleven. De speciale relativiteitstheorie in plaatjes. Als u ooit plezier heeft gehad in het spelen met driehoeken, bollen en kubussen, kunt u niet anders dan enthousiast worden over wat hier voor u ligt.

Voor mijn kinderen, mijn vader en Vera

Inhoud

10 Inleiding

1 Uitgangspunten

- 12 Ruimte + tijd = ruimtetijd
- 14 Gebeurtenissen
- 16 De schaal der veranderingen
- 19 *Meting van de lichtsnelheid*
- 20 Wereldlijnen
- 22 De postulaten

2 De relativiteit van gelijktijdigheid

- 26 Referentiekaders
- 28 Het gelijkzetten van klokken
- 30 Bewegende stelsels
- 32 Gelijktijdigheid is relatief
- 34 Eén ruimtetijd, vele inertiaalstelsels
- 36 Wat is er veranderd?

3 Oorzaak en gevolg

- 38 Causaliteit in de problemen?
- 40 Snelheden optellen volgens Newton
- 42 Snelheden optellen volgens Einstein
- 45 *Einsteins levensloop tot en met het 'wonderjaar' 1905*
- 46 Een magistrale formule
- 50 Causaliteit gered

4 Rek en krimp

- 52 Kunt u mij vertellen hoe laat het is?
- 54 Tijdsuittrekking
- 58 Het dopplereffect
- 60 De tweelingparadox
- 64 Lorentz-transformaties
- 70 Past de ladder in de schuur?
- 73 *Einstein als persoon*

5 Een meetkundig intermezzo

- 74 Het ruimtetijdinterval
- 78 Cirkels en hyperbolen
- 80 Hoe teken je een hyperbool?
- 82 Stoeien met vectoren

6 Energie en impuls

- 84 Een bewegend deeltje
- 90 $E = mc^2$
- 93 *Fusie en splijting*

7 De behoudswetten

- 94 Totale impuls
- 98 Impuls in een bewegend stelsel
- 100 Behoud van energie en impuls
- 106 Grote deeltjesversnellers
- 107 Tachyonen

8 Voorbij de speciale relativiteitstheorie

- 108 Spanningen die leiden tot een breuk
- 110 Een versnelde waarnemer met horizon

114 **Nawoord**

117 **Literatuur**

118 **Register**



Inleiding

Nee, niet nóg een boek over de speciale relativiteitstheorie! Loopt mijn klok misschien achter? We hebben nog maar net gevierd dat Einstein ruim honderd jaar geleden, in het *Wunderjahr* 1905, als jonge man de gehele natuurkunde in rep en roer bracht. Het gaat om inzicht en de weg daar naartoe. De wijze onderscheidt zich van de bolleboos, niet door op alle vragen het antwoord te weten, maar door in elke situatie de juiste vragen te stellen. De speciale relativiteitstheorie is uniek, doordat die in belangrijke mate voortkomt uit het steeds weer stellen van de juiste vragen. Het blijft van belang de boodschap ervan in steeds andere vormen voor het voetlicht te brengen. Het gaat per slot om de essentie van twee van de meest invloedrijke artikelen uit de hele natuurkunde, die ons fundamentele begrip van ruimte, tijd, massa en energie op zijn kop hebben gezet.

Om de lezer deelgenoot te maken van relativiteit in al zijn ‘sublieme eenvoud’, gebruik ik de taal van *ruimte-tijddiagrammen*. Deze aanschouwelijke aanpak biedt lezers met een basale kennis van natuur- en wiskunde – vooral meetkunde overigens – direct toegang tot deze zo tot de verbeelding sprekende theorie. Ik kies consequent voor beelden, omdat die meer zeggen dan reeksen formules, die bovendien lastiger te onthouden zijn. In die zin geldt ook bij het uitdragen van de harde wetenschap: ‘C’est le ton qui fait la musique.’ Het zal de lezer opvallen dat de diagrammen voortdurend prominent aanwezig zijn op de rechterpagina’s; op de linkerpagina’s wordt tekst en uitleg gegeven. In die zin heeft dit boek als het goed is meer weg van een gebruikersvriendelijke handleiding dan van een belerend betoog. Het doel is dat je als lezer zo vertrouwd raakt met deze manier van omgaan met de theorie dat het mogelijk wordt om zelf vragen te stellen en die vervolgens ook zelf te beantwoorden. Ook het verschil tussen de theorieën van Einstein en Newton is in de diagrammen duidelijk zichtbaar. Wat dit boek van de lezer vraagt, is vooral een speelse geest. Ik sluit niet uit dat er soms een klein zweetdruppeltje op je voorhoofd zal parelen, zoals dat je kan overkomen bij een puzzel die je net even niet kunt oplossen en die je juist daarom ook niet uit je hoofd kunt zetten.

We beginnen met een inleiding tot enkele basisbegrippen zoals ruimtetijd, wereldlijnen en inertiaalwaarnemers, uitmondend in de postulaten van de speciale relativiteitstheorie. Dan komen we al snel bij een aantal gelauwerde paradoxen, die draaien om begrippen als gelijktijdigheid, oorzakelijkheid, tijdsuitrekking en lengtecontractie en de notie van een maximale snelheid. In sprekende voorbeelden treedt het tegenintuïtieve karakter van de speciale relativiteitstheorie naar voren. Een meetkundig intermezzo is op zijn plaats, omdat de relativistische mechanica een zeer fraaie meetkundige interpretatie heeft. In de daaropvolgende hoofdstukken komen de begrippen impuls en energie aan bod, culminerend in de magistrale vergelijking $E = mc^2$, waarin de equivalentie van energie en massa in al haar verpletterende eenvoud tot uitdrukking komt.

We sluiten af met een kleine excursie naar versnelde waarnemers, die eigenlijk pas optreden in de tien jaar later voltooide algemene relativiteitstheorie van Einstein. In het nawoord plaatsen we de theorie door middel van een terugblik in het grotere kader van de natuurkundige ontwikkelingen van die tijd.

Ik hoop dat je aan het lezen van dit beeldverhaal net zo veel plezier zult beleven als ik heb gehad bij het in elkaar zetten ervan. Alle hoofdstukken beginnen als aanmoediging met een citaat van Einstein.

Sander Bais