

EINSTEINS GELIJK

Een abc van zwaartekrachtgolven

Govert Schilling

Dit boek is een uitgave van
Fontaine Uitgevers BV, Hilversum
www.fontaineuitgevers.nl

Omslagontwerp: Egbert Clement, Studio Jan de Boer
Vormgeving binnenwerk: Fontaine Uitgevers
Redactie: Liesbeth Kuitenbrouwer

© 2016 Govert Schilling/Fontaine Uitgevers BV

Derde druk, 2017

ISBN 978 90 5956 699 6
NUR 910

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, elektronisch databestand of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

Inhoud

Voorwoord	4
Golfles	6
Algemene relativiteitstheorie	12
Bewijs	17
Chirp	20
Detector	23
eLISA	26
Frequentie	30
GW ₁₅₀₉₁₄	33
Hulse-Taylorpulsar	36
Interferometrie	40
Jungle	43
Kosmische achtergrondstraling	46
LIGO	50
MOND	55
Neutronenster	58
Optische tegenhanger	62
Pulsar timing array	65
Quantumzwaartekracht	69
Ruimtetime	72
Superzwaar zwart gat	76
Toekomst	79
Universele zwaartekracht	83
Virgo	86
Weber	89
Zwart gat	92
Meer weten?	96

Voorwoord

Donderdag 11 februari 2016 was een grote dag voor de natuurkunde. Én een grote dag voor de astronomie.

Op twee drukbezochte persconferenties, in de Verenigde Staten en in Italië, maakten wetenschappers de ontdekking bekend van zwaartekrachtgolven – minuscule rimpelingen in de ruimtetijd waarvan het bestaan een eeuw geleden al was voorspeld door Albert Einstein.

Het nieuws werd terecht prominent gebracht op internet, op radio en tv, en in kranten en tijdschriften. Het kan haast niet anders of je hebt het ergens langs zien komen. Maar hoe moet je je die golven in de ruimtetijd precies voorstellen? Hoe zijn wetenschappers erin geslaagd ze te meten? En wat betekent de ontdekking voor onze kennis van het heelal?

Hoog tijd voor een nieuw abc-boekje, zoals ik ze eerder ook schreef over deeltjesfysica (naar aanleiding van de ontdekking van het Higgsdeeltje in 2012), over kosmische inslagen en over de oerknal. Dankzij het enthousiasme en de inzet van het team van Fontaine Uitgevers en de snelle medewerking van corrector, vormgever en drukker verschijnt de eerste druk van dit boekje minder dan een maand na de persconferentie van 11 februari.

Einsteins gelijk kun je gewoon van begin tot eind lezen, maar door de overzichtelijke abc-opzet kun je er ook naar hartenlust in grasduinen – misschien lees je liever eerst wat **ruimtetijd** is, of hoe de **LIGO**-detector werkt voordat je aan de a van **algemene relativiteitstheorie** begint. (Termen die een eigen 'hoofdstukje' hebben zijn in het boek **vet** gedrukt.) Ik raad je wel aan het inleidende hoofdstuk (pag. 6 t/m 11) als eerste te lezen. Achterin het boekje vind je nog een lijstje met websites en boeken die meer achtergrondinformatie bieden.

Enkele van de onderwerpen in *Einsteins gelijk* kwamen eerder al aan bod in *Oerknal. Een definitief abc van de kosmologie*. (Voor de q van **quantumzwaartekracht** heb ik zelfs een paar alinea's hergebruikt.) De twee boekjes vullen elkaar echter vooral aan.

Ik ben veel dank verschuldigd aan fysici Jo van den Brand en Chris Van den Broeck van het Nikhef-instituut in Amsterdam en aan astronoom Gijs Nelemans van de Radboud Universiteit in Nijmegen voor het kritisch doorlezen van het manuscript.

Govert Schilling
februari 2016

Golfles

Wetenschap is niet makkelijk. Of het nu gaat om neurologie, deeltjesfysica, paleontologie of sterrenkunde – om echt alle details te begrijpen moet je een universitaire studie volgen, of jarenlang met je neus in de boeken zitten. De wereld zit een stuk ingewikkelder in elkaar dan we soms zouden willen.

Maar wetenschap is wel fascinerend. Weinig dingen geven zoveel voldoening als begrijpen waarom de dingen zijn zoals ze zijn. Geen wonder dat de DWDD-colleges van eloquente hoogleraren als Robbert Dijkgraaf en Erik Scherder kijkcijferrecords breken. Geen wonder dat toegankelijk geschreven boeken over nieuwe wetenschappelijke inzichten zo populair zijn.

Ziehier het dilemma voor de niet-academicus, voor de gewone man en vrouw: je bent mateloos gefascineerd door de evolutie van het leven, de werking van de hersenen of de mysteries van het heelal, maar binnen de kortste keren loop je vast in een woud van ondoorgrondelijke abstracties, huiveringwekkend jargon en concepten die je voorstellingsvermogen ver te boven gaan.

Toen wetenschappers op 11 februari 2016 de ontdekking van zwaartekrachtgolven bekendmaakten,

was de reactie van het grote publiek dan ook volledig voorspelbaar: 'enorm interessant, maar ik begrijp er natuurlijk weer helemaal niets van'. Rimpelingen in de lege ruimte – hoe kan een gewone sterveling daar ooit chocola van maken?

In dit boekje – en vooral ook in dit inleidende hoofdstuk – wordt een poging gedaan om de wereld van de zwaartekrachtgolven inzichtelijk en toegankelijk te maken. Nee, als je het uit hebt ben je geen expert op het gebied van de relativiteitstheorie. En nee, dit boekje geeft geen antwoord op alle vragen over de raadselachtige rimpelingen in de ruimtetijd. Maar je maakt wel kennis met de belangrijkste basisideeën, en je zult zien dat het onderwerp uiteindelijk helemaal niet zo ingewikkeld is als het aanvankelijk leek – het is vooral een kwestie van wennen.

Zwaartekrachtgolven zijn onvoorstelbaar kleine trillingen in de driedimensionale lege ruimte. Om je daar een goede voorstelling van te maken, kijken we eerst eens naar een ééndimensionale 'ruimte' – een rechte lijn (denk aan een strakgespannen springtouw). Zo'n koord kun je natuurlijk laten golven door één uiteinde op en neer te bewegen, maar als je zwaartekrachtgolven wilt begrijpen, is dat een verkeerd beeld. Zwaartekrachtgolven zijn golven van (en in!) de ruimte zélf, dus bij een ééndimensionale 'ruimte' moeten we ons trillingen *in* die ene dimensie voorstellen.

Een springtouw is vaak enigszins rekbaar, als een stuk elastiek. Dat betekent dat het op de ene plaats een beetje uitgerekt kan worden, en op een andere plaats een beetje samengedrukt. De totale lengte van het touw of het elastiek verandert niet, en het blijft gewoon een ééndimensionale, kaarsrechte lijn. Maar er kan wel een trilling of een 'rimpeling' doorheen bewegen, *in de lengterichting van het touw*. Zo moet je je een zwaartekrachtgolf voorstellen in een ééndimensionale ruimte.

Voor een tweedimensionale ruimte (bijvoorbeeld een vel papier) geldt precies hetzelfde. Bij een zwaartekrachtgolf in een plat vlak moeten we niet denken aan een golvend vel ruitjespapier, ook al wordt het wel vaak op die manier uitgebeeld (ook op de omslag van dit boekje!). Nee, het gaat om een trilling *in* dat tweedimensionale platte vlak: op sommige plaatsen worden de ruitjes van het grafiekpapier een beetje uitgerekt, op andere plaatsen juist een beetje samengedrukt. Zo kunnen 'verdichtingen' en 'verduunningen' zich door het platte vlak voortplanten.

Nu begrijp je ook dat zwaartekrachtgolven in de *driedimensionale* ruimte eigenlijk niets te maken hebben met de moeilijk voorstelbare *kromming* van die lege ruimte. Ja, volgens Einstein kan de ruimtetijd ook gekromd zijn – als gevolg van de aanwezigheid van massa – maar daar gaat het hier niet om. In een 'normale', ongekromde driedimensionale ruimte kun-

nen zich 'verdichtingen' en 'verdunningen' voortplanten, waarbij die lege ruimte op de ene plek een beetje wordt uitgerekt, en op de andere plek juist een beetje wordt samengedrukt. Dát zijn zwaartekrachtgolven.

Misschien kun je de lege ruimte nog het best voorstellen als een transparante gelatinepudding. De gelatine is een beetje elastisch: als je een tik tegen de pudding geeft, ontstaat er een 'verdichtingsgolf' die zich door de gelatine voortplant. In feite komt de hele pudding in trilling. Hoe harder de tik, hoe sterker die trillingen.

Bij een heel grote pudding duurt het even voordat de trilling aan de overkant is aangekomen, en tegen die tijd is hij misschien ook al bijna 'uitgedoofd'. Zo is het met zwaartekrachtgolven in de lege ruimte ook: een krachtige golf die op anderhalf miljard lichtjaar afstand wordt opgewekt, heeft tijd nodig om op aarde aan te komen (anderhalf miljard jaar; zwaartekrachtgolven reizen met de lichtsnelheid), en eenmaal hier gearriveerd is hij nog maar nauwelijks meetbaar.

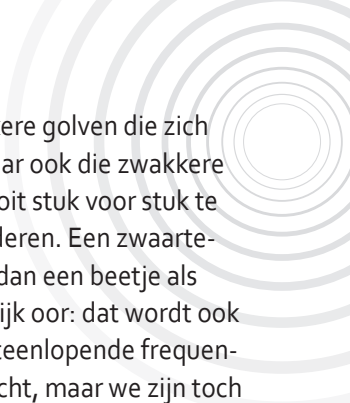
Om een passerende zwaartekrachtgolf te meten, moet je heel nauwkeurig de afstand tussen twee punten in de gaten houden. Als er zo'n 'Einsteingolf' voorbijkomt (in dit boekje gebruik ik deze onofficiële term af en toe als synoniem voor 'zwaartekrachtgolf'), zal die afstand een pieklein beetje variëren, soms wel honderden malen per seconde.

Met een liniaal werkt dat natuurlijk niet, hoe nauwkeurig die ook is. Aangezien de ruimte zélf wordt uitgerekt en samengedrukt, met alles wat zich daarin bevindt, varieert de lengte van een liniaal op precies dezelfde manier mee. Maar met een lichtstraal kun je de minuscule, snelle afstandsvariaties wél meten. Licht heeft namelijk altijd een constante snelheid, en als de af te leggen weg iets groter of kleiner wordt, heeft dat dus invloed op de reistijd van een lichtstraal.

Bij één harde tik tegen een gelatinepudding (of liever nog: bij een denkbeeldig explosietje ergens *in* die gelatinepudding) ontstaat er een mooi regelmatig patroon van concentrische trillingen die zich in alle richtingen uitbreiden. Maar wat als de pudding op talloze plaatsen en momenten en op allerlei verschillende manieren in trilling wordt gebracht? Dan is er sprake van één chaotisch lillende hoeveelheid gelatine. Weg regelmaat.

In het heelal is dat inderdaad het geval. Exploderende sterren, rondwentelende zwarte gaten, versmeltende neutronensterren – allemaal produceren ze hun eigen karakteristieke zwaartekrachtgolven, die met verschillende frequenties en intensiteiten kriskras door de lege driedimensionale ruimte bewegen. Hoe worden astronomen daar ooit nog wijs uit?

Bij een relatief krachtige Einsteingolf zoals die op 14 september 2015 voor het eerst werd gemeten, speelt dat probleem natuurlijk niet – die overstemt het



'geroezemoes' van talloze zwakkere golven die zich door het heelal voortplanten. Maar ook die zwakkere golven hopen sterrenkundigen ooit stuk voor stuk te kunnen onderscheiden en bestuderen. Een zwaarte-krachtgolfdetector functioneert dan een beetje als het trommelvlies van het menselijk oor: dat wordt ook voortdurend en met de meest uiteenlopende frequenties tegelijkertijd in trilling gebracht, maar we zijn toch heel goed in staat om verschillende geluiden en tonen afzonderlijk te registreren.

Zo ver is het nog niet. Voorlopig zijn wetenschappers heel blij met hun allereerste detectie. Maar inmiddels wordt er wel al hard gewerkt aan nieuwe, toekomstige instrumenten en technieken die nog veel meer kennis over het heelal moeten opleveren.

Na het lezen van dit inleidende hoofdstuk kom je hopelijk een beetje beslagen ten ijs, en vallen andere onderwerpen wat beter op hun plaats: de bronnen van kosmische zwaartekrachtgolven zoals zwarte gaten en neutronensterren; de detectietechnieken, zowel op de grond als in de ruimte; enkele moeilijk voorstelbare aspecten van Einsteins relativiteitstheorie, en natuurlijk de vraag naar de ware aard van de zwaartekracht.

Geen gemakkelijke stof. Maar wel uitermate fascinerend. En hopelijk na het lezen van *Einsteins gelijk* nét een tikje minder ondoorgroendelijk.

Algemene relativiteitstheorie

Dit verhaal had net zo goed bij de Z kunnen staan. De algemene relativiteitstheorie is namelijk een theorie over de zwaartekracht. Maar de Z is al in beslag genomen door **zwart gat**. En bovendien vormt de algemene relativiteitstheorie een prachtig begin van een boekje over zwaartekrachtgolven. Hun bestaan werd namelijk door deze theorie voorspeld, al honderd jaar geleden.

De relativiteitstheorie is het geesteskind van Albert Einstein (1879-1955). Einstein kennen we allemaal: wilde bos haar, grote snor, slobbertrui – het prototype van de verstrooide professor. Maar toen Einstein de relativiteitstheorie op papier zette, in 1905, was hij pas 26. Een keurig geklede en gekapte jongeman.

In die eerste versie van de relativiteitstheorie beschreef Einstein dat ruimte en tijd geen absolute grootheden zijn. Hoe ver liggen twee punten in de ruimte uit elkaar? Dat ligt er maar aan aan wie je dat vraagt. Vinden twee gebeurtenissen gelijktijdig plaats? Idem dito – het maakt nogal uit wie er op de klok kijkt. Afstanden en tijdsintervallen zijn niet *absoluut*, maar *relatief*: je moet er altijd bij zeggen *ten opzichte van wat*. Vandaar de naam 'relativiteitstheorie'.

Hoe kwam Einstein op dat ogenschijnlijk bizarre idee? Eind negentiende eeuw was er een experiment uitgevoerd om het bestaan aan te tonen van de ether – het hypothetische medium waarmee de lege ruimte gevuld zou zijn en waarin lichtgolven zich zouden voortplanten. Die ether werd nooit gevonden (tegenwoordig gelooft niemand meer in het bestaan ervan), maar het experiment liet wel zien dat de lichtsnelheid (299.792,458 kilometer per seconde) altijd gelijk is, of je als waarnemer nu met de lichtgolven mee beweegt of er tegenin.

Dat klinkt heel gek, en dat is het ook. Maar terwijl andere natuurkundigen erachter probeerden te komen waar de fout zat, nam Einstein het resultaat gewoon aan als voldongen feit. Stel dat de lichtsnelheid inderdaad altijd gelijk is, ongeacht de relatieve beweging van lichtbron en waarnemer, wat betekent dat dan? Die creatieve benadering leidde tot de relativiteitstheorie, met zijn relatieve afstanden en tijdsintervallen.

En er was meer: bij extreem hoge snelheden beginnen voorwerpen in de bewegingsrichting te krimpen en verstrijkt de tijd langzamer – althans, voor een waarnemer die zelf *niet* zo snel beweegt. Ruimte en tijd kun je niet meer als twee afzonderlijke grootheden zien, zoals we van nature gewend zijn; in plaats daarvan vormen ze samen één **ruimtetijd**-continuüm. En materie en energie blijken twee zijden van dezelfde medaille te zijn: ze kunnen in elkaar worden omgezet volgens Einsteins wereldberoemde formule $E = mc^2$.