

‘Een uiterst toegankelijk boek over een van de grote zoektochten van de wetenschap: het vaststellen en doorgronden van de bouwstenen van het heelal. Harry Cliff heeft een recept gevonden voor een licht verteerbare aanpak, en het resultaat leest ontzettend lekker weg.’

Graham Farmelo, auteur van *The Strangest Man* en *The Universe Speaks in Numbers*

‘Dit boek brengt de spanning van het onderzoek naar deeltjesfysica en de bouwstenen van het heelal echt tot leven [...] en treedt in de voetsporen van Feynman en Sagan. Ik zeg dit niet vaak over populair-wetenschappelijk werk, maar dit boek is echt een pageturner.’

Jim Al-Khalili, auteur van *Hoe leven ontstaat. Op het snijvlak van biologie en kwantumleer*

‘*I love this book.* Het bestrijkt een enorm terrein: van de geboorte van de moderne scheikunde tot de allernieuwste ideeën in de deeltjesfysica. Het is het beste boek in zijn soort dat ik heb gelezen. Briljant.’

Jeff Forshaw, co-auteur van de bestseller *The Quantum Universe* en *Why Does $E=mc^2$?*

‘[Dit boek] legt niet alleen uit wat we weten, maar ook hoe we erachter kwamen (en wat er nog te ontdekken valt). Het geeft een intrigerende blik op het leven van de denkers en de knutselaars die al die kennis stukje bij beetje bijeen hebben gebracht.’

Katie Mack, auteur van *Het einde van alles. Astrofysisch gesproken*

‘Cliff trekt lezers de verbazingwekkende en prachtige wereld van het atoom binnen. Een geweldig boek, soms net zo grappig als *The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy*. Dit is hét boek voor iedereen die enkele van ’s werelds belangrijkste wetenschappelijke vragen wil begrijpen.’

Kirkus (starred review)

‘Een avontuurlijke en verhelderende rondreis door het universum en de moderne natuurkunde. Cliff beschrijft complexe ideeën levendig en toegankelijk, en hij heeft de bijzondere gave om theorie spannend te maken.’

Publishers Weekly (starred review)

Harry Cliff

**Op zoek naar
het recept van het
universum**

**Van de oorsprong van
atomen tot de oerknal**

Vertaald door Rob de Ridder

Nieuw Amsterdam

Voor Vicky en Robert
Dank jullie wel

Oorspronkelijke titel *How to Make an Apple Pie from Scratch*

Oorspronkelijke uitgever Picador, Londen

© 2021 Harry Cliff

© 2021 Nederlandse vertaling Rob de Ridder / Uitgeverij Nieuw Amsterdam

Alle rechten voorbehouden

Omslagontwerp Nico Richter

Omslagbeeld © Shutterstock

Foto auteur © Marc Gascoigne

Illustraties © Mel Northover

NUR 910

ISBN 978 90 468 2733 8

www.nieuwamsterdam.nl



*Om te begrijpen hoe je een appeltaart bakt,
moet je eerst het heelal uitvinden.*

– Carl Sagan

Inhoud

	Voorwoord	9
1	Elementair koken	19
2	Het dunste plakje	29
3	De ingrediënten van atomen	47
4	Gespleten kernen	64
5	Thermonucleaire fornuizen	80
6	Sterrenstof	109
7	De ultieme kosmische oven	136
8	Hoe je een proton bereidt	155
9	Wat is nu eigenlijk een deeltje?	186
10	Het laatste ingrediënt	211
11	Het recept voor alles	242
12	De ontbrekende ingrediënten	271
13	Het heelal uitvinden	301
14	Het einde?	324
	Hoe bak je een appeltaart?	338
	Woord van dank	343
	Noten	347
	Bibliografie	351
	Register	353

Voorwoord

Op een koude ochtend in maart 2010 hield ik halt bij een omheind terrein aan de rand van het Franse plaatsje Ferney-Voltaire. Op een bord op de stalen toegangshekken stond:

CERN SITE 8

ACCÈS RÉSERVÉ AUX PERSONNES AUTORISÉES

Ik leunde onhandig over de passagiersstoel naast me door het raam van mijn auto met het stuur rechts en ging met mijn veiligheidsbadje langs de reader. De hekken bleven gesloten. Hm... was mijn verzoek om toegang toch niet ingewilligd? Ik merkte dat achter mij een rij auto's ontstond en veegde steeds woester langs de reader. Niets. Ik wilde net weggrijden om in mijn beste schoolfrans met de bewaker een gesprek aan te knopen toen tot mijn opluchting de hekken opengingen.

Ik parkeerde achter de grote hal voor proefnemingen, recht voor het gaashekwerk dat de grens aangeeft met de start- en landingsbaan van het vliegveld van Genève. Buiten de auto blies ik een wolkje de koude lucht in, die de inmiddels bekende weeë zoete geur had van een parfumfabriek in de nabijgelegen Zwitserse stad Meyrin. Met mijn handen diep in mijn jaszakken liep ik naar het gebouw met de prozaïsche naam Building 3894, een tijdelijk verdiepingloos bouwwerk waar de ochtendvergaderingen over de run werden gehouden.

Binnen hadden de meeste deelnemers zich al verzameld rond de lange tafel en wachtten tot de vergadering zou beginnen. Sommigen babbelden wat met anderen in het Engels, Frans, Duits of Italiaans, anderen dronken koffie of zaten over hun laptop gebogen. Ik nam plaats op mijn stoel in de rij achter de stoelen aan de tafel, in de hoop dat mij niet zou worden gevraagd iets te zeggen.

Een honderd meter onder ons werd in een betonnen tunnel die zo lang is dat hij een hele stad zou kunnen omsluiten, de grootste en krachtigste machine ter wereld tot leven gebracht: de Large Hadron Collider (LHC). Over nog maar een paar dagen zal de ringvormige deeltjesversneller subatomaire deeltjes op elkaar laten botsen met zo'n ongelooflijk geweld, dat er heel even omstandigheden ontstaan zoals die heersten in het eerste moment na de oerknal.

Deze kleine botsingen moesten worden opgevangen door vier reusachtige deeltjesdetectoren, die op enkele kilometers van elkaar in gigantische ondergrondse grotten stonden opgesteld rondom de LHC-ring. Een van deze detectoren bevond zich recht onder ons, de Large Hadron Collider *beauty experiment* of LHCB: 600 ton staal, ijzer, aluminium, silicium en glasvezelkabel, gereed als een sprinter in de startblokken, in afwachting van het schot.

Er was lang op gewacht. Sommige van mijn collega's hadden hun hele carrière toegewerkt naar dit moment. Twintig jaar planning, financieringsvoorstellen, uiterst nauwkeurig ontwerpen, testen en bouwen hadden geresulteerd in een van de meest geavanceerde deeltjesversnellers die ooit zijn gebouwd. Over enkele dagen zou blijken of al dat werk de moeite waard was geweest, terwijl LHC-ingenieurs de voorbereidingen troffen om voor de allereerste keer in de tunnel deeltjes op elkaar te laten botsen.

Ik was vierentwintig jaar oud en tweedejaars promotiestudent, en ik was enkele weken eerder in Genève aangekomen voor de eerste van twee periodes van drie maanden, die ik er zou doorbrengen. Mijn nieuwe thuis was CERN, de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, de Europese Raad voor Kernonderzoek, het grootste en meest geavanceerde lab op het gebied van deeltjesfysica ter wereld. De afgelopen paar weken had ik geleidelijk geleerd mijn weg te vinden in het doolhof aan kantoorgebouwen, werkplaatsen en laboratoria waar het uitgestrekte CERN-terrein vol mee staat, had ik februarisneeuwstormen getrotseerd en ontdekt dat het doortrekken van je wc na tien uur 's avonds je op een bestraffend praatje van je burens komt te staan. Verder raakte ik gewend aan mijn werkzaamheden aan de LHCB, ook aan de verantwoordelijkheid voor een van de talloze subsystemen, die stuk voor stuk foutloos moesten functioneren. Faalde er een, dan konden de zo lang verwachte data weleens onbruikbaar blijken.

De eerste keer dat ik de LHCB daadwerkelijk zag, was anderhalf jaar daarvoor geweest. Mijn supervisor Uli, een Duitse postdoctoraal onder-

zoeker die fulltime bij CERN was gestationeerd, had me door de complexe reeks procedures geleid waar ik doorheen moest om toegang te krijgen tot de detector. Ik kreeg een badge opgespeld die mijn blootstelling aan straling tijdens mijn verblijf onder de grond moest monitoren, maar moest eerst een nogal humeurige irisscanner zien over te halen om me door een serie felgroene, luchtsluisachtige veiligheidsdeuren te laten. Daarna daalde een ijzeren lift schokkend tot 105 meter onder het aardoppervlak af in wat dreigend ‘de kuil’ wordt genoemd.

Achter de liftdeur lag een vreemde, onderaardse wereld van zoemende apparaten, ijzeren stellingen geschilderd in primaire kleuren, en betonnen tunnels vol kilometers kabels en buizen. Nog een serie veiligheidsdeuren, felgeel dit keer en voorzien van waarschuwingstekens voor straling, en dan een smalle doorgang die door een 12 meter dikke beschermingsmuur loopt voordat hij onverwacht eindigt in een hoge betonnen grot.

Het eerste wat opvalt is de enorme omvang. De LHCb is groot: 10 meter hoog en 21 meter lang, en vult daarmee de hele breedte van de grot. In eerste instantie is moeilijk uit te maken wat je nu eigenlijk ziet; waar je naar kijkt, wordt gedomineerd door groen en geel geschilderde trappen, stalen steigers en platforms. Op de laatste staan de gevoelige elementen van de detector, die grotendeels aan het zicht zijn onttrokken. Langs de wanden van de grot loopt een enorme massa kabels waardoor stroom naar de detector gaat en waarlangs de stortvloed aan data wordt afgevoerd, die wordt geproduceerd door miljoenen minutieuze, met grote precisie in elkaar gezette sensoren. De LHCb is in staat de route te berekenen van duizenden afzonderlijke subatomaire deeltjes, die worden losgeslagen tijdens de botsingen die plaatsvinden met een snelheid van een fractie onder die van het licht, met een nauwkeurigheid van enkele duizendsten van een millimeter. En de LHCb kan dit een miljoen keer per seconde doen.

Maar het opmerkelijkste van de LHCb is misschien wel de manier waarop hij is gebouwd. Net als de drie andere grote LHC-experimenten is het een hedendaagse toren van Babel: ieder onderdeel is ontworpen en samengesteld door een internationaal team van natuurkundigen en ingenieurs, die werkzaam zijn aan een van de tientallen deelnemende universiteiten verspreid over de aarde, van Rio de Janeiro tot Novosibirsk. Samengebracht in dit reusachtige hol in de grond net buiten Genève vormen ze een enkel, dui-

zelmakend ingewikkeld instrument. Het feit dat zelfs maar iets hiervan werkt, komt op mij nog steeds over als een wonder.

Mijn collega's in Cambridge hadden het voorgaande decennium besteed aan het ontwerpen, bouwen en testen van de elektronica die de data moest uitlezen van de subdetector, die de taak heeft verschillende soorten deeltjes van elkaar te onderscheiden. Mijn bescheiden aandeel hierin was ervoor te zorgen dat de software die gebruikt ging worden om de elektronica te controleren en te monitoren, probleemloos en zonder elders problemen te veroorzaken werkte als het grote moment daar was. Ik was maar een klein radertje in een enorme machine, maar toch was ik me er zeer van bewust dat het succes van een onderneming die twee decennia van inspanningen door honderden natuurkundigen had gevergd en een investering van 65 miljoen euro door meer dan een tiental nationale financieringsinstellingen, afhankelijk was van of ik mijn taakje correct uitvoerde of niet. Ik wilde niet degenen zijn die op het laatste moment de hele zaak in de soep liet lopen.

Aan het gebabbel in het vertrek kwam een einde toen de *run chief* de vergadering tot de orde riep. Ik keek naar mijn collega's in het vertrek, van wie er velen uitzagen alsof ze de afgelopen dagen niet veel hadden geslapen en was me ervan bewust dat dit weleens het begin kon zijn van de belangrijkste fase in mijn carrière tot nu toe. Het eerste onderwerp betrof een gedetailleerd verslag van het werk dat die nacht was gedaan aan de LHC, die door de mensen van CERN gewoonlijk 'de Machine' werd genoemd. Het was deze machine waarop we nu allemaal zaten te wachten.

De LHC, waar al drie decennia aan wordt gewerkt, is een wetenschappelijk project van ongekende schaal. Bijna alles eraan is extreem. Het is het grootste wetenschappelijke instrument dat ooit is gemaakt en volgens sommige berekeningen zelfs het grootste apparaat dat ooit is gebouwd: het heeft een cirkelomtrek van 27 kilometer en passeert de Frans-Zwitserse grens niet minder dan vier keer (waar dit gebeurt, zijn de vlaggen van de landen op de wanden van de tunnel geschilderd). De stralingsbuizen waar de deeltjes doorheen gaan, zijn lichter dan de interstellaire ruimte, terwijl de duizenden supergeleidende magneten die de deeltjes door de ring sturen, werken bij de verbijsterend lage temperatuur van $-271,3$ graden Celsius, nog geen 2 graden boven het absolute nulpunt. Om dit te bereiken is de grootste cryogene voorziening gebouwd, die 10.000 ton vloeibaar stikstof gebruikt en net zoveel elektriciteit als een behoorlijk grote stad om 120 ton vloeibare helium te

produceren, dat dan in de magneten van de LHC wordt gepompt.¹ Binnen een paar dagen zou deze gigantische machine beginnen met het versnellen van de subatomaire deeltjes genaamd protonen tot 99,99996 procent van de lichtsnelheid, voordat ze bij vier punten, waaronder de LHCb, zodanig langs de ring worden gestuurd dat ze tegen elkaar botsen en er vormen van materie ontstaan die er nooit meer in grote hoeveelheden zijn geweest sinds een biljoenste seconde na het ontstaan van het heelal.

Dit alles, de jaren van ontwerpen en de onderhandelingen over de financiering, de mobilisering van een wereldwijde gemeenschap van duizenden natuurkundigen, de bouwkunde (waaronder het graven door een ondergrondse rivier die eerst bevroren moest worden met vloeibare stikstof), om het nog maar niet te hebben over het fabriceren, testen en installeren van miljoenen afzonderlijke onderdelen, van de 35 ton zware magneten tot de allerkleinste siliciumsensoren, diende maar één doel: nieuwsgierigheid bevredigen. Wat sommige tabloids je ook proberen te vertellen – zo blijft de Britse *Daily Express* maar suggereren dat CERN de LHC voor snode bedoelingen gebruikt, zoals het openen van een poort naar een andere, ‘sinistere’ dimensie² (misschien dat die toegang naar ‘het Ondersteboven’, zoals in de Netflix-serie *Stranger Things*, in werkelijkheid een fout van CERN was) of, mijn favoriet, om ‘God op te roepen’³ – de LHC bestaat alleen om antwoord te geven op fundamentele vragen over de meest fundamentele bouwstenen van onze wereld en hoe ons heelal is ontstaan.

En sommige van de vragen waar we antwoord op willen hebben, zijn echt grote vragen. Onze huidige theorie over waar de wereld vanaf het basisniveau uit bestaat, is bekend als het ‘standaardmodel’ van de deeltjesfysica – een misleidend saaie naam voor een van de grootste intellectuele prestaties van de mensheid. Het standaardmodel, dat gedurende tientallen jaren is ontwikkeld door de gecombineerde inspanningen van duizenden theoretische en experimentele natuurkundigen, zegt dat alles wat we om ons heen zien – sterrenstelsels, sterren, planeten en mensen – bestaat uit slechts enkele verschillende soorten deeltjes, die door een klein aantal fundamentele krachten bij elkaar worden gehouden in atomen en moleculen. Het is een theorie die alles verklaart, van hoe het komt dat de zon schijnt tot wat licht is en waarom iets massa heeft. Bovendien heeft het model iedere experimentele test doorstaan waaraan we het al bijna een halve eeuw hebben blootgesteld. Het is zonder meer

de succesvolste wetenschappelijke theorie die ooit is geformuleerd.

Dat gezegd hebbende weten we dat het standaardmodel fout is, of op zijn minst zeer onvolledig. Als het aankomt op de diepste mysteries waar de moderne natuurkunde voor staat, dan geeft het standaardmodel niet thuis of biedt het een heleboel contradicties in plaats van antwoorden. Kijk om te beginnen eens hiernaar. Na decennialang uiterst zorgvuldig naar de hemel te hebben gegluurd, zijn astronomen en kosmologen er behoorlijk van overtuigd dat 95 procent van het heelal bestaat uit twee onzichtbare substanties, ‘donkere energie’ en ‘donkere materie’. Wat ze ook zijn – en voor de duidelijkheid: we hebben eigenlijk geen idee – ze bestaan zeker niet uit enige van de deeltjes van het standaardmodel. En alsof het ontbreken van kennis over 95 procent van alles al niet erg genoeg was, doet het standaardmodel ook de nogal verbijsterende aanname dat alle bestaande materie weggevaagd had moeten worden in een allesvernietigende botsing met antimaterie tijdens de eerste microseconde, dat wil zeggen de eerste miljoenste seconde van de oerknal, waardoor een heelal zonder sterren, zonder planeten en zonder ons moest zijn ontstaan.

Het ligt dus nogal voor de hand dat we iets groots over het hoofd zien, hoogstwaarschijnlijk in de vorm van enkele nog onontdekte fundamentele deeltjes die kunnen helpen verklaren waarom het heelal is zoals het is.

Hier komt de Large Hadron Collider om de hoek kijken. Zoals we in maart 2010 om die vergadertafel zaten, heerste er onder ons een enorm optimisme dat we al gauw iets zouden kunnen waarnemen van iets geheel nieuws of onverwachts dat uit de botsingen die door de LHC geproduceerd werden tevoorschijn zou komen vliegen. Mocht dat gebeuren, dan zou dat het begin zijn van een proces dat zou kunnen helpen enkele van de grootste mysteries in de wetenschap te verklaren.

Toen ik begin 2008 aan mijn proefschrift begon, wist ik dat ik me begaf op het gebied van de deeltjesfysica terwijl de LHC net voor de eerste keer werd aangezet. Ik vond het idee geweldig spannend om te behoren bij de eerste studenten die data geproduceerd zagen worden door een machine die al sinds eind jaren zeventig in ontwikkeling was en die al meer dan 12 miljard euro had gekost.⁴ Op 10 september 2008, slechts enkele dagen voordat ik in mijn nieuwe lab in Cambridge aankwam, was de LHC in een storm van publiciteit gelanceerd. Onder het toezien oog van de wereldwijde media werden voor het eerst protonen door de 27 kilometer lange

ring gestuurd. Er knalden champagnekurken en natuurkundigen en ingenieurs bezongen een van de grootste wetenschappelijke prestaties in de geschiedenis, en de deeltjesfysica zorgde even voor krantenkoppen.

Enkele dagen later was de LHC opnieuw in het nieuws, maar om een heel andere reden. Rond het middaguur van 19 september gebeurde er tijdens de laatste testen van de elektromagneten in de versneller iets catastrofaals. Ingenieurs in het LHC Control Center, CERNs tegenhanger van NASA's Mission Control Center, keken vol ongeloof toe hoe scherm na scherm aan alle kanten van de enorme ruimte vlamvend rood kleurde. Een ingenieur die ik later sprak, vertelde me dat er in het begin zoveel alarmbellen afgingen dat ze dachten dat er iets aan de hand was met de software die gebruikt werd om de versneller in de gaten te houden. Uren later, toen ze eindelijk in de tunnel hadden kunnen afdalen, werden zij en haar collega's geconfronteerd met een enorme verwoesting.

Een enkele losse elektrische verbinding had een vlamboog veroorzaakt die het bad vloeibare helium, dat gebruikt werd om de magneten te koelen, had laten ontploffen, waardoor een schokgolf ontstond die een stroom van verwoestingen door een stuk van 750 meter van de versneller stuurde.⁵ Vijftien meter lange elektromagneten van wel 35 ton waren losgerukt en door de tunnel geslingerd. De losse verbinding zelf was verdampt, waardoor roet honderden meters ver in beide richtingen de ultraschone stralingspijpen in was geblazen.

Het herstel nam meer dan een jaar in beslag. Ondanks dit vroege verlies van vertrouwen herpakte de staf van ingenieurs zich gauw en ging aan het werk. Op 20 november 2009, veertien maanden en 25 miljoen euro later, stuurden de ingenieurs voorzichtig opnieuw protonen de LHC rond sinds wat nu eufemistisch 'het incident' wordt genoemd. Dat was echter slechts een proefrun geweest, waarbij de versneller maar een fractie van zijn maximale hoeveelheid energie toegevoerd had gekregen.

En nu, in maart 2010, kwamen we eindelijk bij het moment waarop de machine naar onbekend terrein zou worden gestuurd en een botsingsenergie moest bereiken die ons in staat zou stellen om op zoek te gaan naar donkere materie, het higgsboson, microscopische zwarte gaten en misschien nog andere exotische objecten, die niemand zich nog had kunnen voorstellen. Ik vermoed dat iedereen die die ochtend aan de vergadertafel zat het gewicht voelde van wat we op het punt stonden te gaan doen.

De run chief deed zijn verslag en pauzeerde af en toe als hij werd overstemd door het gebrul van een passagiersvliegtuig dat opsteeg vanaf de nabijgelegen startbaan. Afgezien van een korte stroomstoring was het werk aan de LHC die nacht vlot verlopen en we lagen op schema om binnen enkele dagen botsingen te kunnen zien. Daarna ging hij de tafel rond en gaven natuurkundigen uit Nederland, Spanje, Rusland, Duitsland en Italië in perfect Engels updates over de vorderingen van hun subsystemen. Er was een kort Eurovisie-moment toen de Franse natuurkundige zijn verslag in zijn moedertaal begon. Ondanks enkele blikken van andere aanwezigen ging hij stug door, niet helemaal ongerechtvaardigd aangezien Frans een van de twee officiële talen van CERN is, en bovendien zaten we in Frankrijk. Maar bijna alle vergaderingen bij CERN worden in het Engels gehouden en mijn Frans was niet opgewassen tegen de taak van het volgen van, wat ik aannam, een technische discussie was over bepaalde aspecten van het experiment.

Mijn hart ging sneller kloppen toen mijn beurt naderde. We hadden een paar dagen eerder een klein probleem gehad met de software die de elektronica controleerde, wat bij het aanbreken van de dag voor een paniekerige ren naar de controlekamer had gezorgd. Uiteindelijk was het probleem opgelost met de klassieke remedie – zet uit en dan weer aan – en sindsdien liep alles soepel. Maar ergens diep in mijn gedachten knaagde het aan me dat ik de oorzaak van deze error niet had kunnen achterhalen.

‘Niets te rapporteren over de afgelopen vierentwintig uur,’ zei ik en hoopte dat er geen vervolgvragen zouden komen. Tot mijn opluchting richtte de run chief zijn aandacht op het volgende subsysteem en na nog enkele korte verslagen was het beeld helder: de LHCb was klaar.

Buiten op de parkeerplaats keek ik naar de stoomwolken die uit de koeltorens kwamen, het enige waarneembare bewijs van de aanwezigheid van de enorme machine die onder ons wachtte. Ik vroeg me even af hoeveel bewoners van die strook platteland tussen het vliegveld van Genève en de bergen van de Jura zich bewust waren van wat zich onder hun voeten afspeelde.

Ruim een week later, op 30 maart 2010, leverden LHC-ingenieurs een spectaculaire prestatie: ze stuurden twee bundels protonen naar elkaar die ze frontaal op elkaar lieten botsen, wat min of meer gelijkstaat aan het lanceren van twee breinaalden, ieder van een andere kant van de Atlantische Oceaan, om ze halverwege op elkaar te laten botsen. Toen de eerste

protonen op elkaar botsten, kwam uit energie materie voort en lichtten de schermen binnen CERN op met beelden van het eerste microscopische moment van de schepping. De natuurkundigen die zich in de kleine controlekamer van de LHCb hadden gepropt, barstten uit in gejuich en applaus. Het werk van twee decennia had eindelijk vruchten afgeworpen.

Die dag betekende het begin van een stoutmoedige nieuwe fase in die ambitieuze intellectuele reis van de mensheid: de al eeuwen durende zoektocht naar de basisingrediënten van de natuur en naar hun herkomst, wat je zou kunnen noemen het recept van ons heelal. Dit boek is het verhaal van die zoektocht. Het is het verhaal van hoe duizenden mensen gedurende honderden jaren hun best hebben gedaan en geleidelijk hebben ontdekt wat de fundamentele ingrediënten van materie zijn. Ook hebben ze de herkomst ervan getraceerd in de kosmos, via de kernen van stervende sterren en terug naar de eerste ziedende momenten van de oerknal. Het is het verhaal van chemie, van atomaire, nucleaire en deeltjesfysica, van astrofysica, kosmologie en meer, en het is het verhaal dat ik wil vertellen door middel van mijn persoonlijke missie om het ultieme recept voor appeltaart te vinden. Waarom een appeltaart, vraag je? Nou...

In de historische tv-serie *Cosmos* nam de Amerikaanse astrofysicus Carl Sagan de kijkers mee op een epische reis door het heelal – hij vloog naar verre sterrenstelsels, zocht naar de oorsprong van het leven en was getuige van de geboorte en het sterven van sterren. En aangezien *Cosmos* in 1980 gemaakt is, ging die reis door ruimte en tijd vergezeld van heel veel aannames.

Sagan, die soms wat belachelijk werd gemaakt vanwege zijn nogal opgeblazen stijl van presenteren, hield zichzelf een beetje voor de gek in aflevering negen, die begint met wat op het eerste gezicht een kleine, groene planeet lijkt die in de lege ruimte zweeft. Als we dichterbij komen, beseffen we plotseling dat het helemaal geen planeet is, maar een appel, die ineens in tweeën gesneden wordt terwijl we een keukenscène te zien krijgen waarin een dreigende deegroller dramatisch een deegbal uitrolt, dit alles onder steeds harder wordende muziek die evengoed uit *Blade Runner* had kunnen komen.

Die aflevering eindigt in de grootse, met eikenhout betimmerde eetzaal van het Trinity College in Cambridge waar Sagan, die er goed verzorgd uitzag in een van zijn kenmerkende rode coltruien, aan het hoofd van een lange tafel zit. Een kelner brengt hem een punt versgebakken ap-

peltaart en Sagan wendt zich met een schittering in zijn ogen tot de camera en zegt: ‘Om te begrijpen hoe je een appeltaart bakt, moet je eerst het heelal uitvinden.’

Dat is pas een kookprogramma dat ik graag zou willen zien. ‘Vandaag gaan we in *The Great British Bake Off* een gezouten caramel parfait maken, maar eerst gaat Mary Berry jullie laten zien hoe je koolstof synthetiseert met behulp van een stervende ster.’ Hoe dan ook, Sagans punt was dat een appeltaart veel meer is dan appels en deeg. Zoom ver genoeg in en je zult biljoenen en biljoenen atomen tegenkomen, die de ruimte ingeblazen zijn door een supernova of gesmeed in de onvoorstelbare hitte van de oerknal. Dus als je echt wilt weten hoe je een appeltaart maakt, dan moet je eerst uitzoeken waaruit het totale heelal bestaat.

Het begrijpen van de werkelijke oorsprong van alles wordt gewoonlijk in hoogdravende termen geformuleerd – zoals iedereen wel weet beschreef Stephen Hawking het als het kennen van ‘de geest van God’⁶ – maar ik ga toch liever voor Sagans nuchterder benadering. Als we beginnen met een appeltaart en die in steeds kleinere stukjes afbreken tot we bij de basisingrediënten zijn, terwijl we er op hetzelfde moment achter proberen te komen waar die allemaal uit bestaan, komt er dan ooit een einde aan? De geest van God zullen we wel niet kunnen kennen, maar zouden we erachter kunnen komen hoe je zelf een appeltaart maakt?

Om antwoord op deze vraag te krijgen gaan we een wereldreis maken, duiken we een kilometer diep de grond in onder een Italiaanse bergketen om in de kern van onze zon te kunnen turen, en beklimmen we een hoge bergtop in New Mexico waar astronomen signalen ontcijferen die verborgen zijn in sterrenlicht. We gaan luisteren naar de kreukels in de stof van ruimte en tijd in de vochtige naaldwouden van zuidelijk Louisiana en nemen een kijkje achter de schermen van een lab in New York waar een reusachtige versneller temperaturen schept die sinds de oerknal niet meer zijn voorgekomen. Tijdens onze poging om de fundamentele ingrediënten van materie bloot te leggen en hun geschiedenis te onthullen, ontmoeten we chemici, astronomen, fysici en kosmologen uit heden en verleden. En we zullen moeten accepteren dat er mysteries onopgelost zullen blijven en ons afvragen of er vragen zijn die we nóóit zullen kunnen beantwoorden.

We gaan continenten en eeuwen doorkruisen op zoek naar het recept van ons heelal, maar net als in alle heldenverhalen beginnen we thuis.

Elementair koken

Op een mooie zomermiddag kwam ik aan bij het huis van mijn ouders in een voorstad ten zuidoosten van Londen, voorzien van wat glaswerk dat ik online had besteld en een doos met zes appeltaarten van Mr. Kipling Bramley. Ik ging hier het raarste experiment uitvoeren dat ik ooit heb gedaan.

Als kind was mijn vader een fervente amateurchemicus en bracht hij halverwege de jaren zestig hele middagen door met het veroorzaken van geuren en explosies in het schuurtje aan het einde van de tuin van zijn ouders. Dat was de tijd waarin iedereen (ook tieners met een meer dan gemiddelde kennis van chemie en een gezonde onverschilligheid ten aanzien van hun eigen veiligheid) bij de plaatselijke handelaar in chemische substanties een angstaanjagend scala aan schadelijke stoffen kon kopen. Ook, zo bleek, alle ingrediënten van buskruit. Hij vertelt nog steeds met veel genoegen over hoe er aan een van zijn meer dramatische proeven een abrupt einde kwam toen zijn eigen vader, voormalig militair bij de artillerie en dus bekend met het geluid van kanonschoten, naar het einde van zijn tuin stormde en riep: ‘Zo is het wel genoeg, bij die laatste rinkelden alle ruiten!’ Makkelijker tijd. Mijn vader heeft nog steeds wat van zijn oude scheikundespullen, waaronder een bunsenbrander die ik graag wilde gebruiken. En ik besloot dat mijn flatje in Londen nu niet direct de ideale locatie was voor het experiment dat ik voor ogen had.

De gedachte achter het experiment was deze: als je een appeltaart krijgt aangeboden en je helemaal niets afweet van taarten, appels of hun samenstelling, wat zou je dan doen om erachter te komen waarvan hij was gemaakt? Op de werkbank in de garage schraapte ik een heel klein beetje van de taart en stopte het in een reageerbuisje, waarbij ik ervoor zorgde dat ik een goed mengsel had van het kruimelige deeg en de zachte appelvulling,

en sloot ik het buisje af met een kurk, waarin in het midden een gaatje was geboord. Nadat ik het reageerbuisje via een lange, L-vormige glazen buis had verbonden met een glazen kolf die in een bak koud water dreef, deden we de bunsenbrander aan, zetten hem onder het reageerbuisje en keken toe.

De taart begon te borrelen en te karamelliseren en al gauw dreigde het uitzettende gas in de reageerbuis ons taartmonster de glazen buis in te persen. We draaiden de brander wat lager en zagen hoe de taart langzaam zwart werd en tot mijn plezier begonnen slierten damp door de buis naar de glazen kolf te stromen, die kort daarna vol zat met een spookachtige witte nevel. Dit was nog eens een echt chemisch experiment!

Ik vroeg me af wat die witte damp zou zijn en rook er eens aan, een beproefde methode van chemische analyse uit de dagen van vóór gezondheid en veiligheid eerst. Humphry Davy, een baanbrekende chemicus uit de tijd van de romantiek, onderzocht de medische effecten van verschillende gassen door ze te inhaleren, wat in 1799 leidde tot de ontdekking van stikstofoxide, dat we nu lachgas noemen. Hij ging dat in grote hoeveelheden inhaleren terwijl hij zich met zijn dichtertelijke vrienden, en soms met een jongedame, in een donkere kamer had opgesloten. Pas op, dit was niet zonder risico. Hij bracht zichzelf bijna om bij een experiment met koolmonoxide en toen hij weer naar de frisse lucht gesleept was, merkte hij zwakjes op: 'Ik denk niet dat ik eraan doodga.'¹

Helaas, mijn appeltaartdamp gaf geen psychoactieve effecten, slechts een zeer onaangename brandlucht die nog uren na afloop van het experiment bleef hangen. Toen ik door de damp naar de bodem van de kolf tuurde, zag ik dat iets van die damp gecondenseerd was – doordat de kolf dankzij het contact met het water zo koud was – en een gelige vloeistof vormde, bedekt met een donkerbruin, olieachtig laagje.

Na nog tien minuten hitte leek er geen damp meer af te komen van de verkoolde resten van de appeltaart en we concludeerden dat ons experiment compleet was. Ik wilde zo graag de inhoud van de reageerbuis nader bekijken dat ik even vergat dat, als je glas tien minuten lang verhit met een bunsenbrander, het echt behoorlijk heet wordt en ik liep dan ook een ernstige brandblaar op aan mijn wijsvinger. Er is een goede reden waarom het gevaarlijkste gereedschap waarbij ik gewoonlijk in de buurt mag komen een desktopcomputer is.