

Inleiding

Enkele jaren geleden zat ik me achter mijn laptop enigszins te verbazen over de ogenschijnlijk gemakkelijke vraag die vier hoogleraren deeltjesfysica van de Universiteit van Oxford me hadden gesteld. Ik had hun namen niet meegekregen, niet alleen omdat ik zenuwachtig was maar ook omdat mijn PhD-toelatingsgesprek verliep via een instabiele internetverbinding vanuit een motel in het Australische binnenland. Ze hadden me gevraagd: ‘Wat fascineert u zo aan de deeltjesfysica?’

Het was ongetwijfeld een strikvraag: toelatingsgesprekken voor Oxford zijn notoir lastig. Op dat moment besloot ik dat ik maar beter eerlijk kon zijn. Ik vertelde hun dat het me zo verwonderde dat de natuurkunde alles leek te kunnen beschrijven: van de kleinste subatomaire deeltjes en de atomen waaruit ons lichaam bestaat tot de grootste structuren in het heelal en de onderlinge samenhang daartussen.

Deeltjesfysica was het fundament van dat alles, zei ik.

Vijf jaar daarvoor studeerde ik nog weg- en waterbouwkunde aan de Universiteit van Melbourne. Ik had nooit geweten dat je ook natuurkundige kon worden: hoewel ik op school natuurkunde ontzettend leuk had gevonden, wist ik niet beter dan dat het vak alleen diende als basis voor een carrière als ingenieur. Dat veranderde toen ik na mijn eerste studiejaar samen met mijn jaargenoten werd uitgenodigd voor het jaarlijkse hoogtepunt van de vereniging voor natuurkundestudenten: het sterrenkamp.

Op een vrijdagmiddag verlieten we Melbourne en twee uur

later kwamen we aan op de Leon Mow Dark Sky Site. Een hobbelige zandweg voerde naar een gebouw met een tinnen dak, waar we ons bier en onze telescopen uitpaktten en vlak bij een grote open plek onze tenten opsloegen. Toen de avond viel, daalde de temperatuur en begon de lucht te zinderen van het schrille geluid van cicaden. Om mijn nachtzicht te behouden klemde ik met een haarbandje een rood stuk cellofaan om de kop van mijn zaklamp. Ik kroop in mijn slaapzak, dankbaar dat die niet alleen kon dienen als warmtebron maar ook als klamboe. Ik snoof de vertrouwde geur van gombomen op. En toen keek ik omhoog.

‘Daar is er een!’ riep de man naast me toen een meteor door het hemelruim schoot. Terwijl mijn ogen zich aanpasten aan het duister, onthulde zich het ware wonder van deze officiële *dark sky site*. Het geklets stierf weg tot gefluister, dat op zijn beurt verstomde tot stilzwijgen. Venus zakte langzaam achter de horizon en de andere planeten kwamen in beeld. In de loop van die nacht ervoer ik zelf hoe de nachtelijke hemel langzaam maar o zo zeker veranderde. Door de telescopen van mijn vrienden zag ik de prachtige ringen om Saturnus, die ik kende van foto’s maar die me door een lens op een vreemde manier nieuw voorkwamen. Ik zag sterren die zich vormden in nevels vol gloeiend stof, en bolvormige clusters met miljoenen sterren, die op een afstand van 100.000 lichtjaar fonkelend om onze Melkweg cirkelden.

Het spectaculairste verschijnsel was echter de heldere band van sterren en stof, de gloeiende boog van ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg. Op het zuidelijk halfrond kijken we naar het centrum van ons schijfvormige sterrenstelsel. Vanaf dat centrum gerekend bevinden we ons op ongeveer twee derde van de schijf, waar we om onze eigen ster cirkelen, die zelf ook door de Melkweg vliegt. Het sterrenstelsel raast samen met zijn lokale groep sterrenstelsels door de ruimte met een snelheid van ongeveer 600 kilometer per seconde. Daarbuiten bevinden zich nog miljarden andere vergelijkbare sterrenstelsels, sterren en nevels, zwarte gaten en quasars,

materie die is ontstaan uit energie die in een gigantische spanne van ruimte en tijd een transformatie heeft ondergaan.

Dat was het moment waarop ik werkelijk beseftte hoe klein ik was, hoe kort mijn leven duurde en hoe ik worstelde om de grootte van wat ik zag onder woorden te brengen. De sterren en planeten waren niet 'daar boven', en ik was niet 'hier beneden': we maakten allemaal deel uit van een gigantisch natuurkundig systeem, het heelal. Ook ik was daar onderdeel van. Natuurlijk wist ik dat al, maar tot dat moment had ik nooit echt mijn plek in het universum gevoeld.

Plotseling was de rest niet meer van belang. Ik wilde meer weten, over zwaartekracht en deeltjes en donkere materie en relativiteit. Over sterren en atomen en licht en energie. Bovenal wilde ik weten hoe alles met elkaar verbonden was, en hoe ik ermee verbonden was. Ik wilde weten of er werkelijk een theorie van alles bestond, een unificatietheorie. Ik was er diep van doordrongen dat dit allemaal van belang was, dat het van belang was voor mij als mens: inzicht hierin verwerven was zo'n groot doel dat ik wist dat ik mijn blietje tijd als denkend wezen niet zou hebben verspild als ik dit doel kon bereiken, al was het maar een beetje. Ik besloot natuurkundige te worden.

Wij natuurkundigen willen het gedrag van het heelal doorgronden, en van alles wat zich erin bevindt. We proberen dit onder meer te doen door vragen te stellen, en naarmate ik me meer in de natuurkunde verdiepte, ontdekte ik de vraag die de kern van alles leek te vormen: 'Wat is materie, en hoe komt het dat die materie alles om ons heen schept, en ook onszelf?' Ik denk dat ik de betekenis van mijn eigen bestaan probeerde te achterhalen. In plaats van filosofie te studeren benaderde ik de vraag op een indirectere wijze: ik wilde gaan proberen het hele heelal te begrijpen.

Al duizenden jaren hebben mensen zich vragen gesteld over de aard van materie, maar pas in de afgelopen 120 jaar heeft deze

nieuwsgierigheid enkele antwoorden opgeleverd. Vandaag de dag wordt ons begrip van de allerkleinste deeltjes in de natuur en de krachten waarmee ze op elkaar inwerken beschreven door de deeltjesfysica, een van de ontzagwekkendste, ingewikkeldste en creatiefste avonturen waaraan de mensheid ooit begonnen is. Tegenwoordig hebben we een gedegen kennis van de fysieke materie van het heelal en begrijpen we grotendeels hoe alles in elkaar zit. We hebben ontdekt dat de werkelijkheid een rijkdom en complexiteit bezit die mensen zich een paar generaties geleden nooit hadden kunnen voorstellen. We hebben het idee van atomen als de kleinste bouwstenen van onze wereld laten varen en fundamentele deeltjes ontdekt die geen rol spelen in de gewone materie, maar die noodzakelijk lijken op basis van de wiskunde die – op enigszins miraculeuze wijze – onze werkelijkheid beschrijft. In slechts enkele tientallen jaren tijd hebben we geleerd hoe al die stukjes in elkaar passen, van de energie-explosie aan het begin van het heelal tot de meest exacte dimensies in de natuur.

Onze kijk op de kleinste bouwstenen in de natuur is in de afgelopen 120 jaar snel veranderd: van radioactiviteit en het elektron naar de atoomkern en het terrein van de kernfysica, plus de ontwikkeling van de kwantummechanica (die de natuur op haar allerkleinste schaal beschrijft). In de loop van de twintigste eeuw ontdekten natuurkundigen steeds meer deeltjes, richtten ze hun aandacht op andere onderwerpen dan alleen de atoomkern en kreeg het vakgebied een andere naam: de ‘hoge-energiefysica’. Tegenwoordig noemen we het onderzoek naar de talrijke deeltjes en naar de wijze waarop die ontstaan, zich gedragen en transformeren simpelweg ‘deeltjesfysica’.

Het standaardmodel van de deeltjesfysica classificeert alle bekende deeltjes in de natuur en beschrijft de krachten die hun onderlinge wisselwerking bepalen. Het model is in de loop der decennia door veel verschillende natuurkundigen ontwikkeld, en onze huidige versie ontstond ergens in de jaren zeventig. Deze

theorie is een absolute triomf: ze is wiskundig elegant en ongelooflijk precies, maar past niettemin gewoon op een mok. Als student voelde ik me aangetrokken tot het standaardmodel omdat het de werking van de natuur op een fundamenteel niveau zo volledig leek te beschrijven.

Het standaardmodel stelt dat alle materie in ons dagelijks leven uit slechts drie deeltjes is opgebouwd. We bestaan uit twee soorten quarks, de zogeheten ‘upquarks’ en ‘downquarks’, die onze protonen en neutronen vormen. Samen met elektronen vormen deze twee soorten quarks de atomen, die door bepaalde krachten bij elkaar gehouden worden: het elektromagnetisme en de sterke en de zwakke kernkracht. Dat is alles. Daaruit bestaan wijzelf en alles om ons heen.¹ Maar hoewel we uit louter quarks en elektronen bestaan, hebben wij mensen op een of andere manier uitgedokterd dat de natuur nog veel meer te bieden heeft dan dit.

Onze kennistriomf is niet louter het resultaat van conceptuele en theoretische sprongen. Het stereotype van het genie dat eenzaam aan een bureau theorie-tjes zit uit te broeden, is grotendeels onjuist. Meer dan een eeuw lang zijn vragen als ‘Hoe zit een atoom in elkaar?’, ‘Wat is licht eigenlijk?’ en ‘Hoe heeft ons heelal zich ontwikkeld?’ op een volstrekt praktische manier door natuurkundigen benaderd. Dat we tegenwoordig kunnen zeggen dat we dit allemaal ‘weten’, dat we denken dat onze modellen een afspiegeling van de werkelijkheid zijn, komt niet doordat we knappe wiskunde hebben bedreven, maar doordat we experimenten hebben gedaan.

Hoewel velen van ons als kind hebben gehoord dat de wereld om ons heen uit protonen, neutronen en elektronen bestaat, horen we maar weinig over hoe het eigenlijk komt dat we iets weten over materie, krachten en – eh... – alles. Een proton is een miljoen maal een miljoen keer kleiner dan een zandkorrel en het is volstrekt onduidelijk hoe we kennis kunnen verwerven over materie op zo’n kleine schaal. Hier komt echter de kunst van de

experimentele fysica om de hoek kijken: onze nieuwsgierigheid leidt ons vanaf een zaadje van een idee via fysieke apparatuur naar nieuwe kennis. Het besef dat ik natuurkunde leuker vond als ik die persoonlijk kon ervaren bracht me die avond in de lichtarme Australische binnenlanden op het idee om experimenteel natuurkundige te worden.

Theoretisch natuurkundigen kunnen zwelgen in wiskundige mogelijkheden, maar experimenten voeren ons naar dat angstaanjagende terrein waarop we kwetsbaar zijn: de echte wereld. Dit is het verschil tussen theorie en experiment. Terwijl ideeën van theoretisch natuurkundigen rekening moeten houden met de resultaten van experimenten, is de taak van experimenteel natuurkundigen genuanceerder. Zij toetsen niet slechts de ideeën van theoretisch natuurkundigen; ze stellen hun eigen vragen, en ontwerpen en bouwen apparatuur waarmee ze die ideeën kunnen toetsen.

Experimentatoren moeten theorieën begrijpen en kunnen toepassen, maar ze moeten zich er niet door laten inperken. Ze moeten openstaan voor onverwachte en onbekende resultaten. Ze moeten ook veel andere dingen begrijpen: ze moeten verstand hebben van uiteenlopende zaken als elektronica en scheikunde, van lassen en werken met vloeibare stikstof. Ze moeten vervolgens deze zaken combineren om materie die ze niet kunnen zien te manipuleren. Het is een feit dat experimenten moeilijk zijn en het proces gepaard gaat met veel valse starts en mislukkingen. Om dit werk te doen heb je een bepaalde soort nieuwsgierigheid en persoonlijkheid nodig. Maar in de loop van de geschiedenis zijn er velen geweest die deze hartstocht en dit doorzettingsvermogen hebben gehad.

In de afgelopen eeuw zijn de experimenten van deeltjesfysici uitgegroeid van opstellingen van één persoon in één kamer tot de grootste machines op aarde. Het tijdperk van de Big Science, dat in de jaren vijftig van de vorige eeuw begon, produceert inmid-

dels experimenten waarbij zo'n honderd landen en tienduizenden wetenschappers betrokken zijn. We bouwen ondergrondse deeltjesversnellers die bestaan uit kilometerslange ultraprecieze elektromagnetische apparaten, projecten waarvan de verwezenlijking meer dan vijftientig jaar duurt en miljarden euro's kost. We hebben een punt bereikt waarop geen enkel individueel land deze prestaties in zijn eentje kan leveren.

Tegelijkertijd heeft ons dagelijks leven een vergelijkbare drastische transformatie ondergaan. In 1900 was elektriciteit in woonhuizen nog een zeldzaamheid, waren paarden het belangrijkste transportmiddel en was de gemiddelde levensverwachting in het Verenigd Koninkrijk of de Verenigde Staten nog geen vijftig jaar. Tegenwoordig leven we langer, deels doordat artsen met behulp van MRI-, CT- en PET-scanners ziekten kunnen diagnosticeren en ons met allerlei medicijnen, vaccins en hoogwaardige machines kunnen behandelen. We onderhouden contact met elkaar via computers, het world wide web en smartphones, die volstrekt nieuwe industrieën en manieren van werken hebben geschapen. Zelfs gewone gebruiksgoederen zijn ontworpen, uitgebreid en opgegewaardeerd met behulp van nieuwe technologie, van de banden van onze auto's tot de edelstenen in onze sieraden.

Als we nadenken over de ideeën en technologieën die de moderne wereld hebben gevormd, leggen we zelden een verband met het parallelle pad dat de experimentele natuurkunde heeft afgelegd. Beide ontwikkelingen zijn echter nauw met elkaar verbonden. Alle hierboven genoemde voorbeelden zijn voortgekomen uit experimenten die ontworpen zijn om meer te leren over materie en de krachten van de natuur – en deze lijst is nog maar het topje van de ijsberg. Slechts twee generaties aan onderzoek hebben fascinerende resultaten opgeleverd. Zo hebben we, door individuele atomen te manipuleren, zulke kleine computers gebouwd dat ze zelfs met een microscoop nauwelijks te zien zijn. Daarnaast kunnen we de instabiele aard van materie gebruiken

om ziekten op te sporen en te behandelen en zijn we in staat met behulp van hoogenergetische deeltjes uit de ruimte het inwendige van oude piramiden te bekijken. Dat is allemaal mogelijk doordat we materie kunnen manipuleren op het niveau van atomen en deeltjes, kennis die we hebben opgedaan dankzij onderzoek dat uit nieuwsgierigheid is uitgevoerd.

Ik heb besloten experimenteel natuurkundige te worden op het gebied van de versnellingsfysica: ik probeer apparatuur uit te vinden die materie op deze minuscule schaal manipuleert. Versnellingsfysici ontdekken voortdurend nieuwe manieren om deeltjesbundels te vormen die ons meer informatie over deeltjesfysica verschaffen, maar ons werk levert ook steeds meer bijdragen aan andere delen van de samenleving. Studenten, vrienden en toehoorders zijn nog steeds verbaasd als ik vertel dat hun dichtstbijzijnde ziekenhuis vrijwel zeker een deeltjesversneller in huis heeft, dat hun smartphone afhankelijk is van kwantummechanica en dat ze alleen over het web kunnen surfen dankzij deeltjesfysici. We bouwen deeltjesversnellers om virussen, chocolade en oude boekrollen te bestuderen. Onze gedetailleerde kennis over de geologie en oude geschiedenis van onze planeet is het resultaat van onderzoek in de deeltjesfysica.

Dit soort onderzoek dat door nieuwsgierigheid wordt aan-gejaagd voert ons voorbij de beperkingen van wat we weten en verwachten en leidt ons naar ideeën, grenzen en oplossingen die de loop van de geschiedenis veranderen. Met dit onderzoek overbruggen we de kloof tussen dat waarvan we weten dat het mogelijk is en dat waarvan we denken dat het onmogelijk is. Dat is het gebied waarop nieuwsgierigheid tot werkelijk baanbrekende innovatie leidt. De fysica, en met name de deeltjesfysica, biedt misschien de treffendste voorbeelden van dit verschijnsel. Maar hoe heeft een reeks natuurkundige experimenten tot al deze aspecten van onze moderne wereld geleid?

Er zijn uiteraard duizenden experimenten geweest, die allemaal

op een of andere manier onze kennis hebben vergroot. In dit boek bespreek ik twaalf cruciale experimenten die hebben geleid tot een ontdekking die we tegenwoordig beschouwen als essentieel voor onze kennis van de wereld. We beginnen met experimenten die rond 1900 door enkele personen zijn uitgevoerd in laboratoria in Engeland en Duitsland, experimenten die de klassieke natuurkunde een daverende klap hebben toegebracht doordat ze aantoonde dat er kleinere deeltjes bestonden dan atomen. Daarna bekijken we hoe experimenten in Chicago de opkomende ideeën over de kwantummechanica hebben helpen bevestigen, met als gevolg dat natuurkundigen overal ter wereld opstegen in luchtballonnen en bergen beklommen om nieuwe deeltjes op te sporen. Elk experiment herinnert me aan de uiterst menselijke combinatie van frustratie en blijdschap die ik maar al te goed uit mijn eigen lab ken en die er nu eenmaal bij hoort als je praktische wetenschap bedrijft. Maar doordat ik nu kan terugkijken naar het verleden, zie ik wat deze vroege experimentatoren niet konden zien: de resultaten van hun ontdekkingen en uitvindingen.

De volgende experimenten voeren ons naar de race tussen de Verenigde Staten, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk om de eerste deeltjesversneller te bouwen en het atoom te splijten. Deze experimenten hebben een rol gespeeld in de vorming van kunstmatige radioactieve elementen in Californië en hebben geleid tot een toevallige ontdekking door industrieel wetenschappers die op haar beurt tot een nieuw onderzoeksinstrument en een nieuwe kijk op de astronomie heeft geleid. Ten slotte volgen we de verhalen van teams en naties die de handen ineen hebben geslagen om de grote experimenten te realiseren die de achtergrond van mijn eigen carrière hebben gevormd: van Amerikaanse labs zoals Brookhaven en Berkeley tot de Stanford Linear Collider, het Fermilab en uiteindelijk de Europese Raad voor Kernonderzoek (CERN).

Samen belichamen deze experimenten een onderzoeksmenta-

liteit die is gestoeld op menselijke nieuwsgierigheid. In de afgelopen eeuw hebben ze ons leven in vrijwel elk opzicht veranderd, van computerisering tot geneeskunde, van energievoorziening tot communicatie, van kunst tot archeologie. In haar kern zal de natuurkunde ons altijd inzicht willen verschaffen in onze plaats in het universum, een waarheid die ik steeds heb gevoeld sinds de avond dat ik de nachtelijke hemel opeens met andere ogen zag. Deze reis illustreert hoe de natuurkunde ook verantwoordelijk is geweest voor een groot deel van de moderne technologie die we nu voor lief nemen en voor praktische resultaten die we zelfs nooit voor mogelijk hadden gehouden. Hij vertelt ons dat natuurkunde bedrijven ons allen iets leert over nieuwsgierigheid en over ons universele vermogen om doorbraken te verwezenlijken die de wereld kunnen veranderen.

DEEL I

DE ONTMANTELING VAN DE KLASSIEKE FYSICA

Verbeelding is bij uitstek de competentie die aan de basis van ontdekkingen ligt. Ze is datgene wat doordringt in de ongeziene werelden om ons heen, de werelden van de wetenschap. Ze is datgene wat voelt en ontdekt wat er is, de werkelijkheid die we niet zien, die voor onze zintuigen niet bestaat.

– Ada Lovelace, in een brief aan Lord Byron, januari 1841

1. De kathodestraalbuis: röntgenstralen en het elektron

Ons verhaal begint in 1895 in een laboratorium in de Duitse stad Würzburg. Het lab leek maar weinig op de nette witte ruimten waarin moderne wetenschappers hun werk doen; het had een prachtige parketvloer en statige hoge ramen die uitkeken op een park en wijngaarden. De natuurkundige Wilhelm Röntgen sloot de luiken en ging aan het werk. Op een lange houten tafel plaatste hij een glazen buis ter grootte van een kleine wijnfles, die hij met een pomp grotendeels vacuüm had gezogen.¹ Er liepen draden vanaf metalen elektroden, één aan het uiteinde van de buis (de negatieve kathode) en één ruwweg halverwege de buis (de positieve anode). Als hij een hoog voltage elektriciteit door de draden joeg, begon de buis te gloeien: de zogeheten ‘kathodestrallen’ waaraan de buis zijn naam te danken had. Tot zover verliep alles zoals verwacht. Maar toen zag hij vanuit zijn ooghoeken aan de andere kant van zijn lab een klein scherm oplichten.

Hij liep erheen om het nader te bekijken. Het met fosfor beklede scherm gaf een groene gloed af. Toen hij de kathodestraalbuis uitzette, verdween de gloed. Toen hij de buis weer aanzette, keerde de gloed terug. Misschien was het slechts een zinsbegoocheling, een weerspiegeling van het licht van de kathodestraalbuis? Hij schermde de buis af met zwart karton, maar ontdekte dat het scherm nog steeds oplichtte. Hij had nog nooit zoiets gezien, maar dacht dat het belangrijk kon zijn.

Vanaf dit moment zou de natuurkunde nooit meer hetzelfde

zijn. Na deze eerste toevallige waarneming zouden experimenten met kathodestraalbuizen het vakgebied van de natuurkunde naar een volkomen nieuw terrein voeren en ideeën over de natuur die duizenden jaren lang waren geaccepteerd op hun kop te zetten. Na verloop van tijd zou de kathodestraalbuis leiden tot technologieën die een omwenteling ontketenden in de manier waarop mensen leven, werken en communiceren. Hier is het allemaal begonnen, met dit oplichtende scherm en de nieuwsgierigheid van een individu.

Net als de meeste mensen aan het einde van de negentiende eeuw dacht Wilhelm Röntgen dat het vakgebied van de natuurkunde zo goed als af was. Het heelal bestond uit materie die was opgebouwd uit 'atomen'. Wetenschappers hadden geconcludeerd dat er verschillende soorten atomen bestonden, die overeenkwamen met verschillende scheikundige elementen. Van bomen tot metalen, van water tot bont: in al hun complexiteit verschilden de materialen om hen heen wat betreft hardheid, kleur en textuur omdat ze waren opgebouwd uit verschillende atomen, die natuurkundigen beschouwden als piepkleine ronde legoblokjes. Met de juiste instructies kon je met behulp van een bepaalde verzameling atomen alles maken wat je wilde.

Natuurkundigen wisten ook dat er krachten bestonden die bepalend waren voor de interactie tussen alle dingen. Zwaartekracht hield de sterren in ons sterrenstelsel, en onze planeet in een baan om de zon. Zelfs de mysterieuze krachten van elektriciteit en magnetisme waren uiteindelijk samengebracht in één kracht: het elektromagnetisme. Het heelal was voorspelbaar: als je alle details van materie en krachten kende en je de zaken in beweging bracht, kon je de bewegingen van alle materie perfect voorspellen.

Er waren nog slechts een paar onopgehelderde details. Hoe de kathodestraalbuis precies werkte, was bijvoorbeeld een van die kleine dingetjes die natuurkundigen nog niet helemaal konden

verklaren. Er waren natuurlijk wel theorieën, zoals het idee dat de gloed in de buis verband hield met rimpelingen in de hypothetische ether, het medium waar volgens veel wetenschappers het licht doorheen reisde, ongeveer zoals geluid door de lucht. In zijn onderzoek naar de details van de kathodestraalbuis leek Röntgen echter tegen een complicatie te zijn opgelopen. Niet alleen gebeurde er in de buis iets wat hij niet kon verklaren, maar hij had ook een merkwaardig effect buiten de buis opgemerkt.

Als kind had Röntgen zich niet van andere jongens onderscheiden. Hij was de zoon van een textielhandelaar, die graag in de natuur op onderzoek uitging.² Het enige waar hij behoorlijk wat aanleg voor bleek te hebben, was het maken van apparaatjes,³ en dit talent bleek later in zijn leven nuttig voor zijn experimentele werk. Toen hij volwassen was, stonden zijn donkere haren altijd recht overeind op zijn voorhoofd, 'alsof hij permanent geëlektriseerd was door zijn eigen enthousiasme'.⁴

Röntgen was een verlegen man die college gaf met een ondraaglijk zachte stem. Hij was streng voor zijn studenten en voelde zich zelfs wat ongemakkelijk bij het idee dat er assistenten in zijn lab rondliepen. Maar hij was dol op wetenschap en citeerde af en toe de grote ingenieur Werner von Siemens, die had gezegd: 'Het intellectuele leven schenkt ons soms misschien wel de zuiverste en grootste mate van vreugde waartoe een mens in staat is.'

Nu had hij iets ontdekt wat nog niemand ooit gezien had. Toen hij naar het vreemde, oplichtende scherm keek, ging hij ervan uit dat het om een andere soort 'straling' ging dan de straling die de kathodestraalbuis liet gloeien, aangezien dat laatste effect zich uitsluitend binnen de buis leek af te spelen. Hij had een nieuw soort onzichtbare straling ontdekt, die veel verder leek te kunnen reiken. Onmiddellijk besloot hij het verschijnsel nader te bestuderen en richtte al zijn tijd en energie op het onderzoek. Toen iemand hem later vroeg wat hij op dat moment had gedacht, zei hij: 'Ik dacht niet, ik deed onderzoek.' Hij had een aantal van

dezelfde buizen in zijn lab,⁵ die hij nu in combinatie met het fluorescerende scherm kon gebruiken. Hij maakte met de buizen systematische en grondig doordachte opstellingen om de aard van de nieuwe straling te achterhalen. Hij plaatste verschillende materialen tussen de buis en het scherm, zoals papier, hout en zelfs harde rubber. De stralen gingen door al die materialen heen, haast zonder aan kracht in te boeten. Als hij de stralen door de dikke houten deur op het aangrenzende lab richtte, ontdekte hij dat hij ze aan de andere kant van de deur nog steeds kon detecteren. Pas toen hij aluminiumfolie voor de buis plaatste, leken de stralen wat lastiger door de barrière te dringen.

Hij bracht zeven intensieve weken door in zijn lab, een enkele keer gestoord door zijn vrouw Anna Bertha, die hem eraan kwam herinneren dat hij af en toe ook eens wat moest eten. Maar afgezien van deze onderbrekingen werkte hij vrijwel helemaal alleen. Hij zweeg over zijn onderzoek. Hij vertelde niets aan zijn assistenten, laat staan aan zijn internationale collega's. Als hij niet als eerste de ontdekking wereldkundig maakte, wist hij zeker dat honderden andere wetenschappers die vergelijkbare experimenten in hun lab deden hem voor zouden zijn. Voor zover we weten heeft hij slechts één keer met een goede vriend over het werk gesproken, tegen wie hij simpelweg had gezegd: 'Ik heb iets interessants ontdekt, maar ik weet nog niet of mijn waarnemingen kloppen.'⁶

Vervolgens probeerde hij zijn hand in de straling te steken en meldde: 'Als de hand tussen de ontladingsbuis en het scherm wordt gehouden, is binnen het grijzige schaduwbeeld van de hand zelf de donkere schaduw van de botten te zien...' Dit bracht hem op een idee. Hij gebruikte de stralen om een beeld van Bertha's hand op een fotografische plaat vast te leggen. Dat experiment bevestigde zijn vermoeden: de straling dringt gemakkelijk door de huid en het vlees heen, maar minder gemakkelijk door bot of metaal. De botten in haar hand en haar trouwring staken don-

ker af tegen het vlees dat we normaal met het oog zien. De mate waarin een object de nieuwe straling blokkeerde, hield verband met de dichtheid ervan. Volgens de overlevering zou Bertha bij de aanblik van de botten in haar hand hebben uitgeroepen: 'Ik heb mijn dood gezien!' Daarna zou ze nooit meer een voet in het lab van haar echtgenoot hebben gezet.

Röntgen moest de nieuwe stralen in zijn notitieboek een naam geven. In de wetenschap omschrijven we onbekende zaken doorgaans met een letter, bijvoorbeeld 'x'. Zodoende bedacht Röntgen onbedoeld de wellicht beste term in de geschiedenis van de natuurkunde. Hij noemde zijn nieuwe ontdekking 'x-stralen'.

Toen Röntgen ervan overtuigd was dat hij de werking van de x-stralen begreep, stond hij voor een moeilijke beslissing. Moest hij een patent nemen op het idee, zijn bevindingen publiceren of meer werk verrichten voordat hij zijn ontdekking wereldkundig maakte? Er waren nog veel vragen waarop hij graag het antwoord wilde hebben. Wat was bijvoorbeeld het verband tussen x-stralen enerzijds en licht en materie anderzijds, waar waren ze van gemaakt, hoe werden ze gevormd? Hij kwam tot de slotsom dat hij de publicatie van zijn ontdekking niet langer kon uitstellen; de kans dat iemand anders de x-stralen zou ontdekken was te groot. Als hij zijn vondst zou publiceren alvorens er patent op aan te vragen, zou hij er nooit geld mee kunnen verdienen als het een nuttig medisch hulpmiddel zou blijken te zijn. Maar Röntgen was een natuurkundige, geen arts, dus hij wist niet of medici geïnteresseerd zouden zijn in zijn idee. Om te kijken of zijn ontdekking nuttig was, kon hij die volgens hem het best publiceren en verspreiden in de medische gemeenschap.

Hij overwon zijn gebruikelijke schuchterheid en plaatste op 23 januari 1896 een zware tafel met zijn x-stralenexperiment in de collegezaal van het Medisch Genootschap in Würzburg, op loopafstand van zijn laboratorium. Het grote publiek had via krantenartikelen al lucht gekregen van zijn ontdekking en zijn

lezing trok zoveel belangstelling dat er mannen in de gangpaden moesten staan. Röntgen presenteerde de allereerste lezing over zijn ontdekking. Hij toonde het publiek hoe x-stralen door hout en rubber heen drongen, maar niet door metaal. Hij toonde hun de foto van Bertha's hand en vertelde over zijn idee om met behulp van x-stralen foto's van het inwendige van het menselijk lichaam te maken. Als klap op de vuurpijl zou hij demonstreren hoe gemakkelijk het was zo'n foto te maken.

Hij nodigde de president van het genootschap, een prominente anatoom, uit om zijn hand in de baan van de x-stralen te plaatsen. Röntgen schakelde de kathodestraalbuis in en nam een x-stralenfoto van de hand van de president. De artsen in het publiek waren verbijsterd. Ze zagen onmiddellijk de waarde van zijn ontdekking in, en de president was zo onder de indruk dat hij het publiek voorging in een driewerf hoera voor Röntgen. Ze stelden zelfs voor hem te eren door de nieuwe stralen zijn naam te geven: röntgenstralen.⁷

Berichten over dit nieuwe verschijnsel verspreidden zich als een lopend vuurtje en leidden in de hele wereld tot bewondering, angst en zelfs poëzie. In dezelfde tijd dat het publiek zich liet meeslepen door Jules Vernes boek over een reis naar het middelpunt van de aarde had Röntgen plotseling het vermogen ontdekt om in het menselijk lichaam te kijken. Dit leidde tot enkele interessante misvattingen, zoals het idee dat je met röntgenstralen door de kleding van een dame kon kijken (het idee om door herenkleding te kijken werd niet genoemd). Ondernemers uit die tijd begonnen röntgenbestendig loden ondergoed te verkopen, blijkbaar alleen voor vrouwen. 'Röntgenbrillen' werden in een aantal operagebouwen verboden, ondanks het feit dat die helemaal niet bestonden. Filosofen vreesden dat röntgenstralen het intiemste zelf van iemand konden onthullen.

Honderden wetenschappers in heel de wereld beschikten al

over kathodestraalbuizen, die tot de standaarduitrusting van natuurkundelaboratoria behoorden. Eerst bevestigden ze Röntgens ontdekking en vervolgens begonnen ze zelf met de buizen te experimenteren, allemaal in slechts enkele maanden tijd. Binnen een jaar na hun ontdekking, in 1896, werden op de slagvelden in de oorlog tussen Italië en Abessinië röntgenstralen gebruikt om botbreuken en granaatscherven in het lichaam van soldaten op te sporen en had het Koninklijk Hospitaal in Glasgow de eerste gespecialiseerde röntgenafdeling ter wereld opgericht.

Elders in de samenleving buiten zakenlieden de mogelijkheden van röntgenstralen voor andere doeleinden uit. Een populair instrument was indertijd de pedoscoop, die röntgenfoto's van de voeten van klanten maakte terwijl ze schoenen pasten, een praktijk die later werd stopgezet toen steeds duidelijker bleek dat röntgenstralen soms huid of weefsel konden beschadigen – een kwestie waarop we later nog terugkomen. Röntgen zelf probeerde met een foto van metalen gewichten in een ondoorzichtige doos de industrie voor röntgenstralen te interesseren. Deze eerste radiografen plaveiden de weg voor moderne bewakingsscanners die op vliegvelden in gebruik zijn.

Omdat Röntgen de mogelijke medische toepassing van zijn ontdekking niet wilde dwarsbomen, had hij besloten geen patent erop aan te vragen. Daardoor kon Röntgen zijn inspanningen niet te gelde maken. Verstandig genoeg liet hij de verantwoordelijkheid om deze technieken verder te ontwikkelen over aan de medici; hij beweerde dat hij te druk was met zijn andere onderzoek, maar bleef waar nodig zijn hulp aanbieden.

Röntgen lijkt misschien een vreemde figuur: een 'eenzaam genie' dat vanuit het niets een 'toevallige ontdekking' heeft gedaan. Geluk leek een belangrijke rol te hebben gespeeld. Immers iedereen met een fosforescerend scherm in de buurt van een kathodestraalbuis had dezelfde ontdekking kunnen doen. Maar als we nauwkeuriger kijken, blijken er andere factoren in het spel te

zijn. Röntgen had toegang tot een groot netwerk van deskundigen over heel de wereld, beschikte over vele jaren van experimentele training en was geduldig en nederig gebleven, ondanks alle opwinding die hij moet hebben gevoeld. Toen hij het opgluoiende scherm zag, bezat hij de kennis om de betekenis ervan te beseffen en was hij nieuwsgierig genoeg om dieper te graven.

Ondanks de grote hype wist niemand echt wat röntgenstralen eigenlijk waren. Röntgen had aangetoond dat ze andere reflectie- of refractie-eigenschappen hadden dan zichtbaar licht of het ultraviolette of infrarode licht dat buiten ons gebruikelijke visuele spectrum ligt. Er bestond evenmin een duidelijk idee over hoe röntgenstralen uit de kathodestrallen ontstonden of hoe hun interactie was met andere materie, zoals het fosforescerend scherm. Een antwoord op deze vragen vereiste nog meer experimenten met de kathodestraalbuis, die een cruciale rol bleef vervullen in de ontdekkingen die hierop volgden.

In het begin van 1897 wilde Joseph John ('J.J.') Thomson, de oprichter en eerste directeur van het gerenommeerde natuurkundelab van Cambridge (Engeland), een twintig jaar oude controverse de wereld uit helpen. In plaats van zich te richten op de röntgenstralen buiten de buis, wilde hij de samenstelling van de kathodestrallen in de buis bepalen.

Thomson had een impopulaire hypothese. Hij geloofde dat kathodestrallen uit deeltjes bestonden. Dit plaatste hem tegenover Röntgen, die net als zijn Duitse collega's dacht dat kathodestrallen immaterieel waren, een vorm van licht.⁸ Thomson gebruikte de buizen in zijn lab gewoonlijk om elektriciteit in gassen te bestuderen, maar nu had hij een nieuwe reeks experimenten ontworpen om een antwoord te vinden op de vraag: wat zijn kathodestrallen eigenlijk?

Thomson was de verlegen zoon van een boekverkoper uit Manchester, die op zijn elfde al had verklaard dat hij graag oor-

spronkelijk onderzoek wilde doen. Het is niet duidelijk waar dit vroegwijze verlangen vandaan kwam. Zijn vader overleed toen Thomson zestien was, zodat hij te weinig geld had om een opleiding naar keuze te volgen. Aangezien er voor natuurkundestudies geen beurzen beschikbaar waren, ging Thomson naar het Trinity College in Cambridge om wiskunde te studeren. Daar joeg hij met zijn onderkoelde gevoel voor humor – vaak gebracht met een jongensachtige grijns – en zijn onwrikbare intellectuele zelfvertrouwen angst in het hart van een aantal medestudenten, die haast met ontzag tegen hem opkeken.⁹

Op zevenentwintigjarige leeftijd werd Thomson benoemd tot professor en directeur van het Cavendish-laboratorium aan de Cambridge Universiteit. Hij was een tamelijk kleine man met een fikse snor, een zwarte haardos en een scheiding midden op zijn kruin. Hij bekommerde zich echter weinig om zijn uiterlijk. Een oude vriend vertelde later dat Thomson soms in zalige onwetendheid rondliep met zijn vlinderdas ergens ter hoogte van zijn oor. Zijn dagelijkse leven was vrij eenvoudig, maar in zijn vakgebied was hij met zijn speculaties over de aard van materie en het heeal behoorlijk revolutionair.

Thomson begon zijn onderzoek door de experimenten van zijn voorgangers zorgvuldig na te bootsen. Eerst wilde hij bewijzen dat de kathodestralen en hun elektrische lading niet van elkaar te scheiden waren. Met behulp van een magneet boog hij de kathodestralen af naar een elektroscop, een apparaat dat elektrische lading kan meten. Hij mat een verrassend hoge negatieve lading,¹⁰ wat zijn opvatting bevestigde dat de stralen inderdaad elektrische lading bezaten.

Vervolgens voerde hij een bestaand experiment opnieuw uit, waarin hij de stralen probeerde af te buigen met een elektrisch veld; hij maakte daarbij gebruik van een elektrische spanning tussen twee platen, die zijn assistenten in een speciaal gebouwde vacuümbuis hadden aangebracht. Als de stralen inderdaad uit

deeltjes bestonden, zoals hij dacht, zouden ze door de spanning moeten worden afgebogen. Maar als de stralen eigenlijk lichtstralen waren, zouden ze in een rechte lijn hun weg vervolgen en helemaal niet afbuigen, net zoals het licht van een fakkel niet door elektrische spanning wordt beïnvloed.

Thomson verwachtte te zien dat de kathodestrallen door een lager voltage minder zouden worden afgebogen dan door een hoger. Heinrich Hertz, de Duitse ontdekker van de elektromagnetische golven, had hetzelfde experiment al eens uitgevoerd en geconstateerd dat hogere voltages de stralen afbogen maar dat lagere voltages geen effect leken te hebben. Toen Thomson in zijn lab hetzelfde experiment uitvoerde, raakte hij gefrustreerd omdat hij dezelfde resultaten verkreeg als Hertz. Het was alsof de kathodestrallen bij hogere voltages als deeltjes werkten en bij lagere voltages als licht. Dit was een groot probleem voor Thomsons deeltjeshypothese.

Thomson experimenteerde met zijn opstelling en probeerde te begrijpen wat hij zag. Eerst veranderde hij het soort gas in de buis, maar de resultaten bleven hetzelfde. Daarna verlaagde hij de hoeveelheid gas in de buis en dat leverde andere resultaten op: hij zag kleine afbuigingen bij lage voltages en grote afbuigingen bij hoge voltages, precies zoals hij had verwacht. Om zeker van zijn zaak te zijn, liet hij weer wat meer gas de buis in stromen, waarna de afbuigingen bij lagere voltages weer verdwenen. De kleine hoeveelheid gas in de buis raakte elektrisch geladen en neutraliseerde het effect van een lager voltage, maar dat van een hoger voltage niet. De kathodestrallen reageerden simpelweg niet op een laag voltage zodra er gas in de buis zat. Dit bleek de oorzaak van Hertz' resultaten en Thomsons frustraties. Thomson schreef later in zijn autobiografie: 'De delicate instrumenten die in natuurkundelaboratoria worden gebruikt kunnen – totdat de techniek ervan verbeterd wordt – de ene dag het ene resultaat opleveren en de andere dag het tegenovergestelde resultaat; daarmee bevestigen

ze de uitspraak dat de wet van consistentie van de natuur nooit in een natuurkundig laboratorium is aangetoond.⁷¹¹

Op grond van al deze resultaten concludeerde Thomson: ‘Het pad van de stralen is niet afhankelijk van de aard van het gas.’⁷¹² Met andere woorden: de effecten die hij demonstreerde waren niet het gevolg van het gas in de buis. Evenmin waren het simpelweg stromen van geladen gasmoleculen, zoals anderen beweerden. Het ging om iets wat veel fundamenteeler was. Dit bracht hem tot zijn belangrijkste conclusie: al deze resultaten waren te verwachten als de stralen inderdaad uit een soort negatief geladen deeltjes bestonden.

Hij moest alleen nog aantonen om wat voor soort deeltjes het ging: atomen, moleculen of iets anders. Om dit te bepalen stelde Thomson met behulp van elektrische en magnetische velden hun lading en massa vast, en in het bijzonder de verhouding tussen de twee: ‘ e/m ’. Zijn metingen leverden een veel groter getal op dan hij had verwacht. Het was een raadselachtig resultaat, dat niet overeenkwam met enig bekend atoom of molecuul, die – voor zover toen bekend – de kleinste deeltjes in de natuur waren. Thomson had twee mogelijke verklaringen: het ging ofwel om heel ‘zware’ deeltjes, net als atomen, met een extreem grote negatieve elektrische lading, ofwel om superlichte deeltjes, met een standaard negatieve elektrische lading. Geen van beide opties was aantrekkelijk. Als de deeltjes atomen waren met een zeer grote elektrische lading, zou hij het hele idee van lading opnieuw onder de loep moeten nemen. Maar als de deeltjes licht waren, wees dat erop dat het atoom helemaal geen ondeelbaar fundamenteel deeltje was.

Thomson veranderde bijna elke denkbare variabele, gebruikte verschillende gassen in de buis, probeerde verschillende metalen voor de elektrodes en wijzigde opnieuw het vacuümniveau in de buis. Elke versie van het experiment produceerde hetzelfde soort nieuwe deeltje met hetzelfde grote verhoudingsgetal tussen

elektrische lading en massa. Zijn speculaties over de aard van de deeltjes waren gebaseerd op zijn kennis van scheikundige experimenten, op waarnemingen aan het lichtspectrum van sterren en zelfs op configuraties van magneten. Langzaam maar zeker nam hij afstand van het idee dat de deeltjes atomen met een zeer grote lading waren. Hij was klaar om zijn resultaten te publiceren.

Op vrijdag 30 april 1897, nauwelijks een jaar nadat Röntgen zijn ontdekking wereldkundig had gemaakt, verscheen Thomson in smoking voor een volgepakte zaal in de Royal Institution in Londen en voerde in het kader van de 'Vrijdagavondlezingen' zijn reeks experimenten opnieuw uit. Deze openbare colleges werden elke vrijdagavond gehouden en trokken een groot publiek van rijke Londenaren¹³ – de laatste wetenschappelijke ontdekkingen golden in die dagen als een vorm van hoge cultuur. Op het hoogtepunt van de lezing verklaarde hij dat de mysterieuze kathodestrallen inderdaad uit negatief geladen deeltjes bestonden, die volgens zijn berekeningen ongeveer tweeduizend keer lichter waren dan waterstof, het lichtste atoom. Thomson had het elektron ontdekt, het eerste subatomaire deeltje.¹⁴

Het was een intellectuele triomf. Thomson was diep in de mysterieuze gloed van de kathodestrallen gedoken en was bovengekomen met een nieuwe kijk op de aard van materie. In oktober van datzelfde jaar zette hij een nieuwe stap: niet alleen bestonden kathodestrallen uit minuscule deeltjes, maar die deeltjes vormden een tot dan toe onbekend onderdeel van de materie. Deze constatering betekende de nekslag voor het idee dat atomen de kleinste ondeelbare entiteiten waren. Thomson wist nog niet precies waar elektronen vandaan kwamen, maar hij geloofde dat ze vrijwel zeker deel uitmaakten van atomen. Gezien het bewijs moesten zelfs Röntgen en zijn Duitse collega's toegeven dat Thomson gelijk had. Röntgen en Thomson hadden met behulp van één en hetzelfde instrument twee volkomen verschillende en volstrekt nieuwe aspecten van de natuur ontdekt.