

INHOUD

- 1 Inleiding 9
- 2 Wat is leven? 32
- 3 De motoren van het leven 67
- 4 De kwantumzweving 109
- 5 Op zoek naar Nemo's huis 143
- 6 De vlinder, het fruitvliegje en het kwantumroodborstje 176
- 7 Kwantumgenen 207
- 8 Het bewustzijn 242
- 9 Hoe het leven begon 277
- 10 Kwantumbiologie: leven op de rand van een storm 301
- Epiloog: kwantumleven 337

- Woord van dank 339
- Noten 341
- Register 353

HOOFDSTUK I

Inleiding

De winterse vorst is dit jaar vroeg in Europa en er hangt een doordringende kilte in de avondlucht. Diep in de geest van een jong roodborstje wordt een aanvankelijk vaag gevoel van vastberadenheid steeds sterker.

De vogel heeft de afgelopen paar weken veel meer dan haar normale portie insecten, spinnen, wormen en bessen tot zich genomen en is nu bijna twee keer zo zwaar als toen haar kroost in augustus uitvloog. Dit extra gewicht bestaat voornamelijk uit vetreserves, die ze nodig zal hebben als brandstof voor de zware reis die ze op het punt staat te ondernemen.

Dit zal haar eerste trek zijn weg van het sparrenbos in Midden-Zweden, waar zij tot nu toe haar hele korte leven heeft doorgebracht en waar ze slechts een paar maanden geleden haar jongen heeft grootgebracht. Gelukkig voor haar was de vorige winter niet al te streng, want een jaar geleden was ze nog niet helemaal volgroeid en daarom niet sterk genoeg om zo'n lange reis te ondernemen. Maar nu ze tot het volgende voorjaar is ontheven van haar ouderlijke verantwoordelijkheden, hoeft ze alleen maar aan zichzelf te denken en is ze klaar om de komende winter te ontvluchten door zuidwaarts te trekken op zoek naar een warmer klimaat.

Het is een paar uur na zonsondergang. In plaats van rustig te gaan zitten voor de nacht, hipt ze in de toenemende duisternis naar het puntje van een tak onder aan de enorme boom die sinds het voorjaar haar huis is geweest. Ze schudt zich even uit, als een marathonloper die zijn spieren losmaakt voor een wedstrijd. Haar oranje borst glinstert in het maanlicht. De zorg waarmee ze haar nest heeft gebouwd – slechts een meter verderop, deels aan het oog onttrokken tegen de bemoste schors van de boomstam – is nu een flauwe herinnering.

Zij is niet de enige vogel die zich op een vertrek voorbereidt, want andere roodborstjes – zowel mannetjes als vrouwtjes – hebben ook besloten dat dit een goede nacht is om aan hun lange trek naar het zuiden te be-

ginnen. Overal om zich heen hoort ze in de bomen een schrill gezang dat de gebruikelijke geluiden van andere nachtdieren in het bos overstemt. Het is alsof de vogels zich gedwongen voelen om hun vertrek aan te kondigen en een boodschap af te geven aan de andere bewoners van het bos dat ze maar beter niet het territorium van de vogels binnen kunnen dringen en hun nesten leeghalen terwijl ze weg zijn. Want deze roodborstjes zijn zeker van plan om in het voorjaar terug te komen.

Ze draait haar kop snel even naar links en naar rechts om zich ervan te vergewissen dat de kust veilig is en vliegt dan de avondhemel tegemoet. Met het naderen van de winter zijn de nachten langer geworden, en ze zal nog ruim tien uur moeten vliegen voordat ze weer uit kan rusten.

Ze gaat op weg op een kompascoers van 195° (15° westelijker dan pal naar het zuiden). De komende dagen zal ze min of meer in diezelfde richting blijven vliegen, waarbij ze op een goede dag meer dan 300 kilometer aflegt. Ze heeft geen idee wat ze onderweg moet verwachten of hoe lang het zal duren. Ze kent het terrein rond haar sparrenbos, maar na een paar kilometer vliegt ze over een vreemd maanovergoten landschap van meren, dalen en steden.

Ergens bij de Middellandse Zee zal ze op haar bestemming aankomen. Hoewel ze niet naar een bepaalde plaats gaat, zal ze stoppen als ze op een geschikte plek aankomt en zich de plaatselijke oriëntatiepunten inprenten zodat ze daar de komende jaren terug kan keren. Als ze de kracht heeft, kan ze zelfs helemaal naar de Noord-Afrikaanse kust vliegen. Maar dit is haar eerste trek, en haar hoogste prioriteit is nu om te ontkomen aan de barre kou van de naderende Scandinavische winter.

Ze lijkt zich niet bewust van de roodborstjes in haar omgeving, die allemaal ongeveer dezelfde kant op vliegen en waarvan sommige de reis vele malen eerder hebben gemaakt. Ze kan uitstekend zien in het donker, maar ze is niet op zoek naar oriëntatiepunten – zoals wij misschien zouden doen als wij zo'n reis zouden maken – en ook volgt ze niet het patroon van de sterren aan de heldere nachthemel door haar interne sterrenkaart te raadplegen, zoals veel andere nachtelijke trekvogels doen. In plaats daarvan heeft ze dankzij enkele miljoenen jaren evolutie een heel opmerkelijk vermogen ontwikkeld, waardoor ze de reis van zo'n drieduizend kilometer kan maken, die een jaarlijkse najaarstrek zal worden.

Trekken is, uiteraard, heel gewoon in het dierenrijk. Zo schieten zalmen elke winter kuit in de rivieren en meren van Noord-Europa, om

een broedsel achter te laten dat als het is uitgekomen de loop van de rivier naar de zee volgt, tot in het noordelijke deel van de Atlantische Oceaan, waar ze groeien en volwassen worden. Drie jaar later keren deze jonge zalmen terug om zich voort te planten in dezelfde rivieren en meren waar ze ter wereld zijn gekomen. In de Nieuwe Wereld trekken monarchvlinders in het najaar duizenden kilometers zuidwaarts, de hele Verenigde Staten over. Zij, of hun nazaten (omdat ze zich onderweg voortplanten), keren vervolgens in het voorjaar terug naar het noorden, naar dezelfde bomen waar ze zich verpoet hebben. Groene zeeschildpadden die aan de kust van het eiland Ascension in het zuiden van de Atlantische Oceaan uit het ei komen zwemmen duizenden kilometers door de oceaan voordat ze, eens in de drie jaar, terugkeren, om zich voort te planten op precies hetzelfde met eierschalen bezaaide strand waar ze geboren zijn. De lijst gaat maar door: vele soorten vogels, walvissen, kariboos, langoesten, kikkers, salamanders en zelfs bijen zijn in staat om reizen te ondernemen die zelfs voor de grootste menselijke ontdekkingsreizigers een uitdaging zouden zijn.

Hoe dieren erin slagen om over de aardbol hun weg te vinden is eeuwenlang een raadsel geweest. Wij weten nu dat ze zich van diverse methoden bedienen: sommige oriënteren zich overdag op de zon en 's nachts op de sterren; andere prenten zich oriëntatiepunten in; weer andere kunnen over de hele wereld de weg vinden met behulp van hun reukvermogen. Maar het meest mysterieuze navigatievermogen is dat van het Europese roodborstje: het vermogen om de richting en de kracht van het aardmagnetisch veld te detecteren, de zogenaamde *magnetoreceptie*. En hoewel we nu weten dat een aantal andere dieren dit vermogen ook bezit, is de manier waarop het Europese roodborstje (*Erithacus rubecula*) haar weg over de aardbol vindt het meest interessant voor ons verhaal.

Het mechanisme waardoor ons roodborstje weet hoe ver het moet vliegen, en in welke richting, is gecodeerd in het DNA dat ze van haar ouders heeft geërfd. Het is een verfijnd en ongebruikelijk zesde zintuig waarmee zij haar koers bepaalt. Want evenals vele andere vogels, en ook insecten en zeedieren, heeft zij het vermogen om het zwakke magnetisch veld van de aarde waar te nemen en daar richtingsinformatie aan te ontlenen door middel van een ingebouwd navigatiesysteem, dat in haar geval een nieuw soort chemisch kompas vereist.

Magnetoreceptie is een raadsel. Het probleem is dat het aardmagnetisch veld heel zwak is – tussen de 30 en 70 microtesla aan het oppervlak: dat is voldoende om invloed uit te oefenen op een zorgvuldig uitgebalanceerde en bijna wrijvingsloze kompasnaald, maar het is slechts een honderdste van de kracht van een doorsnee koelkastmagneetje. Dat roept de volgende vraag op: wil een dier het aardmagnetisch veld waarnemen, dan moet dat veld op de een of andere manier van invloed zijn op een chemische reactie ergens in het lichaam van het dier – per slot van rekening is dat hoe alle levende wezens, ook wij, een signaal van buitenaf waarnemen. Maar de hoeveelheid energie die de wisselwerking tussen het aardmagnetisch veld en de moleculen in levende cellen oplevert, is minder dan een miljardste van de energie die nodig is om een chemische verbinding tot stand te brengen of op te heffen. Hoe kan dat magnetisch veld dan waarneembaar zijn voor een roodborstje?

Raadsels, hoe klein ook, zijn fascinerend omdat er altijd een kans is dat de oplossing ervan zal leiden tot een fundamentele verandering van ons inzicht in de wereld. Zo leidden in de zestiende eeuw de overpeinzingen van Copernicus over een relatief onbeduidend probleem met betrekking tot de geometrie van het ptolemeïsche geocentrische model van het zonnestelsel ertoe dat hij het zwaartepunt van het hele universum van de mens naar de ruimte verlegde. Darwins obsessie met de geografische verspreiding van diersoorten en het raadsel waarom geïsoleerde soorten vinken en spotlijsters op eilanden vaak zo gespecialiseerd zijn, leidde tot het formuleren van zijn evolutieleer. En de oplossing voor het raadsel van de straling van zwarte lichamen, de manier waarop hete objecten warmte afgeven, leidde tot de suggestie van de Duitse natuurkundige Max Planck dat energie uit losse pakketjes of ‘kwantums’ bestond, en daarmee tot de geboorte van de kwantumtheorie in 1900. Zou de oplossing van het raadsel hoe vogels over de hele wereld de weg vinden dan ook kunnen leiden tot een revolutie in de biologie? Hoe bizar het ook mag lijken, het antwoord is: ja.

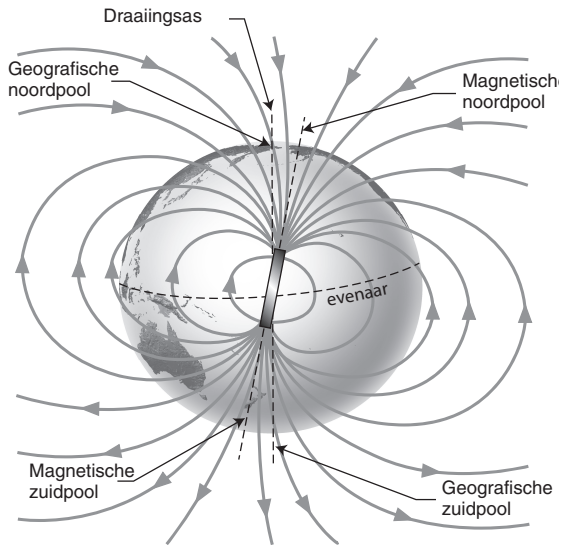
Maar zulke raadsels zijn ook een trekpleister voor pseudowetenschappers en mystici. Zoals Peter Atkins, een scheikundige aan Oxford, in 1976 verklaarde: ‘Het onderzoek naar de effecten van magnetische velden op chemische reacties is lange tijd een speelplaats geweest voor charlatans.’¹ Allerlei exotische verklaringen – van telepathie en oude leylijnen (onzichtbare banen die diverse archeologische of geografische lo-

caties met elkaar verbinden en die naar verluidt spirituele energie bezitten) tot het concept ‘morfische resonantie’, bedacht door de omstreden parapsycholoog Rupert Sheldrake – zijn te eniger tijd voorgesteld als het mechanisme dat trekvogels gebruiken als leidraad op hun routes. Atkins’ bedenkingen in de jaren zeventig waren dus begrijpelijk, een weerspiegeling van de sceptis onder de meeste toen actieve wetenschappers ten aanzien van elke suggestie dat dieren het aardmagnetisch veld zouden kunnen waarnemen. Er leek gewoon geen moleculair mechanisme te zijn waardoor een dier dat zou kunnen – althans niet binnen het domein van de conventionele biochemie.

Maar in hetzelfde jaar waarin Peter Atkins uiting gaf aan zijn sceptis, publiceerden Wolfgang en Roswitha Wiltschko, een Duits ornithologen-echtbaar uit Frankfurt, een baanbrekend artikel in *Science*, een van ’s werelds meest vooraanstaande academische tijdschriften, waarin overtuigend werd vastgesteld dat roodborstjes inderdaad het magnetisch veld van de aarde kunnen detecteren.² Nog opmerkelijker is dat zij aantoonde dat het zintuig van de vogels niet leek te werken als een normaal kompas. Want waar een kompas het verschil aangeeft tussen de magnetische noord- en zuidpool, kon een roodborstje alleen onderscheid maken tussen een pool en de evenaar.

Om te begrijpen hoe zo’n kompas zou kunnen werken, moeten we even stilstaan bij magnetische veldlijnen, de onzichtbare sporen die de richting van een magnetisch veld bepalen en waarlangs de naald van een kompas zich zal richten als hij ergens in dat veld wordt geplaatst. Wij kennen dit vooral als de lijnen in het patroon dat ontstaat in ijzer-vijlsel op een vel papier boven een staafmagneet. Stel je nu eens voor dat de hele aarde een gigantische staafmagneet is, waarbij de veldlijnen straalsgewijs vanaf de zuidpool uitlopen en lussen beschrijven die bij de noordpool weer naar binnen gaan (zie figuur 1.1). De richting van deze veldlijnen is bij beide polen bijna verticaal de grond in of uit, maar hoe dichter ze bij de evenaar komen, hoe vlakker ze worden en hoe meer ze bijna parallel aan het aardoppervlak gaan lopen. Een kompas dat de hoek van de magnetische veldlijnen ten opzichte van het aardoppervlak meet, wat wij een *inclinatiekompas* noemen, kan dus onderscheid maken tussen de richting naar een pool en de richting naar de evenaar; maar het kan geen onderscheid maken tussen de noord- en de zuidpool, omdat de veldlijnen aan beide kanten van de aardbol dezelfde hoek met de

grond maken. In het onderzoek van de Wiltschko's uit 1976 werd vastgesteld dat het magnetische zintuig van het roodborstje werkt als een inclinatiekompas. Het probleem was dat niemand enig idee had hoe zo'n biologisch inclinatiekompas zou kunnen werken, want op dat moment was er geen bekend – of zelfs maar voorstelbaar – mechanisme dat kon verklaren hoe de inclinatie van het aardmagnetisch veld in het lichaam van een dier gedetecteerd kon worden. Het antwoord bleek te vinden te zijn in een van de meest verbluffende wetenschappelijke theorieën van de moderne tijd, en had te maken met de vreemde wetenschap van de kwantummechanica.



Figuur 1.1 Het aardmagnetisch veld.

Een verborgen spookachtige werkelijkheid

Als je vandaag de dag een kleine enquête houdt onder wetenschappers en hun vraagt wat volgens hen de meest succesvolle, verstrekkende en belangrijke theorie in de hele wetenschap is, zal het antwoord er waarschijnlijk van afhangen of je het vraagt aan een natuur- of scheikundige of aan iemand die zich met de levenswetenschappen bezighoudt. De

meeste biologen beschouwen Darwins theorie over evolutie door natuurlijke selectie als het meest fundamentele idee dat ooit is bedacht. Maar een natuur- of scheikundige zal waarschijnlijk betogen dat die ereplaats toekomt aan de kwantummechanica – tenslotte is dat het fundament waarop een groot deel van de natuur- en scheikunde gebouwd is, en verschaft deze theorie ons een opmerkelijk volledig beeld van de bouwstenen van het hele universum. Zonder haar verklarende vermogen verdwijnt zelfs een groot deel van ons huidige inzicht in de werking van de wereld.

Vrijwel iedereen zal over kwantummechanica hebben gehoord, en het is een wijdverbreid idee dat dit een verbijsterende en moeilijke tak van wetenschap is, die slechts door een piepkleine, superslimme minderheid der mensen wordt begrepen. Maar de waarheid is dat de kwantummechanica sinds het begin van de twintigste eeuw een onderdeel van al onze levens is geweest. De wetenschap is rond het midden van de jaren twintig ontwikkeld als een wiskundige theorie om de wereld van het heel kleine te verklaren (de microwereld, zoals die wordt genoemd). Het gaat daarbij om het gedrag van de atomen waaruit alles bestaat wat wij om ons heen zien en de eigenschappen van de nog kleinere deeltjes waaruit die atomen bestaan. Zo beschrijft de kwantummechanica de wetten die elektronen volgen en de manier waarop zij zichzelf ordenen binnen atomen. Daarmee ligt zij ten grondslag aan alle scheikunde, materiaalleer en zelfs elektrotechniek. Zij mag nog zo vreemd zijn, maar haar wiskundige regels zijn cruciaal voor de meeste technologische ontwikkelingen uit de afgelopen halve eeuw. Zonder de kwantummechanische verklaring van de manier waarop elektronen zich door materialen verplaatsen, zouden wij niets hebben begrepen van het gedrag van de halfgeleiders die het fundament vormen van de moderne elektronica, en zonder inzicht in halfgeleiders zouden wij de siliciumtransistor niet hebben ontwikkeld en later de microchip en de moderne computer. De lijst gaat maar door: zonder de ontwikkelingen in onze kennis dankzij de kwantummechanica zouden er geen lasers zijn en derhalve geen cd-, dvd- en blu-rayspelers; zonder de kwantummechanica zouden we geen smartphones hebben, geen satellietnavigatie en geen MRI-scanners. Er wordt zelfs geschat dat meer dan een derde van het bruto binnenlands product in de ontwikkelde wereld afhankelijk is van toepassingen die er zonder ons inzicht in de mechanica van de kwantumwereld domweg niet zouden zijn.

En dit is nog maar het begin. We kunnen uitkijken naar een kwantumtoekomst – hoogstwaarschijnlijk maken wij die zelf nog mee – waarin we misschien kunnen beschikken over bijna onbepaalde elektrische energie uit door lasers gestuurde kernfusie; waarin artificiële moleculaire machines een enorme verscheidenheid aan taken zullen uitvoeren in de techniek, de biochemie en de geneeskunde; waarin kwantumcomputers zullen voorzien in kunstmatige intelligentie; en waarin mogelijk zelfs de sciencefictiontechnologie van teleportatie dagelijks gebruikt zal worden om informatie over te brengen. De kwantumrevolutie van de twintigste eeuw raakt in de eenentwintigste eeuw in een stroomversnelling en zal onvoorstelbare veranderingen teweegbrengen in ons leven.

Maar wat is kwantummechanica precies? Dat is een vraag waarmee wij ons overal in dit boek zullen bezighouden. Bij wijze van voorproefje zullen we hier beginnen met enkele voorbeelden van de verborgen kwantumrealiteit die ten grondslag ligt aan ons leven.

Ons eerste voorbeeld illustreert een van de vreemde kenmerken van de kwantumwereld, misschien wel haar meest kenmerkende eigenschap: de dualiteit van deeltjes en golven. We zijn vertrouwd met het feit dat wij, en alles om ons heen, bestaan uit een heleboel piepkleine, losse deeltjes zoals atomen, elektronen, protonen en neutronen. Misschien ben je je er ook van bewust dat energie, zoals licht of geluid, niet de vorm van deeltjes maar van golven aanneemt. Golven zijn diffuus en niet corpusculair en ze verplaatsen zich door de ruimte als... nou ja, als golven, met toppen en dalen, net als de golven van de zee. De kwantummechanica werd geboren toen in het begin van de twintigste eeuw werd ontdekt dat subatomaire deeltjes zich als golven kunnen gedragen, en dat lichtgolven zich als deeltjes kunnen gedragen.

Hoewel de dualiteit van golven en deeltjes niet iets is waarbij je dagelijks stil hoeft te staan, ligt die wel ten grondslag aan veel erg belangrijke apparaten, zoals de elektronenmicroscopen waarmee artsen en onderzoekers minuscule objecten kunnen zien, identificeren en bestuderen die te klein zijn voor traditionele optische microscopen, zoals de virussen die aids en verkoudheid veroorzaken. De inspiratie voor de elektronenmicroscop was de ontdekking dat elektronen golfachtige eigenschappen hebben. De Duitse wetenschappers Max Knoll en Ernst Ruska beseften dat omdat de met elektronen geassocieerde golflengte (de afstand tussen opeenvolgende toppen of dalen van een golf) veel korter was dan

die van zichtbaar licht, een microscoop die gebaseerd was op beeldvorming met behulp van elektronen veel fijnere details zou moeten kunnen oppikken dan een optische microscoop. De reden is dat elk zeer klein object of onderdeel met afmetingen die kleiner zijn dan de golf die erop valt, die golf niet zal beïnvloeden. Denk eens aan oceaangolven met een golflengte van een paar meter, die breken op kiezelsteentjes op het strand. Door die golven te bestuderen zou je niets te weten komen over de vorm of omvang van een individuele kiezelsteen. Je zou veel kortere golflengten nodig hebben, zoals die welke worden opgewekt in een golfbak van het soort dat iedereen kent van natuurkundelessen op school, om een kiezelsteen te ‘zien’ door middel van de golven die erop afketsen of erdoor worden afgebogen. En dus bouwden Knoll en Ruska in 1931 ’s werelds eerste elektronenmicroscoop, die ze gebruikten om de allereerste foto’s van virussen te maken, waarvoor Ernst Ruska in 1986 (twee jaar voor zijn dood) de Nobelprijs ontving, misschien tamelijk laat.

Ons tweede voorbeeld is nog fundamenteeler. Waarom schijnt de zon? De meeste mensen zijn er waarschijnlijk van op de hoogte dat de zon in wezen een kernfusiereactor is die waterstofgas verbrandt, waarbij de warmte en het zonlicht vrijkomen die alle leven op aarde in stand houden. Minder mensen weten echter dat de zon helemaal niet zou schijnen zonder een opmerkelijke kwantumeigenschap die deeltjes in staat stelt om ‘door muren te gaan’. De zon, en alle andere sterren in het universum, kan die enorme hoeveelheden energie afgeven omdat de kernen van waterstofatomen (die elk bestaan uit slechts één positief geladen deeltje, een proton) kunnen fuseren, met als gevolg dat er energie vrijkomt in de vorm van de elektromagnetische straling die wij zonlicht noemen. De waterstofkernen moeten heel dicht bij elkaar komen om te fuseren; maar hoe dichter ze bij elkaar komen, hoe sterker ze elkaar gaan afstoten, omdat ze allemaal een positieve elektrische lading hebben en ‘gelijksortige’ ladingen elkaar afstoten. Om zo dicht bij elkaar te komen dat een fusie mogelijk is, moeten de deeltjes door het subatomaire equivalent van een bakstenen muur heen: een schijnbaar ondoordringbare energetische barrière. De klassieke natuurkunde* – die gebaseerd is op de

*De deterministische natuurkundige theorieën van vóór de kwantummechanica, inclusief de bijzondere en de algemene relativiteitstheorie, worden gewoonlijk de klassieke natuurkunde genoemd – dit in tegenstelling tot de niet-klassieke kwantummechanica.

bewegingswetten, de mechanica en de zwaartekracht van Isaac Newton, waarmee alledaagse ballen, veren, stoommachines en zelfs planeten heel goed beschreven kunnen worden – zou voorspellen dat dit niet zou horen te gebeuren: deeltjes zouden niet door muren heen moeten kunnen en daarom zou de zon niet moeten schijnen.

Maar deeltjes die de wetten van de kwantummechanica volgen, zoals de kernen van atomen, hebben een leuk kunstje achter de hand: ze kunnen dergelijke barrières makkelijk passeren door middel van een proces dat ‘kwantumtunneleffect’ wordt genoemd. En feitelijk kunnen zij dat dankzij hun golfdeeltjesdualiteit. Zoals golven om objecten heen kunnen stromen, bijvoorbeeld om de kiezelstenen aan het strand, zo kunnen ze ook dóór objecten heen stromen, zoals de geluidsgolven die door je muren gaan als je de tv van je burens hoort. Natuurlijk gaat de lucht waardoor de geluidsgolven zich voortplanten zelf niet echt door de muren heen; het zijn de trillingen in de lucht – geluid – waardoor jullie gemeenschappelijke muur gaat trillen en tegen de lucht in jouw kamer aan begint te drukken om dezelfde geluidsgolven aan jouw oor door te geven. Maar als jij je als een atoomkern zou kunnen gedragen, zou je soms als een spook door een massieve muur heen kunnen gaan.* Dat is wat een waterstofkern in het inwendige van de zon doet: hij verspreidt zich en ‘lekt’ als een geest door de energiebarrière heen om zo dicht bij zijn partner aan de andere kant van de muur te komen dat ze kunnen fuseren. Dus de volgende keer als je op het strand in de zon ligt toe te kijken hoe de golven tegen het strand slaan, denk dan even aan de spookachtige, golfachtige bewegingen van kwantumdeeltjes die er niet alleen voor zorgen dat jij van de zonneschijn kunt genieten, maar die ook alle leven op onze planeet mogelijk maken.

Het derde is een aanverwant voorbeeld, maar illustreert een ander en nog vreemder aspect van de kwantumwereld: een verschijnsel dat *superpositie* wordt genoemd, waarbij deeltjes twee – of honderd, of een miljoen –

*Het zou echter onjuist zijn om te denken dat er bij het kwantumtunneleffect tastbare golven door barrières heen lekken. Het is eerder een gevolg van abstracte wiskundige golven die de waarschijnlijkheid beschrijven dat het kwantumdeeltje op hetzelfde moment aan de andere kant van de barrière te vinden is. In dit boek proberen wij waar mogelijk intuïtieve analogieën te bieden om kwantumverschijnselen te verklaren, maar de realiteit is dat de kwantummechanica volstrekt tegen de intuïtie indruist, en dat we omwille van de begrijpelijkheid het risico lopen dat we de zaken al te zeer simplificeren.