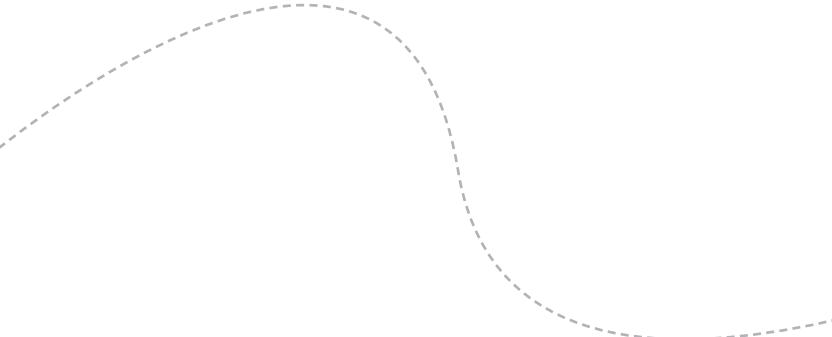


GOVERT
SCHILLING

Higgs

Het
elementair
abc van een
elementair
deeltje



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

Vormgeving omslag: Egbert Clement, Studio Jan de Boer
Vormgeving binnenwerk: Fontaine Uitgevers

© 2012 Fontaine Uitgevers BV

Tweede druk, 2012

ISBN 978 90 5956 454 1
NUR 910

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



VOORWOORD

Plotseling was-ie er. De Higgs. Ruim veertig jaar is ernaar gezocht, met de grootste deeltjesversnellers ter wereld. Honderden natuurkundigen van over de hele wereld hebben hun wetenschappelijke carrière eraan gewijd. Nog maar een jaar geleden wist niemand of het ongrijpbare deeltje wel echt bestond. Maar op woensdagochtend 4 juli 2012 kwam aan alle onzekerheid een eind. In de grote deeltjesversneller van CERN, het Europees centrum voor deeltjesfysica in Genève, had het Higgsdeeltje een onmiskenbare vingerafdruk achtergelaten.

Begin 2012 zag het er nog naar uit dat het wel na-jaar zou worden voordat natuurkundigen duidelijkheid zouden krijgen over het al dan niet bestaan van het Higgsdeeltje. In overleg met mijn uitgever besloot ik om in de zomermaanden een inleidend boek over deeltjesfysica te schrijven, dat dan in

november in de winkel zou kunnen liggen. Goeie timing. Althans, zo leek het.

Toen de ontdekking begin juli al bekend werd gemaakt, gooiden we het roer diezelfde week nog rigoureuus om. Het Higgs-boek moest kleiner, toegankelijker, goedkoper en vooral veel *sneller*. Half juli was ik klaar met schrijven; anderhalve week later rolden de eerste exemplaren van de drukpers. Het resultaat heb je in handen.

Een complex wetenschapsgebied als de deeltjesfysica kun je onmogelijk in minder dan vijftienduizend woorden volledig behandelen. Veel deonderwerpen komen in dit elementaire abc dan ook niet of nauwelijks aan bod. Over antimaterie zul je bijvoorbeeld weinig lezen, evenmin als over de natuurwetten, de snaartheorie of de indrukwekkende technologie van deeltjesversnellers zoals de Large Hadron Collider.

De abc-opzet van het boek biedt je wel de gelegenheid om er lekker in te grasduinen. Termen die een eigen 'hoofdstukje' hebben, zijn **vet** gedrukt. En dat er af en toe eens wat herhaald wordt, is bij een onderwerp als dit eerder een voordeel dan een nadeel. Het inleidende hoofdstuk 'De taal van de natuur' biedt een goede basis; lees het desnoods twee of drie keer.

Dit boekje had nooit zo supersnel tot stand kunnen komen zonder de inzet van Michiel Boek, Wouter Eertink en Machteld Smid van Fontaine Uitgevers, Egbert Clement van Studio Jan de Boer, en Ad van Veen en Pim Knoop van AD Druk in Zeist. Ook ben ik zeer veel dank verschuldigd aan Prof. Dr. Robbert Dijkgraaf van het Institute for Advanced Study in Princeton, Prof. Dr. Gerard 't Hooft van de Universiteit Utrecht, en Prof. Dr. Stan Bentvelsen en Dr. Ivo van Vulpen van Nikhef (het Nationaal Instituut voor Subatomaire Fysica in Amsterdam) voor hun kritische commentaar op de eerste versie van het manuscript. Prof. Dr. Frank Linde, directeur van Nikhef, dank ik voor stimulerende gesprekken en een rondleiding op CERN.

Govert Schilling
juli 2012

DE TAAL VAN DE NATUUR

In een hol onder de grond woonde een hobbit.

Dat is de eerste zin uit *De hobbit* van J.R.R. Tolkien, in de onvolprezen vertaling van Max Schuchart. Een lekkere compacte zin, vol verwachting en betekenis, met een goed ritme en een mooie klankkleur. Als lezer sta je meteen op scherp.

Zo'n zin laat er geen twijfel over bestaan: het geheel is meer dan de som der delen. Want de negen woorden in de zin zijn stuk voor stuk niet heel bijzonder, behalve dan misschien dat laatste woord 'hobbit', waaraan je als lezer aan het begin van het boek nog geen touw kunt vastknopen.

Het is de ordening van de woorden die betekenis en inhoud toevoegt. 'In een hol'. 'Onder de grond'. In een andere volgorde blijft er vrijwel niets van over. Sterker, de meeste andere volgordes zijn niet eens

toegestaan volgens de regels van de grammatica. 'Onder woonde grond een in hobbit de hol een' – daar haal je je proefwerk Nederlands niet mee.

Woorden zijn de bouwstenen van zinnen. Maar woorden bestaan zelf weer uit nóg kleinere bouwstenen – de letters. De hobbit-zin telt er 35. En letters hebben van zichzelf helemaal geen betekenis. Ze komen pas tot leven wanneer ze zijn samengevoegd tot woorden. Waar trouwens óók regels voor bestaan. Van een d, een g, een n, een o en een r kun je wel het woord 'grond' maken (en ook het woord 'drong'), maar 'gndro' en 'rodng' zijn verboden.

Elementaire deeltjes

De hobbit – en trouwens ook de vuistdikke trilogie *In de ban van de ring* – bestaat volledig uit afzonderlijke letters. Stuk voor stuk zonder betekenis. Veel zijn het er niet: het Nederlands kent maar 26 verschillende letters. Maar met die 26 verschillende bouwsteentjes kun je een onvoorstelbaar groot aantal woorden creëren, en wanneer die op hun beurt weer gerangschikt worden in zinnen, ontstaat er een verhaal.

Zo zit de natuur ook in elkaar. Alles om je heen is opgebouwd uit een klein aantal verschillende bouwsteentjes. Die hebben elk voor zich weinig om het lijf – ze hebben geen 'inhoud'. Die inhoud ontstaat pas wanneer de bouwsteentjes worden samengevoegd tot een groter geheel.

De 'letters' van de natuur zijn de elementaire deeltjes. Dat zijn de fundamentele bouwstenen van alle materie. De 'woorden' van de natuur zijn de atomen. Die zijn opgebouwd uit elementaire deeltjes, en net als bij echte woorden gelden daar strikte regels en voorschriften voor – de natuurwetten. De 'zinnen' in de tastbare wereld om ons heen zijn de moleculen. Moleculen bestaan uit één of meer atomen, die opnieuw volgens bepaalde regels en wetten aan elkaar gekoppeld zijn. En voeg je een heleboel moleculen bij elkaar, dan ontstaat er een 'verhaal', zoals een kiezelsteen of een roos.

Ook in de natuur geldt dat het geheel meer is dan de som der delen. Een elementair deeltje heeft geen kleur of geur, maar een roos kan vlammen en bedwelmen. Dat zit 'm allemaal in de manier waarop die allerkleinste bouwstenen zijn geordend in atomen en moleculen. Tegelijkertijd gaan al die eigenschappen van voorwerpen weer verloren wanneer je de rangschikking van de samenstellende moleculen en atomen verandert of tenietdoet.

Als je alle losse woorden in dit boekje op alfabetische volgorde zet, heb je geen idee meer van de inhoud. Hooguit zal vrij snel duidelijk zijn dat het om een Nederlandstalig boek over deeltjesfysica en over de jacht op het **Higgsdeeltje** gaat. En zou je alle *letters* van het boek op alfabetische volgorde zetten, dan blijft er van de betekenis helemaal niets meer over, en is zelfs de taal waarin het boek ge-

schreven is niet meer makkelijk te achterhalen.

Zo is het met die kiezelsteen en die roos ook. Ze bestaan uit heel verschillende moleculen ('zinnen') en atomen ('woorden'). Als je die allemaal op soort rangschikt, valt nog wel te achterhalen dat het ene voorwerp organisch is en het andere levenloos – een kiezelsteen bevat bijvoorbeeld geen DNA-moleculen. Maar peuter je alles uit elkaar tot op het niveau van elementaire deeltjes, dan blijken de kiezelsteen en de roos uit precies dezelfde 'inhoudsloze' bouwstenen te bestaan, en bovendien in vrijwel dezelfde relatieve hoeveelheden.

Taalles

Als je dit boekje leest, ben je de Nederlandse taal machtig. Je kent de 26 letters, je begrijpt de meeste regels voor woordvorming en zinsbouw, je hebt een flinke woordenschat, en je snapt het een en ander van grammatica. Dat is nogal wat allemaal, want een taal leren is niet makkelijk, en het aantal bouwstenen en mogelijke combinaties is onvoorstelbaar groot.

Als je wilt begrijpen hoe de natuur in elkaar steekt – en waarom de ontdekking van het Higgsdeeltje zo belangrijk is – moet je een nieuwe taal leren: de taal van de deeltjesfysica. Dat valt ook niet mee, maar het goede nieuws is dat het aantal gebruikte bouwstenen – althans op het eerste gezicht – véél kleiner is dan het aantal letters in het alfabet.

Het lijkt misschien onvoorstelbaar, maar álle tastbare en zichtbare voorwerpen in de wereld om je heen – de kiezelsteen op het strand en de roos in de tuin, het boekje dat je in handen hebt en de stoel waar je op zit, de hond van de buren en de sterren in het heelal – bestaan uit niet meer dan *drie* verschillende bouwsteentjes. De taal van de natuur wordt geschreven met slechts drie letters; drie elementaire deeltjes.

Ja, die drie elementaire deeltjes hebben namen gekregen. Natuurkundigen hadden ze Jan, Piet en Kees kunnen noemen, of Aap, Noot en Mies, maar ze hebben andere namen gekregen: de *up-quark*, de *down-quark* en het elektron. De namen zelf doen er eigenlijk niet zo veel toe; dat zijn maar etikettes, zodat we weten waar we het over hebben. Maar goed, zo heten ze dus – wen er maar vast aan.

Álles om je heen, van kikkervisjes in de sloot tot planeten bij andere sterren, bestaat uit *up-quarks*, *down-quarks* en elektronen. En verder niks. Ongevoelbaar dat je met zo'n klein aantal bouwsteentjes zo'n enorme verscheidenheid aan structuren kunt creëren!

Dat gaat als volgt. Quarks zijn heel sociaal. Ze kunnen niet goed alleen zijn. Het liefst gaan ze met z'n drieën door het leven, en dan bij voorkeur ook in gemengd gezelschap – anders is de verbintenis niet stabiel. Zulke compacte, gemengde trioetjes

worden kerndeeltjes (of nucleonen) genoemd. Met twee soorten quarks kun je ook maar twee soorten gemengde triootjes maken: twee *up*-quarks en één *down*-quark vormen samen een proton; twee *down*-quarks en één *up*-quark vormen samen een neutron. Protonen en neutronen heten kerndeeltjes omdat de kernen van atomen eruit zijn opgebouwd. Elk atoom bestaat uit zo'n kern, met daaromheen een wolk van elektronen – het derde bouwsteentje. Lichte atomen hebben weinig protonen, neutronen en elektronen; zware atomen hebben er juist veel. In de natuur komen 92 verschillende atomen voor (van het lichte waterstof tot het zware uranium), elk met verschillende eigenschappen.

Met slechts drie elementaire deeltjes kun je dus al 92 verschillende atomen maken. En als je die atomen weer samenvoegt tot moleculen, is het aantal mogelijkheden vrijwel onbegrensd. Vandaar die grote verscheidenheid in de natuur.

Oké, dat was de eerste taalles. Je was al gewaarschuwd: het valt niet mee, maar wees eerlijk – zo ingewikkeld is het nou ook weer niet. Neem bijvoorbeeld zwavelzuur (H_2SO_4). Dat is een molecuul dat is opgebouwd uit twee waterstofatomen (H, van *hydrogen*), één zwavelatoom (S, van *sulphur*) en vier zuurstofatomen (O, van *oxygen*). Een waterstofatoom is heel licht: de kern bestaat uit één enkel proton, met daaromheen één elektron. Een zuurstofatoom is zwaarder (acht protonen en acht

neutronen in de kern, met daaromheen acht elektronen); een zwavelatoom is nog eens twee keer zo zwaar (zestien protonen, zestien neutronen en zestien elektronen).

Een beetje rekenen leert dat een zwavelzuurmolecuul in totaal 50 protonen, 50 neutronen en 50 elektronen telt, verdeeld over zeven atomen. En aangezien protonen en neutronen elk uit drie quarks zijn opgebouwd, bestaat het zwavelzuurmolecuul uit 350 elementaire deeltjes: 150 *up*-quarks, 150 *down*-quarks en 50 elektronen. Zwavelzuur is dus een 'zin' die uit zeven 'woorden' met in totaal 350 'letters' bestaat. Zo'n rekensom kun je voor elk molecuul in de natuur uitvoeren.

Extra deeltjes

'Qui craint de souffrir, il souffre déjà de ce qu'il craint' is andere koek dan *'Papa fume une pipe'*. En net als het Frans is ook de taal van de natuur toch wat ingewikkelder als je er iets verder in verdiept. Zo bestaat er – naast de *up*-quark, de *down*-quark en het elektron – nog een vierde bouwsteen, die gek genoeg niet gebruikt wordt bij de 'bouw' van atomen en moleculen. Het is een beetje alsof het alfabet een extra letter kent die in geen enkel woord, in geen enkele zin en in geen enkel boek voorkomt. Die vierde elementaire bouwsteen van de natuur is het **neutrino**.

Elektronen en neutrino's zijn bijzonder lichte deel-

tjes – ze wegen veel minder dan quarks. Samen worden ze **leptonen** genoemd. Daarmee vallen de vier 'letters' van de natuur in twee groepen uiteen: quarks en leptonen. Vergelijk het maar met de klinkers en de medeklinkers in het alfabet.

En het wordt nog gekker: naast deze 'familie' van vier bouwstenen bestaan er nog twee vergelijkbare 'generaties'. Het is alsof je kennis hebt gemaakt met het 'gewone' alfabet (a b c d e ...), en vervolgens tot de ontdekking komt dat er ook nog een cursief alfabet (*a b c d e ...*) en een vet alfabet (**a b c d e ...**) bestaat.

De quarks en leptonen in de tweede generatie zijn zwaarder dan die in de eerste generatie, en de deeltjes in de derde generatie zijn nóg weer zwaarder. In de natuur komen ze vrijwel niet voor: zodra ze ergens ontstaan (bijvoorbeeld in een deeltjesversneller) vervallen ze meteen weer tot hun lichtere soortgenoten. Wat dat betreft is de natuur als een e-mailbericht dat in 'platte tekst' (zonder opmaak) is geschreven – dat bevat ook geen cursieve of vette letters, ook al weten we dat die wel kunnen bestaan.

Met drie deeltjesgeneraties zitten we inmiddels dus al op twaalf verschillende elementaire bouwstenen. Maar dan zijn we er nog niet, want elk elementair deeltje heeft ook een bijbehorend antideeltje, met bijvoorbeeld een tegenovergestelde

elektrische lading. Om bij de alfabetvergelijking te blijven: alle letters (ook de letters in de cursieve en de vette 'generaties') hebben een bijbehorende tegenhanger: de hoofdletter. Dus naast (abc), (abc) en (abc) kennen we ook (ABC), (ABC) en (ABC).

Antimaterie komt ook niet zo maar in de natuur voor. Het e-mailbericht van de natuur is dus niet alleen in platte tekst geschreven, maar ook helemaal in kleine letters. Maar als we de antimaterie meerekenen, is het totaal aantal elementaire deeltjes wel opgelopen tot maar liefst 24. Die 24 elementaire deeltjes – de 'letters' van de natuur – worden **fermionen** genoemd.

Standaardmodel

Begint het al een beetje te duizelen? Geen nood: de meeste fermionen kunnen alleen in deeltjesversnellers geproduceerd worden, en hebben maar een héél korte levensduur. In feite heb je er in het dagelijks leven nooit wat mee te maken. Nogmaals: alle zichtbare voorwerpen in de wereld om je heen bestaan maar uit drie verschillende elementaire bouwstenen: de *up*-quark, de *down*-quark en het elektron. Dat klinkt nu opeens aangenaam overzichtelijk.

Maar wacht, we zijn nog één ding vergeten. Tot nu toe hebben we het alleen nog maar over de fermionen gehad: de quarks, elektronen en neutrino's van de drie verschillende generaties, en hun res-

pectievelijke antideeltjes. Maar behalve fermionen bestaan er ook **bosonen** – elementaire deeltjes van een totaal andere orde. Als de fermionen de *letters* van de natuur zijn, zou je de bosonen kunnen omschrijven als de *cijfers* – een klasse apart, maar ze maken deel uit van hetzelfde toetsenbord waarmee de taal van de natuur wordt getypt.

Bosonen zijn geen materiedeeltjes, maar krachtdeeltjes. Het zijn de 'dragers' van de fundamentele natuur**krachten** waar alle deeltjes aan onderworpen zijn. Die krachten zijn de elektromagnetische kracht, de sterke kernkracht en de zwakke kernkracht. (De vierde fundamentele natuurkracht, de **zwaartekracht**, maakt opmerkelijk genoeg geen deel uit van het zogeheten Standaardmodel van de deeltjesfysica.)

Het bekendste boson is ongetwijfeld het foton (het 'lichtdeeltje'), de drager van de elektromagnetische kracht: alle elektromagnetische verschijnselen in de natuur gaan gepaard met de uitwisseling van fotonen. Op vergelijkbare wijze wordt de zwakke kernkracht gecommuniceerd door drie bosonen (de positief geladen W^+ , de negatief geladen W^- , en de neutrale Z^0), en is de sterke kernkracht het resultaat van de uitwisseling van acht verschillende gluonen ('lijmdeeltjes'). In totaal zijn er dus twaalf verschillende krachtdeeltjes.

Alle elementaire deeltjes in het Standaardmodel zijn in de afgelopen decennia ontdekt en nauwkeurig opgemeten. *Alle* deeltjes? Nee, één enkel boson