

KERNENERGIE

Uitgeverij Academia Press
Ampla House
Coupure Rechts 88
9000 Gent
België

www.academiapress.be

Uitgeverij Academia Press maakt deel uit van Lannoo Uitgeverij,
de boeken- en multimediativisie van Uitgeverij Lannoo nv.

ISBN 978 94 014 8021 5 – D/2021/45/404 – NUR 740/910

Didier De Buyst
Kernenergie. Geschiedenis, opportuniteiten en uitdagingen
Gent, Academia Press, 2021, 112 p.

Eerste druk, 2021
Vormgeving cover: Studio Lannoo
Vormgeving en zetwerk binnenwerk: Studio Lannoo

© Didier De Buyst & Uitgeverij Lannoo nv, Tielt

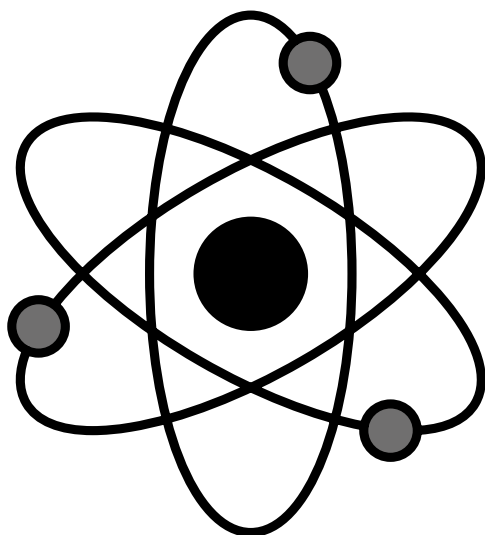
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden
verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk,
fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder
voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.



Didier De Buyst

KERNENERGIE

**Geschiedenis, opportuniteiten
en uitdagingen**




ACADEMIA
PRESS

Opgedragen aan Hergé, geestelijke vader van Kuifje, die in *Raket naar de Maan* op de meest bevattelijke wijze ooit de werking van een fissiereactor heeft uitgelegd

De royalty's van dit boek worden geschonken aan Rad4Med.be (www.rad4med.be), het Belgisch netwerk voor stralingstoepassingen in de geneeskunde.

De figuur op de kaft illustreert de lithium-6-isotoop (${}^6\text{Li}$). Die kan als bron dienen voor de aanmaak van tritium (${}^3\text{H}$), dat op zijn beurt als grondstof gebruikt wordt in een fusiereactor.

INHOUD

DANKWOORD	7
IN MEMORIAM	9
PROLOOG.	
A LONG TIME AGO, IN A PLACE FAR, FAR AWAY	11
Big Bang Theory, Belgisch van oorsprong	12
Wondere wereld van het oneindig kleine	16
Elementaire deeltjes: legoblokken	19
1 DOING THE NEUTRON DANCE	23
Atomen: Lego Technics	23
Radioactief verval: ever and forever	27
$E = mc^2$ en alles wordt mogelijk	29
Nucleaire bindingsenergie als gamechanger	33
Kettingreacties: omvallende domino's en pandemieën	35
Nucleaire kettingreacties: botsende biljartballen	36
2 MANHATTAN - CHICAGO - LOS ALAMOS	47
Hongaarse mars	47
Een brief uit 1939 die de wereld zou veranderen	51
Geboren in een voetbalstadion	54
CP-1: een blok grafiet, meer was het niet	57
Union Minière du Haut-Katanga, en daar stond België plots	65
Trinity en daarna was niets meer hetzelfde	66

3 THE REALM OF ENGINEERS	69
Watt verandert de wereld	69
De Carnotstraat in Antwerpen	70
Draaien met Parsons	71
Tesla, dat is toch een wagen?	72
De Nautilus, maar niet die van Jules Verne	75
Shippingport, Pennsylvania: succes van de PWR	77
Westinghouse vs. General Electric: 2-0 of knock-out?	83
MOX, en België was weer eens nummer één	84
Tezelfdertijd, elders in de wereld...	85
4 NOT IN MY BACKYARD?	87
Koolstofvrij of koolstofarm?	87
PWR-centrale:	
proven technology and proven track record	88
Elektriciteitsopwekking is slechts één toepassing	92
Kernafval in perspectief	94
EPILOOG. BACK TO THE FUTURE	97
Gen. IV: a New Hope	97
ITER: financieel zwart gat of hoorn des overvloeds?	100
LTO: mythe of realiteit?	102
SMR: een centrale in zakformaat	104
MEER WETEN	107
AFKORTINGEN	108
EINDNOTEN	109

DANKWOORD

Zonder

- ▶ de oude Grieken, die de basis hebben gelegd van de wiskunde;
- ▶ de Romeinen, die hebben bewezen dat de mens grootse dingen kan realiseren voor zover de wil er is;
- ▶ de filosofen en de kunstenaars uit de renaissance, die ons van het obscurantisme hebben bevrijd;
- ▶ de natuurkundigen, die sinds de 18de eeuw op onvermoeibare wijze de grenzen verleggen;
- ▶ de ingenieurs, die dag in dag uit met passie werken aan het bouwen van een betere wereld;
- ▶ de bijna duizend wetenschappers en medewerkers van het SCK CEN, die ik zo bewonder en dankzij wie ons kleine land een wereldspeler in nucleaire techniek is én blijft;
- ▶ Eric van Walle, directeur-generaal van het SCK CEN, die ik het voorrecht heb gehad meer dan tien jaar geleden te ontmoeten en met wie ik de passie deel van toegepaste natuurkunde ten dienste van de mens;
- ▶ mijn studenten, die mij jong houden;
- ▶ mijn trouwe medewerkers Joris De Vriese, Johan Decorte en Ingrid Eelen, die ware steunpilaren zijn;
- ▶ mijn broer Jean-Luc, op wie ik altijd heb mogen rekenen;
- ▶ mijn schoonouders, dankzij wie ik meer tijd heb;
- ▶ mijn echtgenote Ann en onze dochters Sophie-Anne en Margaux, die mij elke dag opnieuw doen inzien dat er ook iets anders bestaat dan natuurkunde en engineering;

- en ten slotte mijn ouders, die mij zoveel hebben gegeven en zoveel kansen hebben geboden, en aan wie ik zoveel meer had willen teruggeven;

zou dit boek nooit geschreven zijn geraakt. Aan hen mijn welgemeende appreciatie en dank. Ik dank ook de medewerkers van het SCK CEN die mij bij de redactie te hulp zijn geschoten: Peter Baeten, Hamid Aït Abderrahim, Hildegarde Vandenhove, Christophe Bruggeman, Hans Vanmarcke en Nancy Van der Borgt.

Op de foto van links naar rechts:

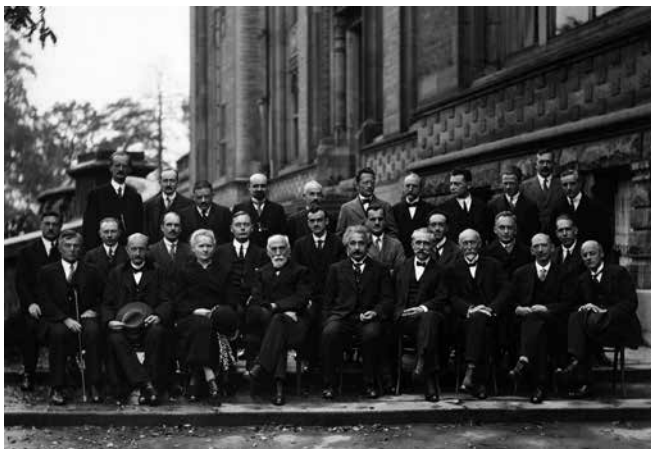
achterste rij: Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin
middelste rij: Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr

voorste rij (zittend): Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson

©Wikimedia Commons

IN MEMORIAM

In 1927 vond in Brussel de vijfde en beroemdste Solvayconferentie plaats, waarop de wereldtop van de natuurkunde verzamelen blies. Er werd vooral gediscussieerd over de toen nog jonge kwantumfysica. Zonder die briljante natuurkundigen zou de levensverwachting in de loop van de 20ste eeuw nooit zo fors zijn toegenomen. Zij verdienen onze allergrootste bewondering!



PROLOOG.

A LONG TIME AGO, IN A PLACE FAR, FAR AWAY

Nucleaire centrales zijn voor vele ingenieurs als de heilige graal: de bron van een eeuwigdurende energievoorziening en de kwintessens van alles waarin ze geloven en waarvoor ze zijn opgeleid, een vreedevolle toepassing van een verschrikkelijk wapen dat voor het eerst in 1945 werd gebruikt, de perfecte synthese van zowat alle disciplines uit de ingenieurswetenschappen en ten slotte de rechtstreekse omzetting van de ontdekkingen uit de theoretische fysica sinds Ampère, Volta, Faraday en vele anderen twee eeuwen geleden de natuurkunde een *quantum leap* hebben doen maken. President D. Eisenhower, voormalig opperbevelhebber en bedenker van Operation Overlord (D-day), sprak op 8 december 1953 de algemene vergadering van de VN toe: *'I feel impelled to speak today in a language that in a sense is new – one which I, who have spent so much of my life in the military profession, would have preferred never to use. That new language is the language of atomic warfare. (...) the United States pledges (...) to devote its entire heart and mind to finding the way by which the miraculous inventiveness of man should not be dedicated to his death, but consecrated to his life.'* Het programma Atoms for Peace was geboren en de wereld betrad het tijdperk van energie-opwekking door kernreacties. Om de werking van zo'n kerncentrale begrijpelijk te maken moet ik zeer ver teruggaan

in de tijd, tot het grootste kosmische evenement ooit: de big bang. Van daaruit zal ik stapsgewijze het begrip ‘materie’ uiteenzetten en de equivalentie met energie, om vervolgens te komen tot de reactie tussen atoomkernen, iets waarmee we overigens dagelijks worden geconfronteerd: de zon is zowaar de dichtstbijzijnde kernfusiereactor. Zo zijn er in het Melkwegstelsel honderden miljarden zonnen en het heelal telt nog eens honderden miljarden sterrenstelsels als het onze (en wellicht veel meer). Dichter bij ons ervaren we elke dag de natuurlijke radioactiviteit. Wanneer in het ziekenhuis een radiografie wordt genomen, dan is dat een rechtstreekse toepassing van nucleaire fysica. Maar eerst gaan we 13,8 miljard jaar terug in de tijd.

Big Bang Theory, Belgisch van oorsprong

In den beginne was er niets, althans voor zover men vers [1,1] van Genesis erop naleest. Of men nu in het Scheppingsverhaal gelooft of niet, de schrijvers ervan waren destijds niet zo ver verwijderd van de realiteit, maar het zou enkele millennia duren alvorens men tot dat besef zou komen. Ons verhaal begint ergens in de tweede helft van de 19de eeuw. Het zal wellicht ongelooflijk klinken, maar het waren toen barre tijden voor natuurkundigen. Velen van hen waren de wanhoop nabij: binnenkort zouden ze geen werk meer hebben en zou hun bestaan futiel worden. Waarom? Omdat men toen dacht dat de natuurkunde zowat alles ontdekt had wat te ontdekken viel. Met de wetten van Newton een tweetal eeuwen voordien was de fysica, die toen niet als een volwaardige wetenschap werd beschouwd maar als een van de vele

toepassingsvelden van de wiskunde, in een stroomversnelling geraakt. Toen James Clerk Maxwell in 1861-1862 de geünificeerde theorie van elektromagnetisme publiceerde en Ludwig Boltzmann in 1877 het begrip 'entropie' introduceerde, dachten de fysici dat ze het nirwana hadden bereikt: voor alles hadden ze een uitleg en zelfs een mooi ogende theorie die ze dankzij het baanbrekende werk van wiskundigen als Laplace, Poisson, Euler, Lagrange, Cauchy en vele anderen in mooie wiskundige formules konden gieten. Helaas, driewerf helaas: er waren her en der enkele vervelende afwijkingen tussen de theorie en de waarnemingen waarvoor men geen deftige uitleg kon vinden, hoe goed men de theoretische berekeningen ook maakte en hoe nauwkeurig men de vaststelling ook deed. Een daarvan was de weliswaar kleine afwijking van de baan van Mercurius, een andere was wat fysici de zwarte straler noemden, een soort oven met zwart geschilderde wanden, waarvan de theorie tot onzinnige resultaten leidde. Twee personen zouden begin 20ste eeuw de fysica ondersteboven zetten: Max Planck, die in 1900 de wondere wereld van de kwantumfysica boven de doopvont hield, en Albert Einstein, die in 1905 niet alleen zijn theorie van het foto-elektrisch effect publiceerde, maar ook zijn speciale relativiteitstheorie om die in 1915 uit te breiden tot de algemene relativiteitstheorie. 1905 wordt dan ook het wonderjaar van de fysica genoemd.

Enkele jaren nadat Albert Einstein zijn baanbrekende artikel over de algemene relativiteitstheorie had gepubliceerd, werd hij op een internationale conferentie aangesproken door een Belgische kanunnik, Georges Lemaître, die aan de Université Catholique de Louvain niet alleen theologie en theosofie had gestudeerd, maar ook wis- en natuurkunde. Hij was daarin zeer bedreven, want ooit zou hij voorzitter worden

van de Pontificale Academie voor Wetenschappen. Lemaître was tot het onthutsende besluit gekomen, vertrekkende van de recente vaststelling door Edwin Hubble dat het heelal aan het uitdijen is, dat men evenzeer in de tijd kan terugkeren en het dan niet anders kan dan dat het heelal krimpt, iets wat linea recta volgde uit de wiskundige formules van Einsteins theorie. Dat leidde weliswaar tot een zogenaamde singulariteit, de reden waarom Lemaître ervan uitging dat het hele universum ontstaan was uit een enkel, zeer klein bolletje, dat hij dan ook het oeratoom noemde. Als we de overlevering mogen geloven, zou Einstein hem vriendelijk hebben laten verstaan dat hij helemaal niet enthousiast was door hem te zeggen dat *'your mathematics are perhaps right, but your physics is awful'*. De geschiedenis heeft geleerd dat dit een misser van formaat was,¹ want enkele decennia later bouwden kosmologen en astrofysici (onrechtstreeks²) verder op Lemaîtres idee. Fred Hoyle introduceerde de term 'Big Bang' als spottende benaming omdat hij de theorie niet lustte, maar zijn vondst is nu bij zowat iedere aardbewoner bekend, zeker na de gelijknamige sitcomreeks op tv.

Terug naar 13,8 miljard jaar geleden. Het heelal was toen amper groter dan een atoom, al is dat geen juiste voorstelling want dan beelden we ons een superzwaar bolletje in ergens in een grote lege ruimte. Dat is fout: aangezien alles in het bolletje zit, is er geen uitwendige ruimte eromheen. Ik besef dat het moeilijk is om dat te bevatten, maar denk eens aan het tweedimensionale analogon van ultradunne virussen die zich op een oppervlak bewegen: zij leven in twee dimensies (lengte en breedte) en voor hen is dat de ruimte waarin ze zich bevinden. Erger nog: ze weten niet eens dat de ruimte waarin ze leven gekromd is, want ze ervaren die als volledig

vlak, zoals op Fig. 1 wordt getoond. De derde dimensie in dat voorbeeld en het feit dat de 'ruimte' waarin de virussen leven gekromd is, kunnen wij, mensen, enkel zien omdat we driedimensionale wezens zijn. Welnu, tenzij iemand over bovennatuurlijke gaven beschikt en een vierde ruimtelijke dimensie zou kunnen ervaren, is er buiten het bolletje met daarin het hele heelal helemaal niets.

Maar waar bevond dat bolletje zich dan ergens? Wel, in zekere zin overal en nergens. Dat bolletje ergens in de ruimte willen situeren is zinloos, want buiten het bolletje is er geen ruimte. Indien een bepaald wezen de big bang had willen gadeslaan, dan had het ten minste over een vierde ruimtelijke dimensie moeten beschikken. Toegegeven: het had wellicht het mooiste vuurwerk ooit meegemaakt...

En wat zit er dan precies in dat bolletje? Wel, in zekere zin niets en alles: er zit geen materie in zoals we die dagelijks ervaren, maar een soort kosmische soep waarvan we tot op de dag van vandaag niet zeker zijn wat het precies is geweest.

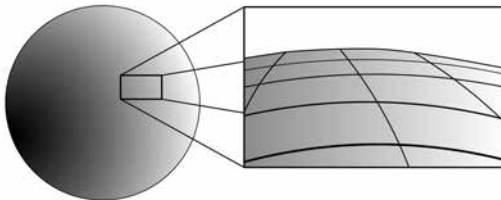


Fig. 1: tweedimensionale virussen in een gekromde 2D-ruimte zien de kromming niet; enkel driedimensionale wezens kunnen die zien

Over één ding is men het wel eens: het moet niet alleen bijzonder heet zijn geweest maar ook bijzonder exotisch, met allerhande bizarre kwantumfenomenen waarover we het in Hoofdstuk 1 nog zullen hebben. Feit is dat het bolletje plots met een reusachtige snelheid is beginnen uit te zetten (men spreekt over de inflatieperiode van het universum), waardoor het geleidelijk afkoelde. Toen werden de elementaire deeltjes gecreëerd waaruit de materie opgebouwd is zoals we die vandaag kennen. Men noemt dat de *baryogenese*. Toen het universum verder expandeerde en dus afkoelde, zijn die elementaire deeltjes met elkaar reacties aangegaan die tot lichte kernen (bijvoorbeeld deuterium³ en helium) hebben geleid, wat men de *nucleosynthese* noemt. Van daaruit, in een steeds maar verder uitdijend en afkoelend heelal, zijn sterren en sterrenstelsels ontstaan, die vervolgens afgestorven zijn om te worden herboren in nieuwe sterren (vandaar de naam supernova). Dat heeft er finaal toe geleid dat ook zwaardere kernen konden ontstaan, zoals uranium (U), dat in kerncentrales als ‘brandstof’ wordt gebruikt en waarover we het in dit boek uitgebreid zullen hebben.

Het onvoorstelbare verhaal van de big bang en wat zich afspeelde in het prille begin voor de zogenaamde plancktijd (10^{43} seconden), is nog steeds verre van uitgeklaard...

Wondere wereld van het oneindig kleine

De oersoep waarover we het zopas hebben gehad en waarvan ik gezegd heb dat ze exotisch was – overigens een sterk understatement – moet een nogal vreemde wereld zijn geweest die voor velen onder ons, zo niet voor iedereen, onbevattelijk is:

de wereld van het oneindig kleine waar koning Kwantum de scepter zwaait.

Kwantumfysica is een eerder jonge tak van de natuurkunde: ze zag het levenslicht in 1900 toen Max Planck, een toen al iets oudere Pruisische hoogleraar natuurkunde, een oplossing formuleerde voor het probleem dat reeds tientallen jaren vele fysici wakker hield, namelijk dat van de zwarte straler. Zoals hierboven gesteld, dacht men eind 19de eeuw dat men in de natuurkunde álles ontdekt had en dat wat nog kwam enkel maar zou bestaan in het steeds verder verfijnen en beter maken van de toen geldende theorieën. Toch was er één vraagstuk waarvoor die theorieën geen voldoening gaven. Ze boden geen zinnige uitleg voor de experimentele vaststellingen wat betreft de zwarte straler van Wilhelm Wien, grondlegger van de stralingswetten. De klassieke theorieën leidden immers tot onzinnige resultaten. Planck opperde het idee dat energie zich enkel in de vorm van pakketten voordoet, waaraan hij de naam kwantum (van het Latijnse *quantum*, dat 'hoeveelheid' betekent) gaf, zonder goed te beseffen dat hij hiermee een van de grondleggers werd van de kwantumfysica. Enkele jaren later publiceerde Einstein in 1905 zijn speciale relativiteitstheorie met daarin de equivalentie tussen massa en energie ($E = mc^2$), waarover we het in Hoofdstuk 1 zullen hebben. Heel de natuurkunde stond op haar kop! Een revolutionaire wind blies door alle faculteiten en laboratoria ter wereld. De Gouden Generatie van fysici met Bohr, Dirac, Heisenberg, Born, Schrödinger, Pauli, de Broglie, Curie en vele anderen zou alles op stelten zetten. Eigenaardig genoeg behoorde Einstein daar niet toe, hoewel hij in 1921 de Nobelprijs Natuurkunde voor het foto-elektrisch effect had gekregen.⁴ Hij was immers geen grote fan van de kwantumfysica,

niet zozeer vanwege het begrip 'kwantum' (energiepakket), maar omdat hij niet geloofde in een wereld waarin toeval zo'n grote rol speelt, zoals we hierna zullen zien. Hij zou gezegd hebben: 'God dobbelt niet.' Dat weerhield hem evenwel niet om deel te nemen aan de opeenvolgende Solvayconferenties, door de Belgische industrieel Ernest Solvay in 1911 gesticht, waarop de fine fleur van de natuurkunde verzamelen blies.

Wat Planck wellicht nooit had verwacht, is dat de introductie van het begrip 'energiekwantum' zou leiden tot de ontdekking van een wereld waarin toeval zowat de enige drijvende kracht is en waarin paradoxen centraal staan. In 1927 formuleerde Werner Heisenberg, een van de geniaalste Duitse natuurkundigen ooit, het algemeen onzekerheidsbeginsel, dat stelt dat er paren van grootheden bestaan waarvoor geldt dat niet van beide grootheden de waarden tegelijkertijd exact vastgelegd of met een willekeurige mate van nauwkeurigheid bepaald kunnen worden. In mensentaal: des te nauwkeuriger we de ene grootheid meten, des te onnauwkeuriger we de andere grootheid te weten zullen komen. Dat was op zich al een flinke deuk in de deterministische visie die sinds Newton bestond. Tot overmaat van ramp publiceerde Erwin Schrödinger, een van de briljantste Oostenrijkse fysici ooit, zowat tegelijkertijd zijn theorie van de golffunctie, die kort gezegd stelt dat de positie van een elementair deeltje (bv. een elektron) niet exact in de ruimte kan worden bepaald, maar eerder moet worden gezien als de kans dat het zich op een welbepaalde plaats bevindt. En wie zegt 'kans', zegt 'toeval': alles draaide plots om het berekenen van waarschijnlijkheden, waar men er sinds Newton van overtuigd was dat, gegeven de correcte begin- en randvoorwaarden, de baan van elk elementair deeltje exact kon worden berekend. Niets was echter minder waar en de klassieke natuurkunde

ging dan ook in de eerste helft van de 20ste eeuw ten onder. Want gaandeweg werden alle voorspellingen uit de kwantumfysica een voor een experimenteel bewezen. In de tweede helft van de 20ste eeuw kwam het zogenaamde Standaardmodel tot stand, dat nog steeds geldig is en waarover we het zo meteen zullen hebben. Toch heeft dit model ook zijn beperkingen, al was het maar omdat men daarin de rol van de zwaartekracht niet kan opnemen en omdat men er nog steeds niet in geslaagd is om tot een kwantumachtige formulering van Einsteins zwaartekrachttheorie te komen. Men doet hiervoor verwoede pogingen, onder meer via de theorie van snaren en branen, maar dat zijn tot op heden slechts zuiver theoretische modellen waarvoor geen experimenteel bewijs bestaat.

Ik zie de lezer de wenkbrauwen fronsen door zich af te vragen waarom hij dan nooit al die vreemde fenomenen heeft ervaren. In zekere zin gelukkig voor ons, doen kwantumfenomenen zich enkel voor op atomaire en subatomaire schaal, maar ze bepalen wel ons leven, veel meer dan we beseffen.⁵ De moderne elektronica (pc, gsm, gps e.d.) zou nooit tot stand zijn gekomen zonder grondige kennis van kwantumverschijnselen en binnenkort zullen we werken met kwantumcomputers, waarbij onze actuele supercomputers zullen verbleken qua rekenkracht.

Elementaire deeltjes: legoblokken

Tijdens de oerknal (alternatief Nederlands woord voor 'big bang') ontstonden, zoals we hierboven zagen, tal van elementaire deeltjes. Zoals zijn naam het zelf al laat vermoeden, is een elementair deeltje een deeltje dat niet in andere deel-

tjes op te splitsen is. Een voorbeeld hiervan is – in de huidige modellen – een elektron (ook soms wel een bètadeeltje genoemd). In de natuurkunde wordt een elementair deeltje geacht geen inwendige structuur te hebben, aangezien het niet samengesteld is uit nog kleinere deeltjes. Alle grotere deeltjes zijn samengesteld uit elementaire deeltjes.

In het Standaardmodel zijn er drie types van elementaire deeltjes: quarks, leptonen en bosonen (die laatste worden ook wel 'mediatoren' of 'bemiddelaars' genoemd omdat ze zorgen voor de overbrenging van een kracht tussen deeltjes). Samen vormen ze de basisbouwstenen van de natuur. In zekere zin zijn het een soort legoblokken waaruit alles gemaakt is, maar zoals altijd is het complexer dan dat. Sommige deeltjes maken de materie en andere zorgen ervoor dat een kracht kan worden overgebracht. Van leptonen en quarks bestaan dan nog eens verschillende generaties. Zo komen quarks in zes types voor – *up, down, charm, strange, top* en *bottom* – en samen combineren ze zich tot protonen en neutronen. Bosonen (ook soms wel ijk-bosonen genoemd) zijn deeltjes die verantwoordelijk zijn voor drie van de vier fundamentele krachten. Ze werden genoemd naar de Indiase natuurkundige Satyendra Nath Bose.⁶ Fotonen zijn als het ware de bemiddelaars voor de elektromagnetische kracht die de elektronen aantrekt tot de protonen waaruit de atoomkernen zijn opgebouwd. Gluonen zijn de bemiddelaars voor de sterke kernkracht waardoor de quarks in protonen en neutronen worden samengehouden en de W- en Z-bosonen doen dat voor de zwakke kernkracht, die verantwoordelijk is voor bepaalde vormen van radioactiviteit. Ten slotte is er het higgsboson, dat reeds in 1964 voorspeld werd maar pas in 2012 experimenteel kon worden vastgesteld en waarvoor de Belg François Englert samen met de Brit

Peter Higgs de Nobelprijs Natuurkunde in 2013 ontving.⁷ Het higgsdeeltje is van een zeer speciaal type en zorgt er in wezen voor dat materie haar massa verkrijgt. Fig. 2 toont alle elementaire deeltjes op bevattelijke wijze.

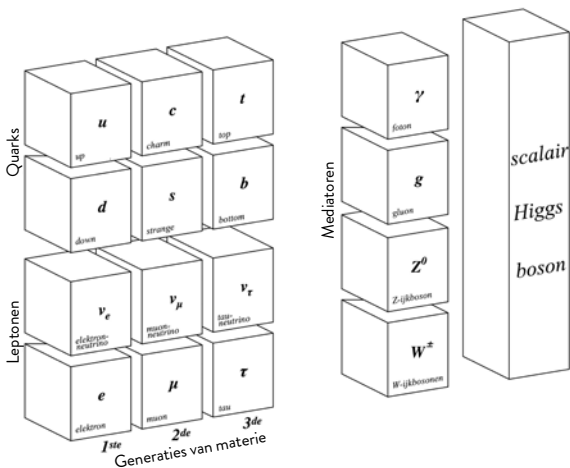


Fig. 2: de zeventien elementaire deeltjes.

De situatie die in Fig. 2 wordt geschetst is evenwel sterk vereenvoudigd. Zo zijn er in wezen acht verschillende gluonen en met elke quark (waarvan er dan nog eens drie verschillende 'kleuren' bestaan) en lepton is een antideeltje (zgn. antimaterie) geassocieerd. Dus gaat het in totaal om 6 quarks x 2 x 3 + 6 leptonen x 2 + 1 foton + 8 gluonen + 3 ijkbosonen (Z^0 , W^+ en W^-) en het scalair higgsboson = 61 elementaire deeltjes.