

## Wetenschapsagenda (2a): Bouwstenen van materie

*Sinds 2015 heeft Nederland een Nationale Wetenschapsagenda: een lijst van 140 vragen die het wetenschappelijk onderzoek in Nederland in de komende jaren een richting moeten geven. De komende maanden bespreken we zeven van deze vragen die goed bij de thema's van de Quantum Universe-website passen.*

Vandaag:

*Kennen we alle elementaire bouwstenen van materie?*



Afbeelding 1. Kennen we alle elementaire bouwstenen van materie? Weten we precies uit welke 'legoblokjes' de materie in het heelal is gemaakt, of ontbreken er nog steentjes? Foto: [Semevent](#) (CC0).

Deze vraag wordt deze en komende week besproken door [Ivo van Vulpen](#), deeltjesfysicus aan

het Nikhef, die onderzoek doet met de Atlas-detector van de LHC-deeltjesversneller op het CERN in Genève.

---

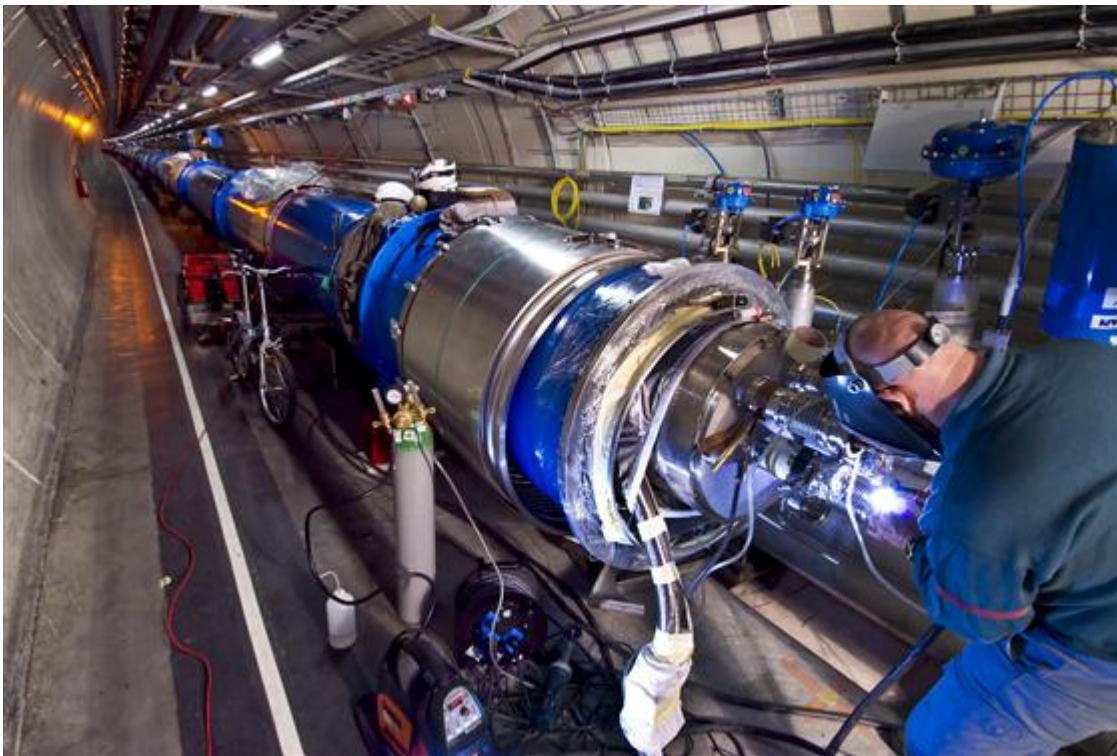
Kennen we alle elementaire bouwstenen van materie? Jeetje, lastige vraag. We weten het eerlijk gezegd niet. Hoewel we de afgelopen honderd jaar steeds verder zijn doorgedrongen tot het hart van alle materie, en we nu denken alle bouwstenen van de stoffen die we kennen hebben geïdentificeerd, weten we niet zeker of we op het diepste niveau zijn aangeland. Er is geen noodzaak voor een nieuwe laag en als we alle fenomenen in de natuur bekijken, dan lijkt de puzzel die we nu hebben compleet te zijn. En toch zit er iets niet lekker. Er zijn een paar dingen die wringen en die erop lijken te wijzen dat er 'nog meer is' dan we nu denken te kennen. Nieuwe deeltjes dus, nieuwe natuurkrachten, of nieuwe fenomenen.

Ik zal in dit artikel een kort overzicht geven van de elementaire deeltjes zoals we ze nu kennen. In het volgende artikel, dat volgende week verschijnt, zal ik een aantal dingen bespreken die we niet begrijpen en zullen een aantal van de nieuwe deeltjes die we de komende jaren hopen te ontdekken de revue passeren.

## De elementaire bouwstenen

We weten sinds een jaar of vijftig dat alle unieke stoffen die we kennen op aarde, van goud tot zuurstof en van koolstof tot uranium, opgebouwd zijn uit maar drie fundamentele bouwstenen. Drie! Twee quarks en een elektron, om precies te zijn. En dat betekent dus gelijk dat ook echt alles op aarde is opgebouwd uit diezelfde drie unieke bouwstenen: het computerscherm waar je nu naar kijkt, maar ook pindakaas, zand, gras, bier, de lucht, bloemen, de stropdas van Mark Rutte en de gel in het haar van Wilfred Genee. Echt alles. Sterker nog: omdat ook sterren en planeten zijn opgebouwd uit dingen die we op aarde kennen, betekent het dat alles in het heelal een grote puzzel is met maar drie verschillende puzzelstukjes.

Elke stof die we kennen heeft een kleinste bouwsteen, die we *atoom* noemen. Die kleinste bouwstenen zijn zo klein, kleiner dan een miljardste meter, dat we ze niet met het blote oog kunnen zien. Met behulp van deeltjesversnellers (sterke microscopen) is het ons toch gelukt om door te dringen tot die wereld en die nauwkeurig in kaart te brengen. Zo'n honderd jaar geleden werd zo duidelijk dat, hoewel elke stof unieke eigenschappen heeft, elk atoom zelf ook opgebouwd is uit drie bouwstenen: neutronen en protonen in de kleine kern van het atoom en op grote afstand daaromheen een zwerm van elektronen. Dat was een enorme stap, want op dat moment ging het aantal elementaire deeltjes in één keer terug van ongeveer honderd naar deze drie unieke bouwstenen.



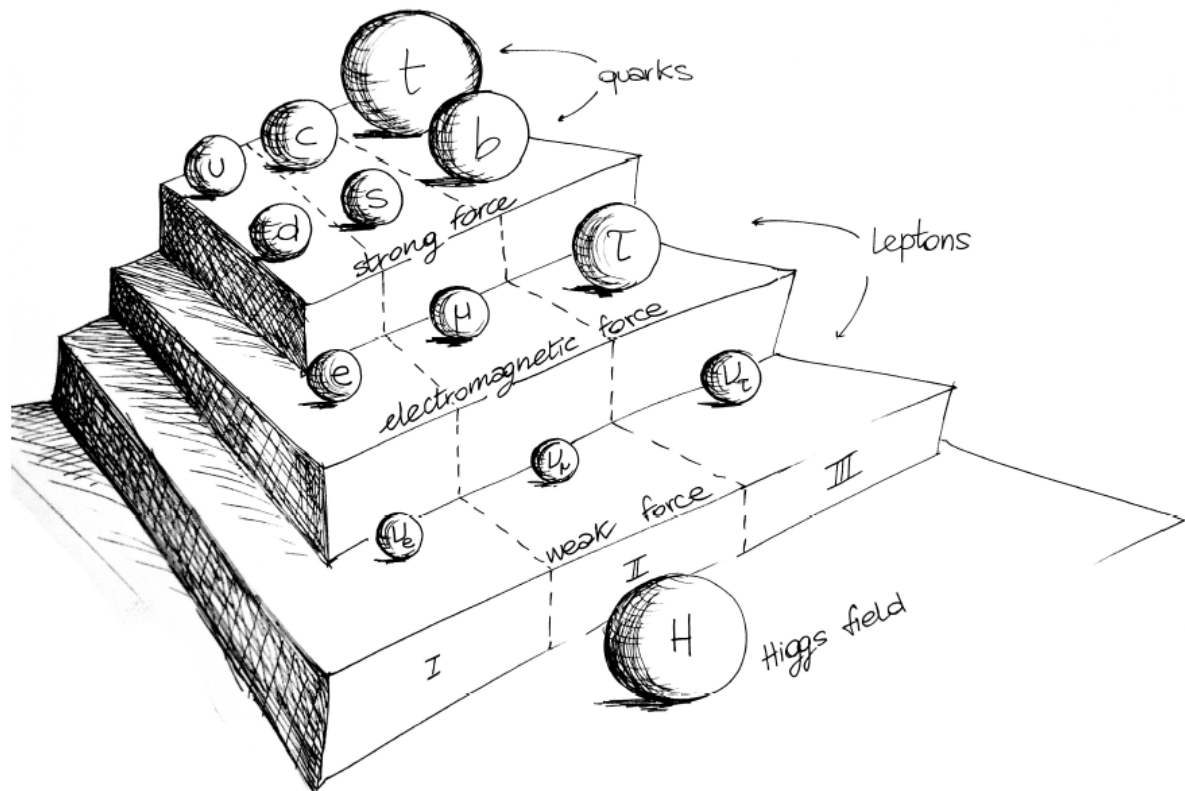
Afbeelding 2. De LHC-deeltjesversneller. Een klein stukje van de enorme, 27 kilometer lange deeltjesversneller op het CERN in Genève. Met dergelijke deeltjesversnellers ontdekken we steeds nieuwe eigenschappen van de bouwstenen van de materie. Foto: CERN.

In de jaren zestig lukte het wetenschappers om ook 'in' de kerndeeltjes te kijken en daar bleek dat de protonen en neutronen niet ondeelbaar waren, maar ook zelf weer opgebouwd

waren uit nog kleinere deeltjes: *quarks*.

Naast de twee quarks en het elektron bleek er nog een vreemde vogel te bestaan: het *neutrino*. Dat deeltje kun je dan wel niet 'echt' zien, maar net zoals je uit pootafdrukken op bospaden kunt herleiden dat er herten in het bos rondlopen, zonder ze ooit 'echt' te zien, zo werd bij het bestuderen van natuurkundige fenomenen ook duidelijk dat er zo'n nieuw deeltje zou moeten zijn. Een deeltje met zúlke vreemde en unieke eigenschappen (die bijvoorbeeld zorgen dat het door de aarde heenvliegt zonder er iets van te merken) dat het nog jaren zou duren voor het lukte om het bestaan ervan ook direct aan te tonen. Net zoals de twee quarks bij elkaar bleken te horen, omdat ze via de zwakke kernkracht aan elkaar verbonden bleken te zijn, zo vormde ook het elektron en het neutrino (deeltjes die we *leptonen* noemen) een onafscheidelijk koppeltje. Deze vier deeltjes, opgesplitst in twee koppeltjes, vormen de zogenaamde *eerste familie*.

Als ik het hierboven over de 'eerste' familie heb, weet je al dat er meer families zijn. En inderdaad: bij het bestuderen van de wereld van de elementaire deeltjes bleek dat er niet één maar drie families van deeltjes zijn. Net als de eerste familie waren ook deze families opgebouwd uit twee quarks en twee leptonen. Deze wereld was lang verborgen gebleven, omdat deze deeltjes vaak minder dan een miljardste van een seconde leven, maar ook omdat ze veel zwaarder zijn dan hun collega's uit de eerste familie en je ze dus niet zomaar kunt maken in deeltjesbotsingen. Uiteindelijk levert dit het beeld op dat we nu kennen: drie deeltjesfamilies die elk uit twee quarks en twee leptonen bestaan.



Afbeelding 3. De drie families van deeltjes en het Higgsboson. Afbeelding uit het proefschrift van Serena Oggero (Nikhef, LHCb).

De eigenschappen van bovenstaande deeltjes zijn bekend en alles wat we leren, schrijven we keurig bij in het grote [Particle Data Book](#). De drie families vormen eigenlijk nog maar de helft van de elementaire bouwstenen, want voor elk deeltje is er nog een extra kopie, het zogenaamde *antideeltje*. Naast een elektron is er dus ook een anti-elektron, en er zijn ook anti-neutrino's en anti-quarks. Deze antideeltjes hebben bijna al hun eigenschappen hetzelfde als hun materie-tegenhanger, en in deeltjesexperimenten worden ze even vaak geproduceerd. Dat er toch zo'n magische en mysterieuze sfeer om antimaterie hangt, is omdat het op aarde en de rest van het heelal niet lijkt voor te komen – maar daar kom ik in deel 2 van dit artikel nog op terug.

De structuur van de elementaire deeltjes is compact, overzichtelijk en heeft alles wat je van een classificatie mag verwachten. Alle deeltjes die we in experimenten hebben waargenomen hebben een plek, en er zijn niet alleen geen 'gaten', maar minstens net zo belangrijk: er zijn ook geen deeltjes die níét in dit patroon opgenomen kunnen worden. Alles past.

En toch knaagt het...

## De natuurkrachten zoals we ze nu kennen

Dat drie bouwstenen het zichtbare heelal kunnen opbouwen, met alle complexe fenomenen die we kennen, is het gevolg van de manier waarop de deeltjes interactie met elkaar hebben: elkaar afstoten, aantrekken of op een andere manier met elkaar communiceren. Die dynamiek wordt volledig gedreven door de eigenschappen van de deeltjes en de natuurkrachten. En ook hiervan denken we dat we het allemaal redelijk goed in kaart gebracht hebben. Zo 'snappen' we de vreemde fenomenen en wetten in de wereld van de elementaire deeltjes, zoals de quantummechanica en de relativiteitstheorie, en hebben we ontdekt dat er op het laagste niveau maar drie natuurkrachten zijn die het gedrag van de deeltjes bepalen: *elektromagnetisme*, de *zwakke kernkracht* en de *sterke kernkracht*. (De zwaartekracht speelt op dit niveau geen enkele rol van betekenis!)

Voor elk van deze krachten is het ook gelukt een beschrijving (een theorie) te formuleren op quantumniveau, waarin de communicatie tussen de deeltjes verloopt via het uitwisselen van zogenaamde boodschapper- of krachtdeeltjes. Van de eigenschap 'elektrische lading' en bijbehorende elektromagnetische kracht, leren we op school het basisprincipe dat deeltjes die dezelfde (verschillende) lading hebben elkaar afstoten (aantrekken). In de quantummechanische beschrijving van diezelfde kracht weten we nu dat dat gebeurt door de uitwisseling van de krachtdeeltjes van die kracht: fotonen. Maar naast elektrische lading hebben deeltjes nog twee eigenschappen die van belang zijn voor hun communicatie met andere deeltjes, namelijk '*zwakke isospin*' en '*kleur*'. Die eigenschappen zijn gekoppeld aan respectievelijk de zwakke en de sterke kernkracht. Ook daar zijn er krachtdeeltjes, de W- en Z-bosonen (zwakke kracht) en de gluonen (sterke kracht), die dicteren hoe deeltjes op elkaar

reageren.



Afbeelding 4. Krachten. De kracht waarmee een magneet een stuk metaal optilt is een voorbeeld van de elektromagnetische kracht, één van de drie natuurkrachten die voor de interacties tussen elementaire deeltjes een belangrijke rol spelen. Foto: [Eurico Zimbres](#), FGEL/UERJ.

Het gaat te ver om de wiskundige structuur en alle eigenaardigheden van elk van de krachten in detail uit te werken, maar wat wel belangrijk is om te zeggen, is dat blijkt dat elk van de krachten te beschrijven is met behulp van een enkele wiskundige *symmetrie*. Die symmetrie voorspelt niet alleen *alle* geobserveerde fenomenen in het gedrag van de bekende deeltjes, maar voorspelt ook géén dingen die we niet herkennen in onze experimenten. We begrijpen bijvoorbeeld dat de zwakke kernkracht en de sterke kernkracht

alleen op zeer korte afstanden werken, hoe deeltjes en antideeltjes kunnen samensmelten, en hoe een elektron in een neutrino kan veranderen. Kortom, we zijn erg blij met onze formulering van de natuurkrachten!

En toch knaagt het...

## Het Higgsboson

Een van de grootste ontdekkingen van de laatste jaren was de ontdekking van het *Higgsboson*. Dit deeltje hoort én niet bij de bouwstenen van de materie, én niet bij de krachtdeeltjes, maar is wel de sleutel die ervoor zorgt dat het bouwwerk dat de elementaire deeltjeswereld beschrijft, het *Standaardmodel*, stabiel staat. Het Higgsveld, waarin de Higgsdeeltjes als kleine ‘trillingen’ voorkomen, blijkt op elke plek in het heelal aanwezig te zijn. Andere deeltjes ‘voelen’ dat en krijgen er massa door. Cruciaal, want zonder massa zouden deeltjes in het heelal nooit samengeklonterd zijn tot bijvoorbeeld de aarde en de zon. Toch essentieel voor de leefbaarheid van het heelal voor ons als mensen.

Dat de zwakke kernkracht alleen een rol speelt op afstanden ter grootte van een atoomkern is ook een directe consequentie van de massa die de krachtdeeltjes van die kracht hebben. En hoe krijgen ze die massa? Inderdaad, van het Higgsboson. De ontdekking van dit Higgsboson, het deeltje dat in alle facetten op de achtergrond alles soepel laat verlopen in het Standaardmodel, is de kers op de taart van dat model. En van ons begrip van de natuur.

En toch knaagt het...

---

*Wat knaagt er dan precies in dit zo mooie model van deeltjes en krachten? Dat lees je volgende week, in [het tweede deel](#) van dit artikel.*