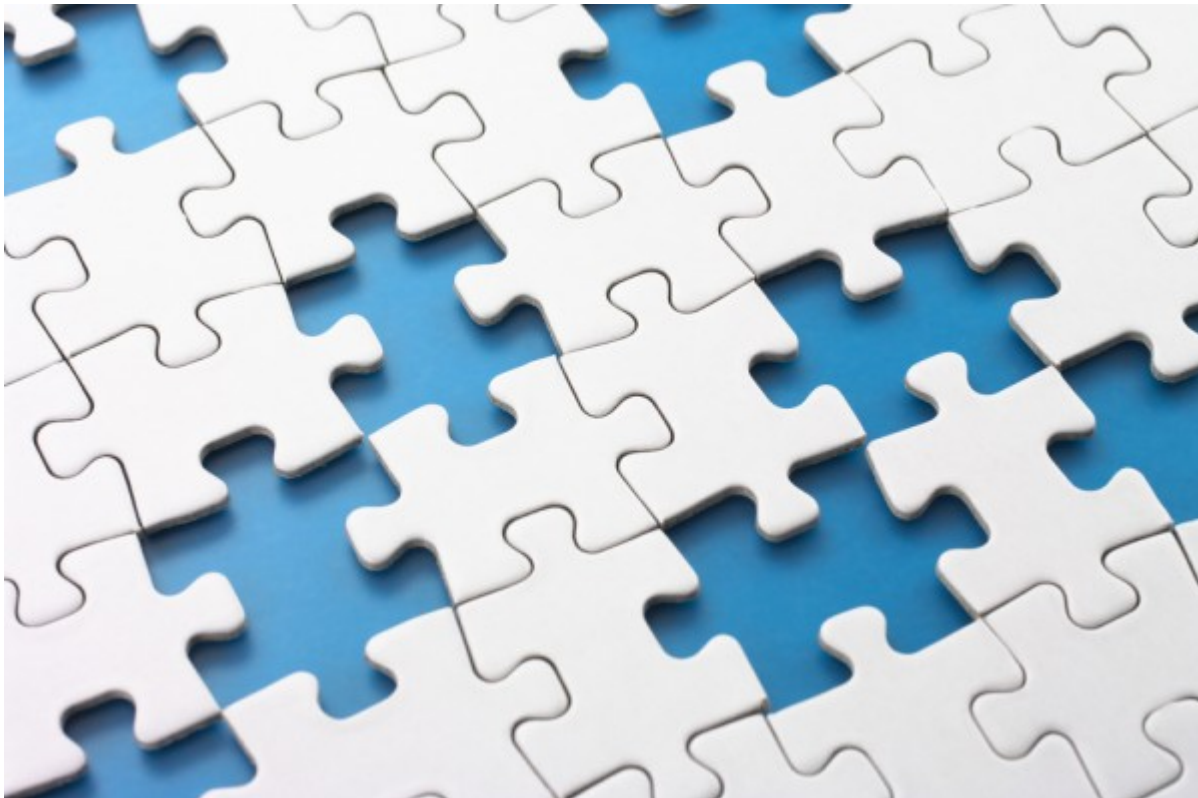


# Wetenschapsagenda (2b): Bouwstenen van materie

**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? Veel van de bouwstenen kennen we, maar het is goed mogelijk dat we nog wat puzzelstukjes missen. Welke stukjes zijn dat, en hoe vinden we die?**

Afbeelding: [OnePoint Services](#) (CC BY 2.0).

Deze vraag wordt in twee delen 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. In [deel 1](#) kon je lezen hoe alle deeltjes en krachten die we kennen prachtig bij elkaar passen in het zogeheten Standaardmodel. Maar toch knaagt het... Vandaag zullen we zien wát er precies knaagt, en hoe deeltjesfysici de problemen hopen op te lossen.

---

## **Wat zijn de open vragen? Waarom denken we dat er meer deeltjes zijn?**

Als we het overzicht bekijken van de deeltjes en de krachten dat ik in het [vorige artikel](#) besproken heb, ziet het er uit als een keurig en overzichtelijk patroon waarmee we alle fenomenen in de wereld van elementaire deeltjes kunnen begrijpen. Maar zoals ik in dat artikel diverse malen heb aangegeven, zijn er wat zaken die we niet begrijpen en waardoor we denken dat we het meest fundamentele niveau van de beschrijving van de natuur nog niet gevonden hebben. Die vragen bestrijken de deeltjes, de krachten en bepaalde vreemde fenomenen. Sommige zijn eerder filosofisch van aard dan echte natuurkundige problemen, maar allemaal zijn ze onbegrepen. Een paar voorbeelden:

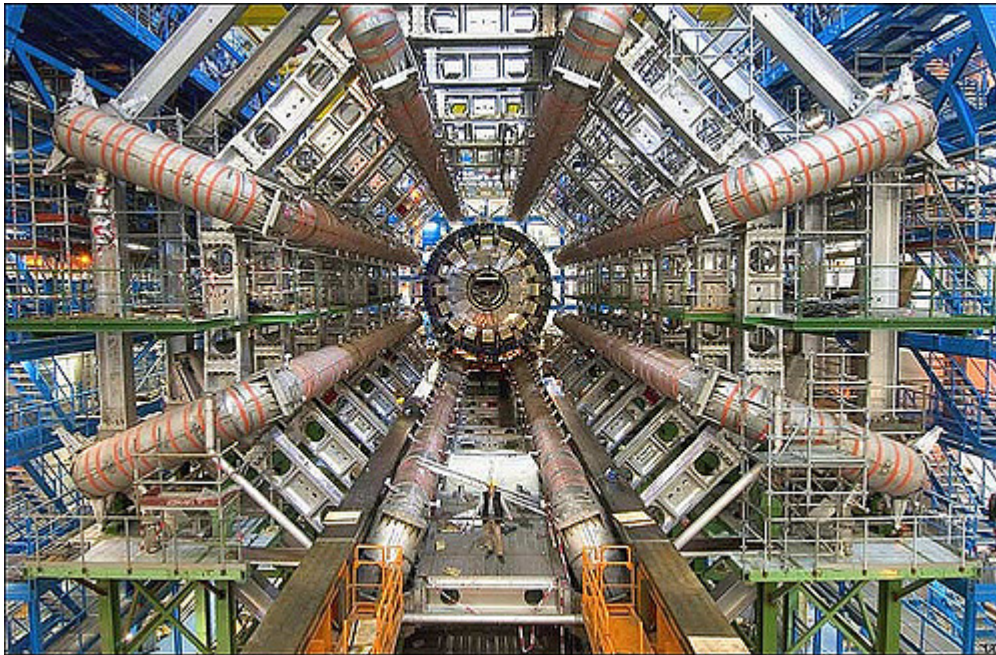
### **Deeltjes: waarom zijn er drie families van deeltjes en waarom zijn er net zoveel quarks als leptonen?**

Geen gekke vraag, want als, zoals we in het vorige artikel zagen, de eerste familie de basis is voor alle stabiele materie in het heelal, waarom is er dan überhaupt een tweede en een derde familie? En als er al meerdere families zijn, waarom dan geen vier families of honderd? Ook het feit dat er in elke familie steeds twee quarks en twee leptonen voorkomen, lijkt logisch en mooi symmetrisch, maar dat hoeft formeel gesproken helemaal niet zo te zijn. Waarom is dat zo? Wat zit daar achter?

### **Deeltjes: waarom zijn de massa's van de deeltjes zo verschillend?**

Sinds 2012 weten we dankzij de ontdekking van het [Higgsboson](#) op CERN hoe elementaire deeltjes hun massa krijgen. Maar waarom hebben de deeltjes eigenlijk de massa die ze

hebben? Waarom is het topquark, het zwaarste elementaire deeltje, een miljoen keer zwaarder dan het lichtste quark? En waarom zijn de neutrino's minimaal een miljoen keer lichter dan het elektron? Dat kan natuurlijk 'gewoon zo zijn', maar veel wetenschappers verwachten dat er een onderliggend mechanisme of fenomeen bestaat dat deze patronen oplevert. Het wachten is op een nieuwe aanwijzing of briljante idee waardoor we tot die diepere laag doordringen.



**Afbeelding 2. De Atlas-detector.** Met de Atlas- en de CMS-detector werd in 2012 het Higgsboson ontdekt.

Dankzij deze ontdekking begrijpen we hoe bepaalde deeltjes aan hun massa komen - maar waarom zijn de massa's van deeltjes zo extreem verschillend? Foto: CERN / [Image Editor](#). (CC BY 2.0).

**Krachten: is er een 'oerkracht' waar de andere drie krachten uit zijn voortgekomen?**

Hoewel de krachten zeer verschillend lijken, zijn ze allemaal gebaseerd op eenzelfde wiskundige structuur. Het lijkt er zelfs op of ze bij hogere energie wel eens even sterk zouden kunnen zijn. Dat lijkt erop te duiden dat de drie natuurkrachten eigenlijk manifestaties zijn van eenzelfde oerkracht.

**Onbegrepen observaties: donkere materie**

Er zijn verschillende aanwijzingen dat er [meer materie in het heelal aanwezig is](#) dan we kunnen zien. Als we aannemen dat die enorme hoeveelheid extra materie uit elementaire

deeltjes bestaat, dan weten we vanuit de dingen die we (niet) zien nu al dat het niet om een deeltje uit het Standaardmodel kan gaan. Maar als het geen van de bekende deeltjes is en er geen open plekken meer in het Standaardmodel zitten, wat is de donkere materie dan? Is het een nieuw deeltje buiten de structuur van ons huidige model, of zien we het verkeerd en worden de aanwijzingen van donkere materie veroorzaakt door een [nieuw fenomeen](#) dat we tot nu toe niet herkend hebben?

## Welke nieuwe deeltjes worden er voorspeld?

Om een antwoord te vinden op de bovenstaande vragen zullen natuurkundigen hun huidige theorie moeten aanpassen of uitbreiden. Dat hebben ze ook gedaan: er zijn honderden theorieën bedacht die vertellen welke structuur de diepere laag heeft en welke nieuwe fenomenen we zullen observeren als we de natuur bestuderen op een nog hogere energieschaal. Het gaat daarbij om afwijkingen in de voorspellingen van het huidige onvolledige Standaardmodel, maar ook om het verschijnen van (de effecten van) nieuwe deeltjes. Er worden letterlijk honderden deeltjes voorspeld, maar ik zal me hier beperken tot een drietal voorbeelden van de nieuwe deeltjes waar we met behulp van de grote deeltjesversneller op het CERN naar op zoek zijn.

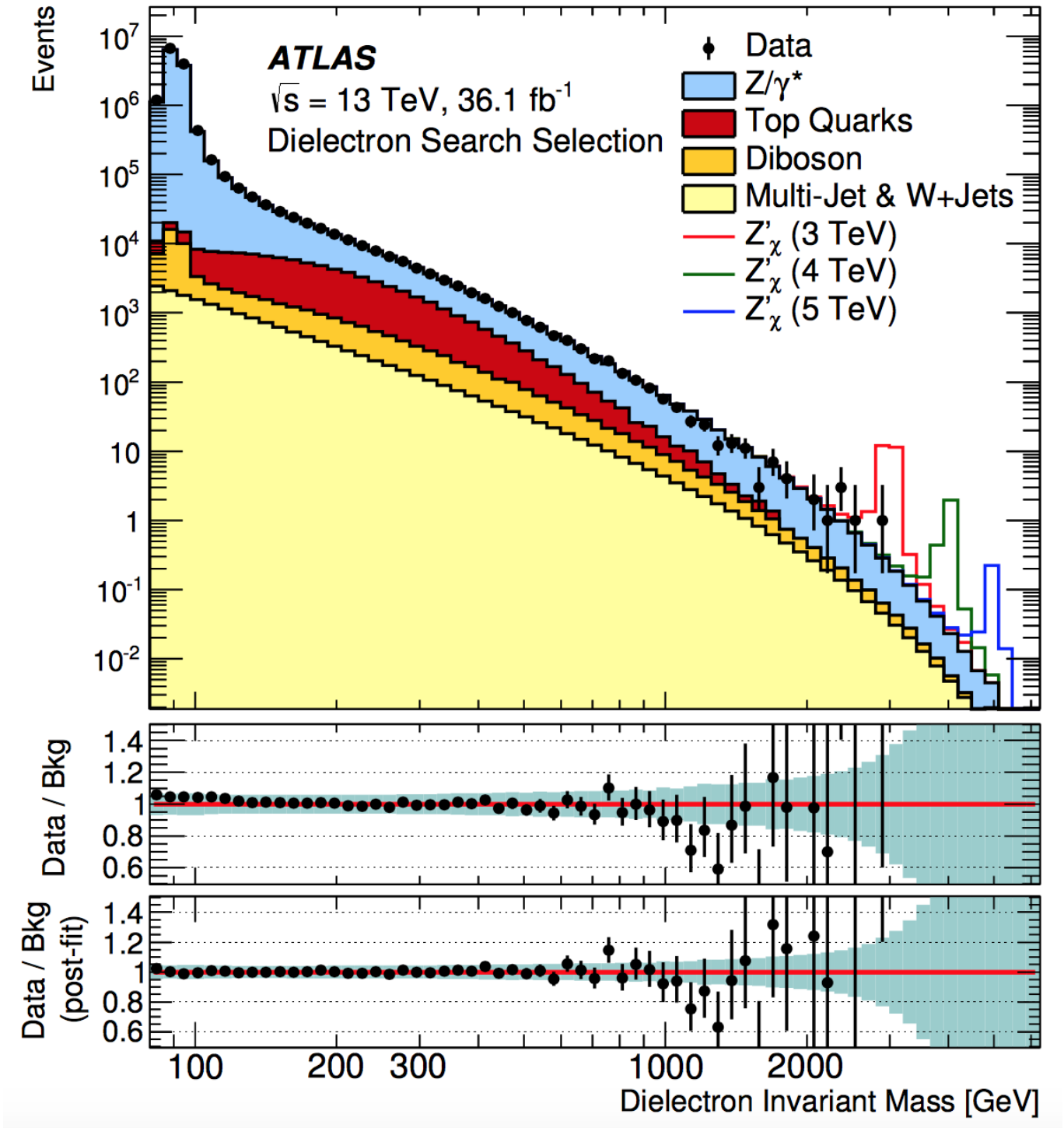
### 1) Het Z'-deeltje

Als het inderdaad zo is dat de drie natuurkrachten, die nu zo verschillend lijken, eigenlijk voortkomen uit een gemeenschappelijke kracht die zich pas op hogere energie manifesteert, dan bestaat de mogelijkheid dat we daar toch nu als iets van kunnen merken. Omdat de bestaande krachten namelijk beschreven worden door een zeer specifieke wiskundige structuur, is het niet gek om aan te nemen dat ook de gemeenschappelijk kracht eenzelfde wiskundige (symmetrie-) basis heeft waarin in ieder geval alle componenten opgenomen zijn die bij de bestaande krachten horen. De symmetrie van de overkoepelende kracht moet dus 'hoger' zijn dan die van elk van de componenten afzonderlijk.

Als je een studie maakt van de verschillende mogelijkheden die er zijn, dan zie je al snel dat zo'n geünificeerde symmetrie bij lagere energieën niet alleen op zal splitsen in de drie bekende krachten, maar dat er nog een extra symmetrie-component zichtbaar moet worden. Dit betekent concreet voor wetenschappers die in laboratoria de natuur bestuderen, dat zich een nieuwe kracht (en bijbehorend krachtdeeltje) zal openbaren. Dat nieuwe krachtdeeltje,



generiek het  $Z'$ -boson genoemd, zal dan indirect zichtbaar moeten zijn in deeltjesbotsingen omdat het, net als de andere krachtdeeltjes, maar kort leeft en vervolgens uit elkaar zal vallen in bijvoorbeeld twee elektronen of twee muonen. Het zoeken naar het resulterende nieuwe 'piekje' in distributies van twee elektronen of twee muonen is relatief eenvoudig, en het is bij elke nieuwe en hogere botsingsenergie enorm spannend of er zich op deze manier mogelijk een nieuwe natuurkracht laat zien.



**Afbeelding 3. Het Z'-deeltje.** Zoeken naar nieuwe deeltjes is zoeken naar kleine piekjes in de distributie van vervalproducten. Bovenin in het rood, groen en blauw drie voorspelde piekjes voor een Z'-deeltje van drie verschillende massa's. De zwarte puntjes geven de echte metingen aan; we zien dat de metingen al bijna ver genoeg doorlopen om deze piekjes wel of niet te kunnen zien! Afbeelding: [ATLAS Collaboration](#).

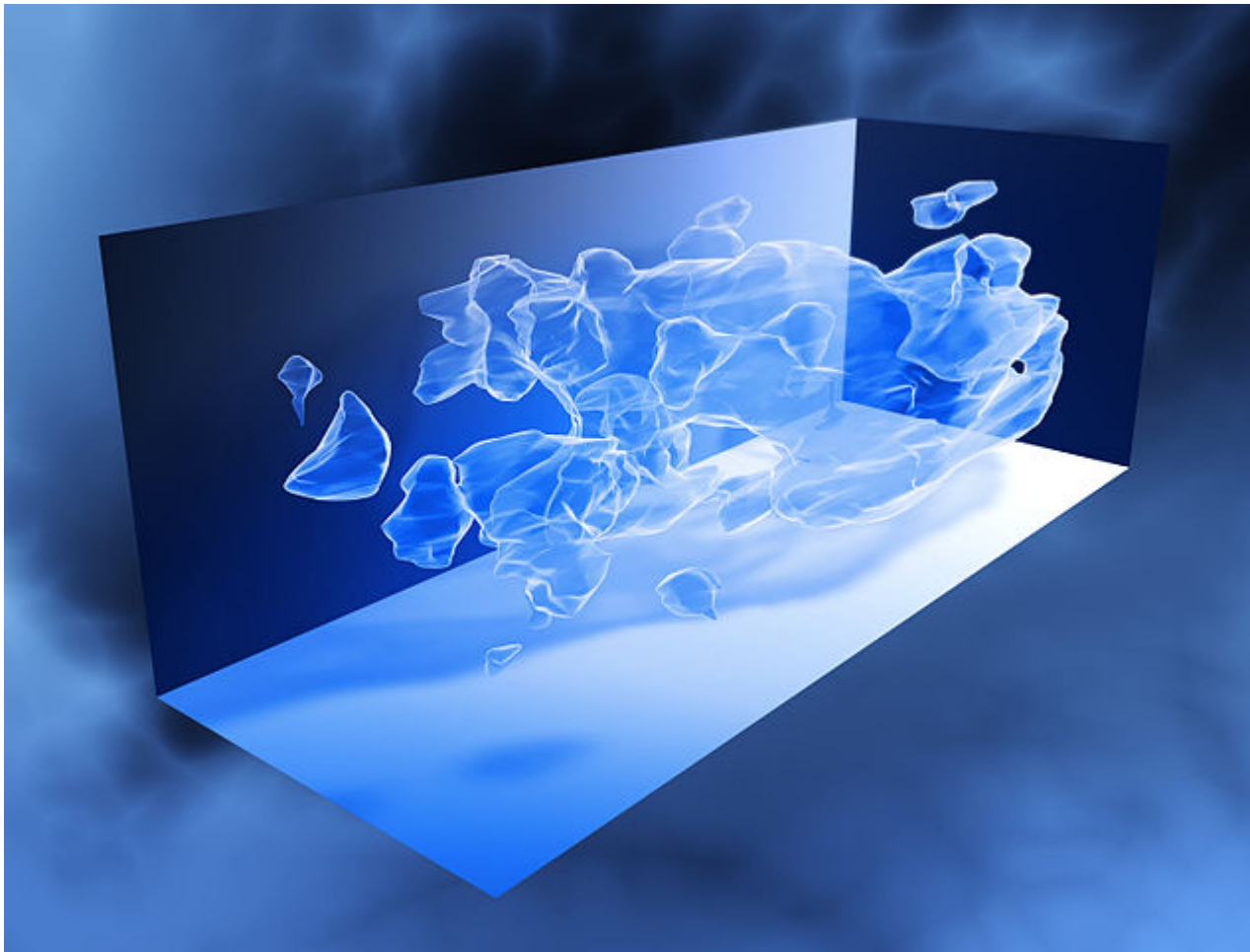
## 2) Supersymmetrische deeltjes en het donkeremateriedeeltje

Als het Standaardmodel niet genoeg ruimte biedt om alle hiervoor genoemde open vragen te beantwoorden, dan betekent dat dat we nog niet op de 'diepste' laag zijn aangeland en dat het Standaardmodel maar een onderdeel is van de 'echte' theorie. Maar hoe zou je het dan moeten uitbreiden? Welke fenomenen en deeltjes moeten we dan toevoegen zodat we wel de open vragen kunnen beantwoorden, maar geen voorspellingen doen waarvan we al weten dat die niet kloppen? Dat is een lastige balans. Een van de meest populaire uitbreidingen van het Standaardmodel is die van [supersymmetrie](#). Supersymmetrie is een nieuwe symmetrie die tien vliegen in één klap slaat, en is daarmee het klavertje vier onder de nieuwe ideeën. Naast de oplossing voor een aantal ingewikkelde theoretische problemen, verzorgt supersymmetrie bijvoorbeeld een link tussen de krachtdeeltjes en de gewone deeltjes, levert het de noodzakelijke voorwaarde voor een mogelijke quantumtheorie voor de zwaartekracht, en, misschien wel nog belangrijker, voorspelt het een nieuw deeltje dat verantwoordelijk zou kunnen zijn voor de vreemde donkere materie in het heelal.

Ontdaan van alle theoretische poespas werkt het als volgt: het bestaan van supersymmetrie betekent dat er een verdubbeling van het aantal deeltjes voorspeld wordt. Net zoals een elektron een antimaterie-tegenhanger bleek te hebben, is er nu nog zo'n spiegeling waardoor beide deeltjes ook nog een supersymmetrie-partner hebben. Die laatste deeltjes zijn waarschijnlijk erg zwaar, want anders hadden we ze wel in experimenten gezien. We zijn in deeltjesbotsingen in Genève op zoek naar deze nieuwe deeltjes en naar één ervan in het bijzonder. Het is namelijk goed mogelijk dat het lichtste van alle nieuwe deeltjes niet, zoals alle andere zware deeltjes, gelijk uit elkaar valt in lichtere deeltjes, maar dat het het eeuwige leven heeft. Het is dus *stabiel*. In het vroege heelal, toen er zoveel energie was dat alle deeltjes democratisch gemaakt werden, zijn deze deeltjes dus al ontstaan, en nu, 14 miljard jaar na de oerknal, zweven ze nog steeds rond. We denken dat deze deeltjes verantwoordelijk kunnen zijn voor de donkere materie die we in het heelal lijken te zien.

Is het zoeken naar dit deeltje lastig? You bet! Ten eerste moet je nog maar afwachten of je genoeg energie hebt in een botsing om de zwaardere supersymmetrie-deeltjes maken. Als dat gebeurt, zal er uiteindelijk ook zo'n donkeremateriedeeltje gemaakt worden, maar het probleem is dat de eigenschappen van dat deeltje zo zijn dat het ongehinderd door onze detectie-apparatuur zal vliegen. Onzichtbaar dus, net als neutrino's, maar gelukkig hebben we een slimme truc verzonnen. Als je namelijk én precies weet hoeveel energie je in de botsing stopt, én heel goed de energie meet van alle deeltjes die wel zichtbaar zijn (en dat kan allebei), dan kun je uit het verschil daartussen zien of er een 'onzichtbaar' deeltje verdwenen is. Voordat je claimt dat je iets gekks gezien hebt en de wereld van de natuurkunde op z'n kop zet, moet je natuurlijk wel de wereld (en eerst jezelf) ervan overtuigen dat de detector-apparatuur goed werkt. En dat is waar al het werk in gaat zitten van de honderden natuurkundigen die aan dit experiment werken. Hard werk, erg lastig, maar te doen! Het is erg spannend om in de data op zoek te gaan naar de verschillende signaturen die voorspeld worden door de verschillende manieren waarop deze theorie zich kan openbaren.

Er zijn trouwens nog [andere manieren](#) om dit deeltje te zoeken, en ook dat gebeurt op dit moment. Deze experimenten doen ook mee in de race en hopen net als de experimenten bij CERN in Genève ook ergens in de komende vijf jaar een signaal te zien. Wie dat als eerste voor elkaar krijgt kan de ontdekking claimen en zijn Nobelprijs in Stockholm gaan ophalen.



**Afbeelding 4. Donkere materie.**Een kaart van de verdeling van donkere materie in een deel van het heelal. Het leuke van donkere materie is: we weten wel *waar* het is, maar niet *wat* het is! Afbeelding: NASA/ESA/Richard Massey (California Institute of Technology).

### 3) Extra Higgsbosonen

Hoewel met de ontdekking van het Higgsboson het Standaardmodel compleet was, zou de wereld er volgens veel theoretisch natuurkundigen veel ‘logischer’ uitzien als er meerdere soorten Higgsbosonen zouden zijn. In veel theorieën met supersymmetrie worden er bijvoorbeeld vijf Higgsbosonen voorspeld, waarvan het lichtste Higgsboson sterk lijkt op dat uit het Standaardmodel. Maar het is niet *precies* hetzelfde. We proberen het bestaan van die extra Higgsbosonen op verschillende manieren aan te tonen: *direct*, door te kijken of we uit de brokstukken van een deeltjesbotsing kunnen achterhalen of er inderdaad meerdere Higgsbosonen zijn gemaakt in de botsing, maar ook *indirect*, door te kijken of de eigenschappen van het ‘gewone’ Higgsboson inderdaad net iets anders zijn dan door het Standaardmodel wordt voorspeld.



Of we met behulp van de verzamelde data kunnen zeggen of een nieuw theoretisch idee wel of niet waar is, ligt aan de voorspelling zelf. Een radicale afwijking is makkelijk te bevestigen of uit te sluiten,. Maar soms is het verwachte signaal te subtiel of verborgen om (snel) een conclusie te trekken.

## **Conclusie**

Ondanks alle (conceptuele) problemen van het Standaardmodel en ondanks alle mooie nieuwe theorieën, is het uiteindelijk aan het experiment om uitsluitsel te geven. Is er wel een nieuwe wereld, en zo ja, hoe ziet die er dan uit en wat betekent het voor ons begrip van de natuur en de grote vragen over de werking en oorsprong van het heelal?

Door naar grote hoeveelheden botsingen te kijken, proberen we niet alleen afwijkingen te zien van de voorspellingen die door het Standaardmodel gedaan worden; hopelijk openbaren zich zo ook nieuwe patronen die wijzen op 'nieuwe natuurkunde': de nieuwe fenomenen en krachten die de antwoorden kunnen geven waar we al zo lang naar zoeken. Het vinden van supersymmetriedeeltjes of extra Higgsbosonen of afwijkingen via de indirecte metingen, zou de sleutel tot een nieuwe laag van de realiteit zijn. Een eerste hint naar een grotere wereld dan we nu bedacht hebben. Spannend!