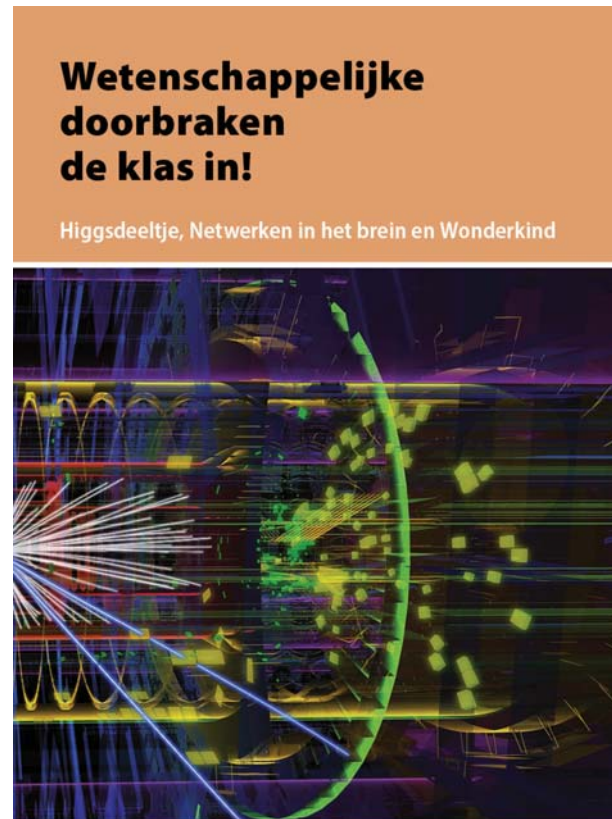


# Wetenschappelijke doorbraken de klas in!

Higgsdeeltje, Netwerken in het brein en Wonderkind

*Marieke Peeters, Jan van Baren-Nawrocka & Roald Verhoeff*

Hoofdstuk 3: Het Higgsdeeltje



Marieke Peeters, Jan van Baren-Nawrocka & Roald Verhoeff (redactie)



wetenschapsknooppunt  
Radboud Universiteit



### **Colofon**

Redactie: dr. Marieke Peeters, drs. Jan van Baren-Nawrocka & dr. Roald Verhoeff

Opmaak: Ferdie Westen, Groesbeek

Druk en afwerking: Drukkerij Efficiënt Nijmegen

Cover afbeelding: Botsing Higgsdeeltje in ATLAS detector © 2014 CERN

**Eerste druk, mei 2015**

ISBN: 978-90-818461-3-4

NUR-code: 190

Wilt u een exemplaar bestellen?

Ga naar: [www.wkru.nl/boek](http://www.wkru.nl/boek)

### **Uitgave:**

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

Heyendaalseweg 135 – postvak 77

Postbus 9010,

6500 GL Nijmegen

Nederland

E-mail: [infowkru@ru.nl](mailto:infowkru@ru.nl)

Telefoon: 024 366 72 22

Internet: [www.wkru.nl](http://www.wkru.nl)



© 2015 Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

Dit werk is gelicenseerd onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal.

Ga naar <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.nl> om een kopie van de licentie te kunnen lezen.

**Voor afbeeldingen gelden andere licentievooraarden; zie foto- en illustratieverantwoording achterin dit boek (p. 178).**

## Hoofdstuk 3: Het Higgsdeeltje

Dit hoofdstuk beschrijft in twee delen de uitvoering van een onderzoek naar het 'Higgsdeeltje'. Paragraaf 3.1 gaat inhoudelijk in op het Higgsdeeltje: wat is het Higgsdeeltje, hoe kun je aan leerlingen uitleggen wat het is, hoe hebben wetenschappers het onderzocht en waar vind je er meer informatie over? Deze paragraaf vormt de inhoudelijke voorbereiding voor leraren die met dit thema aan de slag willen gaan. Paragraaf 3.2 beschrijft, aan de hand van de zeven stappen van het onderzoekend leren, hoe dit project op drie niveaus in de klas kan worden uitgevoerd. Hierbij vormt hoofdstuk 2, waarin de algemene leidraad van de zeven stappen is beschreven, de basis. Van daaruit wordt verwezen naar de verschillende inhoudelijke hoofdstukken. We raden dan ook aan om hoofdstuk 2 als uitgangspunt te nemen bij de uitvoering van een project in de klas.

## 3.1 Het Higgsdeeltje of waarom dingen zwaar zijn

Nicolo de Groot (hoogleraar Hoge-Energiefysica), Frank Filthaut (universitair hoofddocent Hoge-Energiefysica), Melissa van Beekveld (masterstudent), Susanne Lepoeter (masterstudent) en Remco Castelijm (masterstudent). Allen werken of studeren op de afdeling Experimentele Hoge-Energiefysica aan de Radboud Universiteit in Nijmegen.

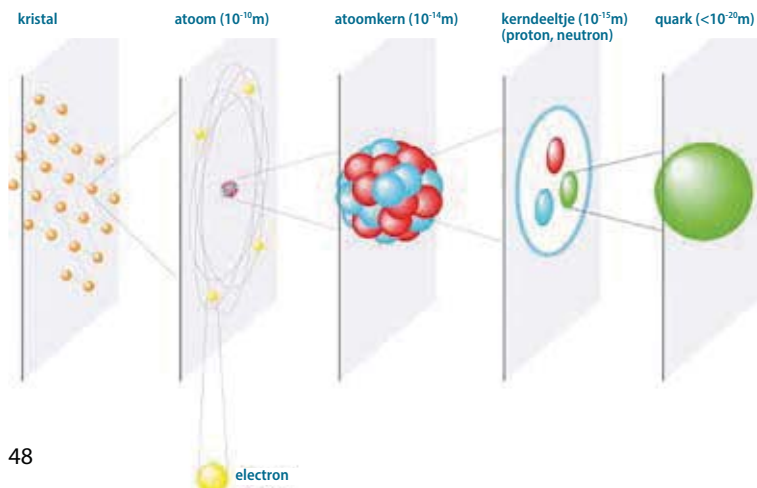
### Inleiding

De ontdekking van het Higgsdeeltje heeft niet alleen een wetenschappelijk doorbraak betekend, maar is ook bijzonder omdat de vondst ervan vijftig jaar geleden al was voorspeld. De naamgever van het deeltje, Peter Higgs, voorspelde op basis van wiskundige berekeningen al dat dit deeltje wel moet bestaan, anders kunnen we niet begrijpen hoe de materiële wereld in elkaar zit. Zonder dit deeltje is namelijk niet te verklaren waarom dingen zwaar zijn. Eén van de redenen waarom het zo lang heeft geduurd voor het Higgsdeeltje werd ontdekt, is dat het heel moeilijk is waar te nemen. Er was uiteindelijk een instrument met een omtrek zo groot als die van de stad Utrecht voor nodig om te laten zien dat het deeltje daadwerkelijk bestaat: de Large Hadron Collider (LHC) van onderzoeksinstituut CERN in Genève. Over dit Higgsdeeltje, dat ervoor zorgt dat alle dingen meer of minder zwaar zijn, gaat dit hoofdstuk.

Voor we het Higgsdeeltje nader omschrijven, geven we eerst een inleiding in de wereld van de elementaire deeltjes, de kleinste bouwstenen van alle materie in het heelal. Het Higgsdeeltje is zelf ook zo'n elementair deeltje.

### Deeltjes: de basis van alle materie

Al sinds de Grieken vraagt men zich af wat de kleinste bouwstenen zijn van de materie die ons omringt. De kleinste afmeting die we nog met het blote oog kunnen waarnemen, is ongeveer een tiende millimeter. Dit is ongeveer de dikte van een bankbiljet of de grootte van een menselijke eicel. Andere cellen kunnen tot honderd maal kleiner zijn: een micrometer. Als we daar weer duizend maal op zouden inzoomen, zien we objecten met de afmeting van een nanometer, een miljoenste van een millimeter: de typische grootte van moleculen. Atomen zijn nog weer tien maal kleiner. Ze zijn opgebouwd uit een kern met een positieve elektrische lading en daaromheen een wolk van negatief geladen elektronen. Deze kern is in doorsnede tienduizend maal kleiner dan het atoom zelf. Atomen bevatten dus vooral veel lege ruimte. Een kern is op zijn beurt weer opgebouwd uit twee soorten deeltjes: positief geladen protonen en ongeladen neutronen. Deze zijn op hun beurt weer opgebouwd uit quarks. Met quarks en het elektron kunnen we alle materie op aarde bouwen.



Verskillende niveaus waaruit materie is opgebouwd.

In kosmische straling of in speciale laboratoria blijken er meer vormen van materie te bestaan dan de aardse materie. In die materie komen nog verschillende andere quarks voor, het elektron heeft nog twee zwaardere broertjes en er zijn nog drie neutrale, zeer lichte deeltjes die bij radioactief verval vrijkomen: de neutrino's. Hoe klein deze deeltjes zijn kunnen we niet precies meten, we weten wel dat ze kleiner zijn dan een miljardste van een miljardste meter: een attometer.

Al deze materiedeeltjes duwen of trekken op verschillende manieren aan elkaar. Dit noemen we krachten. Er zijn vier belangrijke krachten: de zwaartekracht (denk maar aan als je iets op de grond laat vallen), elektromagnetische kracht (een magneet werkt bijvoorbeeld met elektromagnetische kracht), de sterke kernkracht, die de quarks in de protonen en neutronen vasthoudt, en ten slotte de zwakke kernkracht, die verantwoordelijk is voor het radioactief verval en voor het branden van de zon. Bij iedere kracht hoort ook weer een deeltje, de krachtdeeltjes. Voor de elektromagnetische kracht is dat het foton. Licht is opgebouwd uit fotonen, net als radio- en warmtestraling. Het foton is gewichtloos, het heeft geen massa. De sterke kernkracht heeft gluonen, die ook gewichtloos zijn; de zwakke kernkracht heeft de W- en Z-deeltjes, die juist weer honderd keer zo zwaar zijn als een proton of neutron.

### Massa en gewicht

Massa en gewicht worden in het dagelijks taalgebruik vaak door elkaar gebruikt. Maar in de natuurkunde is het belangrijk om daar precies over te zijn. Gewicht hebben we op aarde en is afhankelijk van zwaartekracht: de aantrekkingskracht van de aarde op een voorwerp. Op de maan heeft een voorwerp een ander gewicht en in de ruimte zijn voorwerpen zelfs gewichtloos, kijk maar naar filmpjes over het ruimtestation ISS. Gewicht wisselt dus, afhankelijk van waar je bent. Maar massa blijft altijd hetzelfde. De massa van een astronaut die op aarde 75 kg weegt, is in het ruimtestation dus nog altijd 75 kg. Om het niet te moeilijk te maken, gebruiken we in dit hoofdstuk vooral het begrip gewicht, maar we bedoelen dus eigenlijk massa. Want het Higgsdeeltje werkt altijd en overal, niet alleen in zwaartekracht. Ter herinnering daaraan zetten we af en toe (massa) tussen haakjes erachter.

### **Het Standaard Model en het missende deeltje**

De materiedeeltjes en de elektromagnetische, sterke en zwakke kracht worden beschreven met het zogenaamde Standaard Model van de elementaire deeltjes. Hiermee kunnen we uitrekenen wat er gebeurt bij botsingen tussen protonen en elektronen, soms met een precisie van tien cijfers achter de komma. Een probleem bij dit model is dat het eigenlijk alleen werkt als alle deeltjes geen gewicht (massa) zouden hebben, maar dat is absoluut niet het geval. En daarmee komen we aan bij het Higgsdeeltje. Niet alleen hebben de deeltjes gewicht, tussen de materiedeeltjes zitten ook enorme verschillen in gewicht. Het Higgsdeeltje kan dit probleem oplossen.

In 1964 bedachten Robert Brout, François Englert en Peter Higgs een manier om te verklaren waarom deeltjes gewicht (massa) hebben, waarmee dus ook alle materie gewicht (massa) krijgt. Daarbij redeneerden ze dat de 'lege ruimte' tussen de deeltjes toch niet zo leeg is, maar gevuld is met een veld (stel je een veld voor als een magneetveld). De interactie van de deeltjes met dit veld zou er dan voor zorgen dat deeltjes gewicht krijgen. Dit veld zou later bekend worden als het Higgsveld.

In de theorie van het Standaard Model zouden deeltjes met de lichtsnelheid bewegen als het Higgsveld er niet was. Maar sommige deeltjes voelen de aanwezigheid van het Higgsveld, gaan er een interactie mee aan en worden erdoor afgeremd. Een deel van hun bewegingsenergie gaat in het gewicht zitten. Hoe sterker de interactie van een deeltje met het Higgsveld, hoe groter het gewicht.

## Het Higgsdeeltje

Andere deeltjes, zoals het foton, voelen niets van het Higgsveld en blijven gewichtloos. Helaas kunnen we dit veld niet waarnemen. Dat is een probleem als we willen bewijzen dat het bestaat. Daarom is het ook zo belangrijk dat Peter Higgs ook voorspelde dat er een deeltje bij zou moeten horen. Dat deeltje (en daarmee ook het veld) heeft daarom zijn naam gekregen: het Higgsdeeltje. En naar dat deeltje konden natuurkundigen *wel* op zoek. Uiteindelijk was het Higgsdeeltje ook niet zo makkelijk te vinden. Natuurkundigen over de hele wereld hebben er na de voorspelling van Peter Higgs dan ook vijftig jaar over gedaan om het te vinden. Want zelfs met de sterkste microscoop (de elektronen-microscoop) zijn elementaire deeltjes niet waar te nemen, daarvoor is een enorme installatie nodig: een deeltjesversneller.

### ***De Large Hadron Collider, de grootste deeltjesversneller ter wereld***

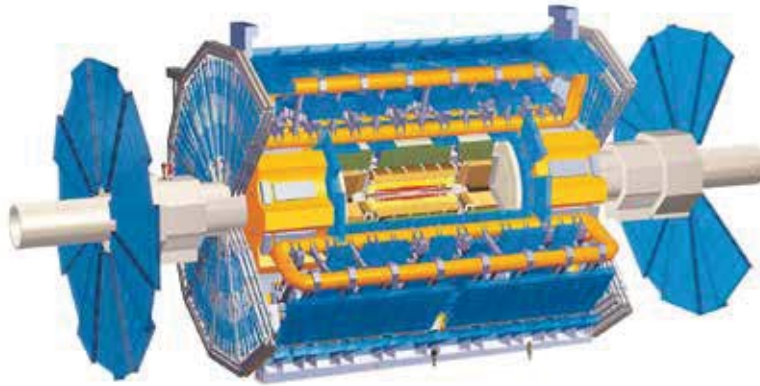
Op de grens van Zwitserland en Frankrijk, vlakbij Genève, ligt het CERN-laboratorium. Op een diepte van 100 meter is daar tussen 1998 en 2008 de grootste deeltjesversneller ter wereld gebouwd: de Large Hadron Collider (LHC). In deze cirkelvormige versneller van 27 km omtrek worden 20 miljoen keer per seconde pakketjes van 100 miljard protonen op 100 miljard protonen geschoten. De energie per botsing is 8 Terra elektron volt, 8000 maal de energie die in het gewicht van het proton besloten ligt. De protonen samen wegen maar een halve nanogram (een miljardste deel van een gram), maar de energie van de bundels is ongeveer die van een sneltrein van 200 meter lang die met 200 km p/u rijdt.



*De omtrek van de Large Hadron Collider.*

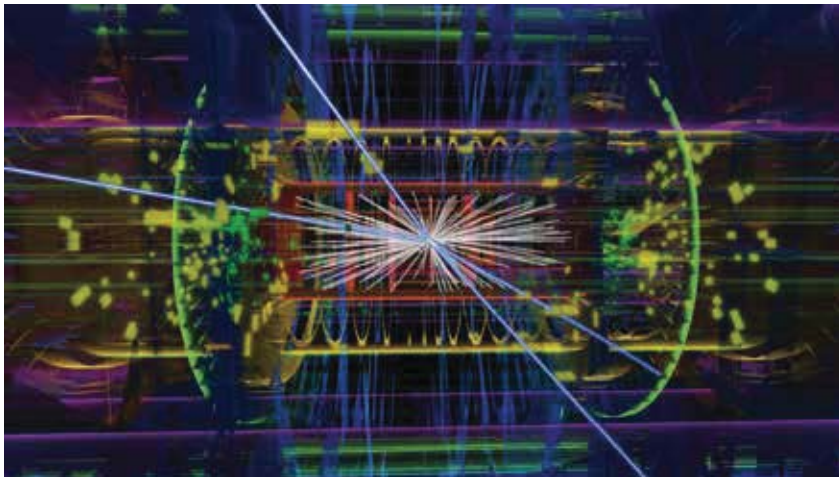
Bij een botsing van twee protonen worden er allerlei nieuwe deeltjes geproduceerd. Om het botsingspunt staan enorme meetapparaten, detectoren genaamd, die de positie en de energie van de uitgaande deeltjes meten en vertalen in elektronische signalen. Een van deze detectoren is de ATLAS-detector. Dat is de detector waar wetenschappers van de Radboud Universiteit Nijmegen mee zijn verbonden. Samen met onderzoekers van andere universiteiten voeren ze met deze

detector allerlei experimenten uit, zoals experimenten om het Higgsdeeltje te vinden. De ATLAS-detector (zie afbeelding) is 40 meter lang, 25 meter hoog en 25 meter breed.



*De ATLAS detector.*

Maar zelfs met een enorme deeltjesversneller als de LHC is het herkennen van een Higgsdeeltje niet eenvoudig. Het Higgsdeeltje bestaat maar heel kort en valt binnen de detector uiteen in andere deeltjes.



*Een plaatje van een botsing met een Higgsdeeltje in de ATLAS detector. Het Higgsdeeltje valt in vier andere deeltjes uiteen. Die deeltjes zijn te zien als de lange blauwe sporen.*

We kunnen het Higgsdeeltje zelf met die enorme meetapparaten dus niet zien, we zien alleen de eindtoestand: de deeltjes waarin het Higgsdeeltje weer uit elkaar is gevallen. Er zijn verschillende eindtoestanden mogelijk nadat een Higgsdeeltje uit elkaar valt. Als we weten hoe zwaar een deeltje is en we weten hoe zwaar een Higgsdeeltje moet zijn, dan kunnen we met behulp van de eindtoestand uitrekenen of er bij de botsing een Higgsdeeltje is ontstaan. Verschillende processen kunnen dezelfde eindtoestand veroorzaken als het uit elkaar vallen van een Higgsdeeltje. We moeten daarom heel veel botsingen tussen protonen meten voordat we zeker weten dat we ook echt het Higgsdeeltje hebben waargenomen.

### ***De ontdekking van het Higgsdeeltje***

In 2012 vonden we met de ATLAS-detector een nieuw deeltje waarvan we dachten dat het het Higgsdeeltje moest zijn. Ook bij een van de andere detectoren bij de LHC was bewijs voor het bestaan van dit deeltje gevonden. Samen hebben we aangekondigd dat we het bewijs hadden gevonden voor een nieuw deeltje, dat wel eens het Higgsdeeltje zou kunnen zijn. Vervolgonderzoek heeft laten zien dat het inderdaad om het Higgsdeeltje gaat. Voor deze ontdekking hebben François Englert en Peter Higgs in 2013 de Nobelprijs voor de natuurkunde ontvangen, bijna 50 jaar nadat ze hadden getheoretiseerd dat het Higgsveld en het Higgsdeeltje moesten bestaan. Robert Brout, die samen met Englert het bestaan van het Higgsveld had voorspeld, was helaas in 2011 overleden. En omdat Nobelprijzen niet postuum worden uitgereikt, heeft hij in die eer niet meer kunnen delen, al is natuurlijk niemand zijn bijdrage vergeten.

Met de vondst van het Higgsdeeltje is het Standaard Model waar we het eerder over hadden, compleet. Dat betekent dat natuurkundigen nu van de meeste krachten weten hoe ze werken, wat de bouwstenen van de materie om ons heen zijn en hoe het komt dat ze gewicht hebben.

De technologie (of de creativiteit van de menselijke geest) is echter nog lang niet ver genoeg om ook te weten wat we hier in de praktijk mee kunnen doen. Voor nu is het enige voordeel dus dat we beter weten hoe de wereld in elkaar zit. Maar wetenschappelijke kennis wordt vaak wel weer in de techniek gebruikt, al is die er niet speciaal voor bedacht. Om een voorbeeld te geven: de ontdekker van de radiogolven wist niet welke eindeloze hoeveelheid toepassingen ermee zouden worden bedacht. Dankzij die uitvinding kunnen we nu bijvoorbeeld draadloos communiceren met elkaar, de radio luisteren en gebruik maken van mobiele telefoons. Wetenschappers houden zich niet altijd bezig met de vraag wat het technologisch of maatschappelijk nut is van de dingen die ze ontdekken. Een belangrijke drijfveer voor hen kan juist zijn te achterhalen hoe de wereld in elkaar zit. Voor sommige wetenschappers is dit zelfs de enige drijfveer.

- Nicolo de Groot heeft tijdens de WKRU Winterschool in 2014 een lezing gegeven over het Higgsdeeltje. Deze lezing is te bekijken op de website [www.wetenschapdeklasin.nl](http://www.wetenschapdeklasin.nl).





**Prof. dr. Nicolo de Groot**

*Nicolo de Groot* (1964) was op de basisschool het meest geïnteresseerd in fossielen, uitgestorven dieren als dinosaurussen en in sterren en planeten. Op de middelbare school werd natuurkunde zijn lievelingsvak en was hij vooral geïnteresseerd in krachten en deeltjes. Daarom ging hij natuurkunde studeren aan de TU Twente en de Universiteit van Amsterdam. Hij promoveerde in 1993 aan de Universiteit van Amsterdam op een onderzoek naar de eigenschappen van het Z-deeltje. Ingewikkeld gezegd deed hij onderzoek naar het verval van het Z-deeltje naar b- en c-quarks. Dit onderzoek is ook uitgevoerd bij CERN in Genève, maar dan met een andere versneller: de LEP versneller, die gebouwd is in dezelfde tunnel als de Large Hadron Collider. Nadat hij onderzoek deed in Genève en in Californië met verschillende versnellers werd Nicolo universitair docent aan de Universiteit van Bristol, Engeland (1999-2001) en later hoofdonderzoeker aan het Rutherford Appleton Laboratory (2001-2004), ook in Engeland. Sinds 2004 is hij professor in experimentele deeltjesfysica aan de Radboud Universiteit Nijmegen en bij Nikhef, een instituut waar onderzoek wordt gedaan naar deeltjes en waar onderzoekers van verschillende Nederlandse universiteiten samenwerken. Nicolo is een van de programmaleiders van het ATLAS experiment (waar ook de ATLAS-detector bij CERN onderdeel van is) in Nederland en doet vooral veel onderzoek naar het Higgsdeeltje.



**dr. Frank Filthaut**

De interesse van *Frank Filthaut* (1967) voor de natuurkunde werd gewekt op de middelbare school; met name het idee dat je de ‘taal’ van de wiskunde kunt gebruiken om de natuur te begrijpen heeft hem altijd geboeid. Frank studeerde natuurkunde aan de Radboud Universiteit in Nijmegen van 1985 tot 1989. Hij promoveerde aan diezelfde universiteit in 1993, op metingen van het verval van het Z-deeltje naar quarks. Deze metingen gaven de eerste zeer precieze informatie over het Z-deeltje, met name hoe zwaar het precies is en hoe lang het leeft. Na zijn promotie bleef hij actief in het onderzoeken van de W- en Z-deeltjes. Eerst werkend voor een Amerikaanse universiteit bij CERN en later als Fellow van CERN, bij het bestuderen van elektron-positron botsingen in de LEP-versneller. In 2000 keerde hij terug naar de Radboud Universiteit om te werken aan een experiment aan nog een andere versneller in de VS. Deze versneller was een voorloper (en op het laatst een concurrent!) van de LHC. In Nijmegen is hij zich gaan richten op de zoektocht naar het Higgsdeeltje. Vanaf 2008 is Frank met de Large Hadron Collider gaan werken. Tot oktober 2012 was hij binnen het Nikhef-samenwerkingsverband de leider van de Nederlandse groep die zich bezig hield met de zoektocht naar het Higgsdeeltje. Deze groep heeft ondanks zijn relatief kleine omvang belangrijke bijdragen geleverd aan de ontdekking van het Higgsdeeltje in 2012. Sinds de ontdekking is Frank nauw betrokken bij verdere precieze studies van het Higgsdeeltje. Door middel van experimenten bestuderen onderzoekers of de eigenschappen van het Higgsdeeltje precies zijn zoals voorspeld door het zogenaamde Standaard Model van de deeltjesfysica of juist aanwijzingen geven voor de richting waarin het model zou moeten worden aangepast. Als blijkt dat het Standaard Model inderdaad moet worden aangepast, dan wordt daarmee het natuurkundige begrip van de natuur op het allerdiepste niveau veranderd.

## Hoe Radboudnatuurkundigen hielpen bij het vinden van Higgs

*Datum bericht: onbekend*

*Natuurkundigen van de Radboud Universiteit speelden een belangrijke rol bij de experimenten die het Higgsdeeltje aantoonde. Op 4 juli 2012 maakte CERN bekend dat ze het Higgsdeeltje te pakken hadden: de gezamenlijke inspanning van honderden onderzoekers die jarenlang experimenten deden in de deeltjesversneller in Genève.*

*Nijmeegse wetenschappers uit de groepen van prof. Nicolo de Groot en prof. Sijbrand de Jong speelden hierin een belangrijke rol.*

De Groot: 'Er zijn op CERN ongeveer honderd mensen bezig met het Higgs onderzoek, de rest van de staf is er voor de apparatuur en dergelijke. Van die echte Higgszoekers zijn er heel wat verbonden aan ons instituut IMAPP in Nijmegen.'

### **Efficiënter zoeken**

Het Higgsdeeltje leeft zo kort dat het niet rechtstreeks gedetecteerd kan worden. De aanwezigheid van het Higgsdeeltje wordt afgeleid van de manier waarop een deeltje uit elkaar valt in W- of Z-deeltjes, die vervolgens weer muonen en elektronen vormen. In de deeltjesversneller staan meerdere detectoren om de vervaldeeltjes te meten. De Nijmegenaren werken met de ATLAS-detector, die ongeveer half zo groot is als de Notre Dame.

De ATLAS-detector meet de deeltjes in verschillende 'kanalen'. Een promovendus van De Groot heeft de efficiency in het ZZ-kanaal van ATLAS sterk verbeterd, waardoor daar meer higgskandidaten gevonden werden. Maar Nijmegen werkte ook aan het WW-kanaal, dat heel belangrijk is geweest bij het uitsluiten van een zwaarder higgsdeeltje. De onderzoekers hadden een grote rol in de centrale dataproductie van dit kanaal en slaagden erin om een aantal lastige achtergronden - een soort ruis - op te lossen. De Groot: 'Allemaal waren ze regelmatig de eerste die nieuwe resultaten met de laatste data in het experiment presenteerden.'

### **Deeltjessoftware**

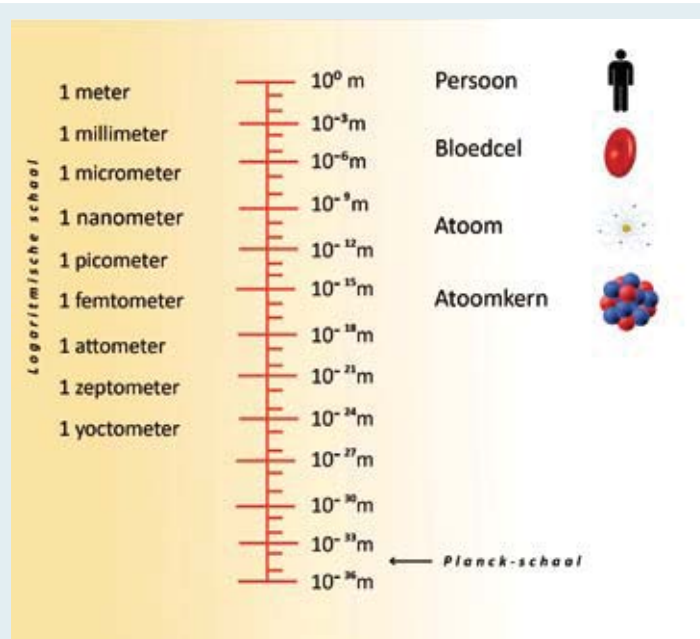
Dat er nu voldoende metingen van Higgsdeeltjes zijn om met een zekerheid grenzende waarschijnlijkheid te zeggen (5 sigma en hoger in jargon) dat het deeltje bestaat is dus deels toe te schrijven aan het slimme rekenwerk van de Nijmegenaren. Maar ook bij het bouwen van de deeltjesversneller in Genève deed Nijmegen mee.

'We hebben een belangrijke bijdrage geleverd aan de elektronica van het muonsysteem en de software om de botsingen zichtbaar te maken. En laten we niet vergeten dat Jos Engelen, jarenlang wetenschappelijk directeur van CERN, een alumnus is van Nijmegen. Hij heeft er hard aan gewerkt dat de Large Hadron Collider afgemaakt is en succesvol gestart!'

Bron: <http://www.ru.nl/onderzoek/over/onderzoeksthema/natuurkunde/vm/hielpen-vinden-higgs>

### **Hoe leg je het Higgsdeeltje aan de leerlingen uit?**

Hieronder zijn in kaders de belangrijkste begrippen nog eens wat eenvoudiger uitgelegd. De leraar kan de tekst in de kaders gebruiken om het verhaal over het Higgsdeeltje goed aan de leerlingen uit te leggen. De leerlingen kunnen deze teksten ook zelf lezen.



Het formaat van elementaire deeltjes.

## Wat is een deeltje?

Een *elementair deeltje*, kort gezegd een deeltje, is iets wat niet kan worden gesplitst in andere bouwstenen. Om te begrijpen wat een deeltje is, beginnen we bij iets dat iedereen kent: een huis. Daar zullen we steeds verder op inzoomen. Als je van een afstand naar een huis kijkt, zie je één ding: het huis. Maar als je dichterbij gaat staan, zie je dat het huis eigenlijk bestaat uit bouwstenen, dakpannen, ramen, deuren, enzovoort. Het huis bestaat dus uit meerdere onderdelen. Als je nóg beter kijkt, zie je dat de bouwstenen ook weer bestaan uit kleinere steentjes met cement ertussen. En als je goed naar een deur kijkt, zie je dat die ook uit verschillende delen bestaat: glas, hout, verf, een klink, scharnieren, enzovoort.

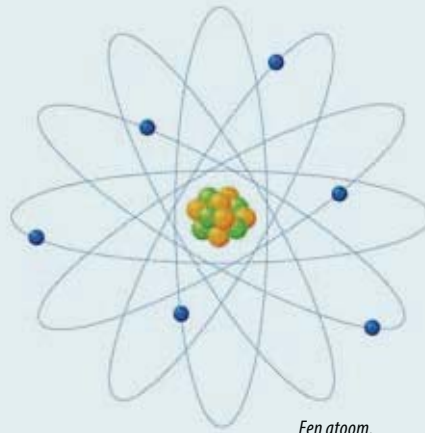
We kunnen nóg verder inzoomen, bijvoorbeeld op de kleinere steentjes in het cement. Deze kun je verder en nog verder open breken, maar op een gegeven moment komen we aan op iets wat je niet meer kunt zien met het blote oog: de kleinere steentjes in de bouwstenen bestaan namelijk zelf weer uit moleculen. De moleculen bestaan uit atomen en zelfs de atomen zijn op te splitsen in *quarks* en *elektronen*. Deze laatste twee bouwstenen zijn wat natuurkundigen *elementaire deeltjes* noemen. Zover wij als natuurkundigen weten, kun je deze deeltjes niet nog verder opbreken in nog kleinere deeltjes. Alle elementaire deeltjes zijn door natuurkundigen samengevat in het *Standaard Model*. Een elementair deeltje is dus heel erg klein. Op youtube staat een filmpje dat laat zien hoe klein: "The powers of 10". Om er enig gevoel voor te geven: de allerkleinste lengte die we kennen is  $\sim 10^{-36}$  meter, de afmeting van een deeltje. Stel je dit als volgt voor: als een deeltje ongeveer 0.1 mm is, ongeveer het kleinste wat je met je blote oog nog kunt zien, en we vergroten dat deeltje tot de grootte van ons universum. In dit nieuwe universum is de allerkleinste lengte nu 0.1 mm. Je kunt je voorstellen dat je deze lengte nooit met het blote oog kunt zien, maar ook met een microscoop wordt dit heel lastig, want die meet tot ongeveer  $10^{-10}$  m, de grootte van een atoom. Een belangrijke vraag is dan ook hoe je iets kunt meten terwijl je het niet kunt zien. Daar is dus die deeltjesversneller van CERN voor nodig.

### Wat is het Standaard Model?

Het Standaard Model is de belangrijkste samenvatting van alle ideeën in de natuurkunde van deze tijd. Dit model beschrijft al die kleinste deeltjes waaruit alles om ons heen is opgebouwd: hoe ze eruit zien, wat ze doen en hoe ze op elkaar reageren. Omdat we lange tijd nog niet alles wisten van de kleinste deeltjes en we ze ook nog niet allemaal kenden, was het Standaard Model nog niet helemaal af. Het begrijpen hoe alles werkt en het afmaken van dit Standaard Model was een uitdaging waar natuurkundigen lang mee bezig waren. Maar met de ontdekking van het Higgsdeeltje is het Standaard Model nu helemaal compleet!

### Hoe zijn deeltjes ontdekt?

In het oude Griekenland, ongeveer 2500 jaar geleden, speculeerden filosofen al over atomen. De vraag die ze daarmee eigenlijk probeerden te beantwoorden was: waar bestaat onze wereld uit? Een vraag die ze bijvoorbeeld stelden was of je oneindig door kunt gaan met iets delen, of dat je uiteindelijk deeltjes hebt die je niet meer kunt delen. Maar omdat ze nog niet de instrumenten hadden die natuurkundigen nu wel hebben, konden ze dat niet goed onderzoeken. Toch voerden ze uitgebreide discussies over hoe het nu zat. Pas in de 19<sup>e</sup> eeuw ontdekte men dat materie uit deeltjes bestaat: de atomen waarover de filosofen discussieerden bleken echt te bestaan! Het begon allemaal met een experiment dat de natuurkundige Ernest Rutherford deed in 1911.



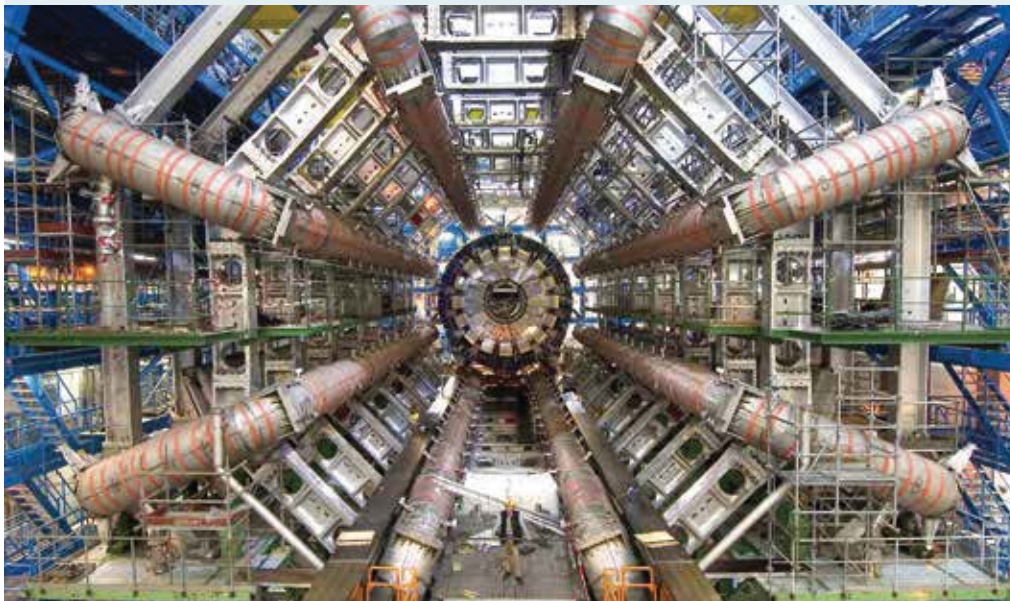
In dat experiment werd een folie gemaakt van goud dat werd bestraald met andere deeltjes. De deeltjes waarmee het folie werd bestraald, kaatsten terug als ze een ander deeltje tegenkwamen. Uit de manier waarop ze terugkaatsten, konden de onderzoekers veel afleiden over de vorm en eigenschappen van die deeltjes in het goudfolie. Eigenlijk dachten ze dat de folie bestond uit vrij grote bolletjes met ruimte ertussen, want ze dachten dat atomen er zo uitzagen. Een deeltje zou dan dus óf recht door de 'gaten' in dit folie vliegen, tussen de atomen, óf terugkaatsen als het op een atoom terecht komt. Maar het ging anders. De deeltjes kaatsten helemaal niet vaak terug en kwamen vaak juist heel ergens anders uit dan men verwachtte. Dit betekende dat een atoom niet zomaar een bolletje is, maar dat er iets moest zijn dat de bestraalde deeltjes afbuigt. Men kwam toen met het idee dat het atoom bestaat uit een harde, elektrisch geladen pit, met daaromheen een elektronenwolk. En dat is nog steeds hoe we denken dat een atoom eruit ziet (zie afbeelding). Al snel bleek dat atomen niet de allerkleinste deeltjes zijn. Het bleek dat de kern nog gesplitst kan worden in protonen en neutronen en dat zelfs deze deeltjes ook weer verder kunnen worden gesplitst in quarks.

### Wat is de Large Hadron Collider?

Omdat deeltjes zo klein zijn, zijn ze heel moeilijk te onderzoeken. Daar is een apparaat voor nodig dat ongeveer even groot is als de stad Utrecht. Dit apparaat staat in Zwitserland, bij het onderzoeksinstituut CERN en wordt de Large Hadron Collider (LHC) genoemd, wat Grote Deeltjes Botser ofwel deeltjesversneller betekent.

Stel je voor dat je een dichte doos hebt en je wilt weten wat erin zit. Dit kun je op een aantal manieren onderzoeken: een van die manieren is de doos kapot te gooien. Dit is precies waarom ze de LHC gebouwd hebben. Deze versneller is een heel grote holle tunnel die in een enorme cirkel is gelegd. Bepaalde deeltjes, protonen (uit de kernen van atomen waar we het eerder over hadden), worden in deze tunnel geschoten en gaan daar steeds sneller rondjes draaien. Als de deeltjes heel hard gaan – over één rondje om de aarde zouden ze zo'n halve seconde doen – laten wetenschappers ze tegen elkaar botsen. Door deze grote snelheid gaan de protonen kapot als ze op elkaar botsen. Nu zul je denken, ja maar in een proton zitten alleen maar quarks, dus hoe kunnen we dan een ander deeltje dan een quark ontdekken in zo'n versneller? Dit komt doordat het quark door de ontzettend hoge energie die het met zich meedraagt zelf *verandert* in andere elementaire deeltjes. Zo krijg je een hele stroom van nieuwe deeltjes uit twee objecten die eerst massief leken (de protonen) en waarvan ze eerst dachten dat die niet verder gedeeld konden worden.

Maar nu is er nog altijd het probleem dat de deeltjes die hier ontstaan te klein zijn om te zien, vandaar dat je dus een trukendoos nodig hebt. Er is een groot meetapparaat, de ATLAS-detector (zie afbeelding), om de tunnel heen gebouwd op de plaats waar de botsingen plaatsvinden om zoveel mogelijk deeltjes die hieruit ontstaan op te vangen. Op die manier weten we welke deeltjes er zijn, zonder dat we ze zelf echt kunnen zien.



De ATLAS detector.

### Wat is het Higgsdeeltje?

Het Higgsdeeltje is een elementair deeltje. Het kan dus niet worden gedeeld in nog kleinere deeltjes en je kunt het niet zien met je ogen of met een microscoop. Toch wisten natuurkundigen vijftig jaar geleden al bijna zeker dat het deeltje moest bestaan. Dat was omdat meneer Higgs samen met een paar andere natuurkundigen al rekenend had laten zien dat de ideeën uit de natuurkunde (het Standaard Model, waar we het in het kader 'wat is een deeltje' over hadden) alleen kloppen als er een bepaald veld bestaat: het Higgsveld. Zonder het Higgsveld kunnen we namelijk wel heel veel begrijpen over hoe het kan dat de wereld om ons heen is zoals die is: helemaal opgebouwd uit die heel kleine deeltjes. Maar wat we dan nog niet kunnen begrijpen is waarom dingen zwaar zijn, of eigenlijk waarom ze überhaupt gewicht hebben. Daar moet dus wel wat voor bestaan en dat is waarom er wel een Higgsveld *moest* bestaan. Een veld is alleen nog veel moeilijker te ontdekken dan een deeltje, maar omdat er bij een veld ook altijd een deeltje hoort wisten natuurkundigen waar ze naar op zoek moesten: naar het Higgsdeeltje.

### Hoe is het Higgsdeeltje ontdekt?

Lang zijn wetenschappers van CERN samen met wetenschappers van andere universiteiten en instituten bezig geweest om het bestaan van het Higgsdeeltje te bewijzen. Bij CERN worden protonen op elkaar gebotst met heel hoge snelheden, waardoor ze ook in heel veel stukken uit elkaar vallen. Vergelijk dit met het kapotgooien van een glas tegen de muur: hoe harder je dit doet, hoe meer stukjes je zult krijgen en hoe harder deze stukjes zullen wegvliegen. Maar op het maken van deze stukjes heb je geen invloed. Je kunt niet tegen het glas zeggen dat het uiteen moet vallen in stukjes van 1 bij 1 cm. Er is enkel een kans dat er een glasstukje bij zit dat precies zo groot is. Om precies dezelfde reden kun je ook niet tegen de twee botsende protonen zeggen dat zij uiteen moeten vallen in Higgsdeeltjes. Er is een kans dat er een Higgsdeeltje ontstaat, maar die kans is heel klein.

En dan is er nog een moeilijkheid: we kunnen het Higgsdeeltje niet direct met de detector 'zien' (detecteren), omdat het maar heel kort bestaat en daarna weer in andere deeltjes uit elkaar valt. Het zijn *deze* deeltjes die uiteindelijk in de detectoren terechtkomen die om de tunnel zijn gebouwd en soms kunnen we aan de combinatie zien dat ze van het Higgsdeeltje afkomen. De kans is bij iedere botsing dus klein dat er een Higgsdeeltje ontstaat en dan is de kans ook nog klein dat we kunnen zien dat het Higgsdeeltje er is geweest. Je kunt je voorstellen dat er heel veel botsingen nodig zijn, die allemaal één voor één geanalyseerd moeten worden. Daarom heeft het ook zo ontzettend lang geduurd voordat het Higgsdeeltje werd gevonden.

## Hoe werkt het Higgsveld?

Het Higgsveld zorgt ervoor dat deeltjes, en daarmee ook de dingen om ons heen, gewicht hebben. Of het Higgsveld gewicht geeft of niet hangt af van het deeltje dat er doorheen beweegt. Elk deeltje voelt dit veld, maar verschillende deeltjes worden in verschillende mate beïnvloed. Sommige deeltjes worden vertraagd door het veld (zware deeltjes), andere deeltjes vliegen er doorheen zonder het echt te merken (gewichtloze of bijna gewichtloze deeltjes). Dit is een eigenschap van het deeltje dat door het veld beweegt: gewicht. Dit kun je zo voorstellen: het Higgsveld stellen we ons voor als een hele grote groep met mensen in een kamer (zie afbeelding). Deze mensen verlaten de kamer niet, ze zijn er gewoon. Nu zit er in de kamer een deur, waar nieuwe mensen (de deeltjes) doorheen kunnen komen. Er kan nu iemand binnenkomen die onbelangrijk is. De mensen die er al waren ('het Higgsveld') herkennen deze nieuwe persoon niet. Er zal dus weinig gebeuren: de mensen in de kamer praten gewoon verder met elkaar en de nieuwe, onbekende, persoon kan moeiteloos van de ene kant van de kamer naar de andere kant lopen ('het gewichtloze deeltje').

Maar als er nu een beroemdheid binnenkomt, zullen alle ogen op de deur waar hij doorheen komt gericht worden en zullen alle mensen in de kamer op de beroemdheid afstormen. Het is dan een stuk lastiger om door de kamer heen te bewegen. De eigenschap van de persoon die binnenkomt (beroemd of niet beroemd) zorgt er dus voor dat de groep om deze persoon heen op een bepaalde manier reageert. Daardoor kan die persoon langzamer worden. Zo ongeveer werkt het ook met het Higgsveld: door de eigenschap van een deeltje dat door het Higgsveld beweegt is er een bepaalde reactie van het Higgsveld, waardoor het deeltje zwaar kan worden. En nu komt het mooie: het Higgsveld is overal! En dus zorgt het ervoor dat deeltjes met massa ook altijd en overal massa hebben. Activiteit 2: 'Waarom het Higgsveld massa geeft' in paragraaf 2 laat leerlingen de werking van het Higgsveld ervaren.



*Een beroemdheid trekt mensen in een volle kamer aan: een metafoor voor het Higgsveld.*

### **Onderzoek naar het Higgsdeeltje**

Omdat het Higgsdeeltje zo klein is, kan het niet worden waargenomen met een microscoop. Daardoor kan dit deeltje niet rechtstreeks worden onderzocht. Maar hoe weten wetenschappers dan dat het deeltje bestaat en welke eigenschappen het heeft?

Zoals gezegd staat in Genève een deeltjesversneller, de LHC ofwel de Large Hadron Collider, die kernen van waterstofatomen tegen elkaar laat botsen. Dit wordt gedaan met heel hoge snelheden, waardoor de deeltjes die botsen kapotgaan. Vanwege de hoge snelheid hebben de deeltjes die botsen zoveel energie dat er bij de botsingen een heleboel nieuwe deeltjes kunnen ontstaan. Dit kunnen Higgsdeeltjes zijn, maar ook andere elementaire deeltjes. De eigenschappen van de deeltjes die bij botsingen ontstaan, kunnen gemeten worden door detectoren, die geplaatst zijn op de plek waar de botsingen plaatsvinden.

Het onderzoek naar het Higgsdeeltje kan grofweg in twee categorieën worden verdeeld: er zijn wetenschappers die zich meer bezighouden met praktisch onderzoek naar het Higgsdeeltje en er zijn wetenschappers die meer theoretisch onderzoek doen. Nicolo de Groot en Frank Filthaut (winnaars van de Radboud Science Awards) doen meer praktisch onderzoek. Dat betekent dat ze zich bijvoorbeeld bezighouden met de apparatuur die de deeltjes waarneemt en met de software die analyseert wat de detectoren waarnemen. Ook bekijken ze wat de detectoren hebben waargenomen en wat dat betekent. Maar om goed te kunnen analyseren wat de detectoren waarnemen, zijn er ook goede voorspellingen nodig. Deze voorspellingen worden gedaan door wetenschappers die theoretisch onderzoek doen. Uit theoretisch onderzoek kan namelijk een heleboel worden afgeleid over eigenschappen van het Higgsdeeltje en andere elementaire deeltjes. Door voorspellingen van verschillende modellen te controleren met behulp van de deeltjesversneller, weten onderzoekers steeds meer over hoe de wereld in elkaar zit.

Zoals gezegd is de deeltjesversneller in Genève erg belangrijk voor het onderzoek naar het Higgsdeeltje. Daarom werken daar een heleboel wetenschappers uit verschillende landen. Maar een heel groot deel van de wetenschappers in het vakgebied doen onderzoek bij een universiteit, zoals Nicolo en Frank bijvoorbeeld, die werken aan de Radboud Universiteit in Nijmegen. Daar doen ze op de afdeling Experimentele Hoge-Energiefysica samen met anderen praktisch onderzoek naar elementaire deeltjes. Andere onderzoekers op dezelfde universiteit doen daar theoretisch onderzoek naar. Maar hoe gaat dat als deze onderzoekers niet in Genève zitten? Ten eerste is er, vooral bij praktisch onderzoek, regelmatig contact (bijvoorbeeld door middel van videoconferenties) met wetenschappers die in Genève werken. Verder kan het grootste deel van het onderzoek, zoals data analyseren en aan de software werken, overal worden gedaan. Ook het ontwikkelen van theorieën en het doen van voorspellingen wordt overal op de wereld gedaan.

De winnaars van de Radboud Science Awards, Nicolo de Groot en Frank Filthaut, hebben zoals gezegd allebei bijgedragen aan het praktisch onderzoek naar het Higgsdeeltje en dan vooral aan het gedeelte waarbij geanalyseerd wordt wat de detectoren hebben waargenomen zodat de eigenschappen van dit deeltje bepaald kunnen worden. Om een indruk te geven van waar onderzoekers in dit vakgebied zich mee bezighouden geven we hieronder twee voorbeelden van onderzoeksvragen die centraal staan in het vakgebied. De winnaars van de Radboud Science Awards hebben vooral een bijdrage geleverd aan het beantwoorden van de eerste vraag, maar ook de tweede vraag komt terug in hun onderzoek, als het gaat om modellen die het bestaan van nieuwe deeltjes voorspellen.



<b>Onderzoeksvraag</b>	Wat is de massa (het gewicht) van het Higgsdeeltje?
<b>Methode</b> <b>Hoe doen we dit onderzoek?</b>	Verskillende modellen leggen beperkingen op aan de massa die het Higgsdeeltje kan hebben. Anders gezegd: natuurkundigen weten tussen welke waarden de massa van het Higgsdeeltje mag liggen. De daadwerkelijke massa, dus hoe zwaar het precies is, moet gemeten worden als er bij een deeltjesversneller Higgsdeeltjes ontstaan.
<b>Resultaten of verwachtingen</b>	Onderzoekers, onder wie de winnaars van de Radboud Science Awards, hebben gemeten hoe zwaar het Higgsdeeltje precies is. De gemeten massa is namelijk 125 GeV, waarbij een GeV overeenkomt met $1,78 \times 10^{-27}$ kg.
<b>Wat betekenen deze resultaten voor de maatschappij/toekomst/de leerlingen?</b>	Op dit moment heeft dit resultaat nog geen betekenis voor de maatschappij. Het is vooral belangrijk voor onderzoekers die precies willen weten hoe de wereld om ons heen werkt. Nu onze kennis over het Higgsdeeltje toeneemt, is het niet langer ondenkbaar dat in de toekomst dit deeltje gemanipuleerd kan worden en er ook praktische toepassingen zullen ontstaan.
<b>Wat willen we verder nog te weten komen?</b>	Op dit moment zijn onderzoekers druk bezig deze en andere eigenschappen van het Higgsdeeltje nog preciezer te bestuderen.

<b>Onderzoeksvraag</b>	Er bestaat in het universum donkere materie; dat zijn deeltjes die we niet kunnen zien, maar die wel invloed uitoefenen door middel van de zwaartekracht. Onderzoekers vragen zich af uit wat voor deeltjes deze donkere materie bestaat.
<b>Methode</b> <b>Hoe doen we dit onderzoek?</b>	Uit diverse theoretische modellen proberen wetenschappers eigenschappen van donkere materie af te leiden. Deze eigenschappen kunnen door observaties (bijvoorbeeld met telescopen) gecontroleerd worden.
<b>Resultaten of verwachtingen</b>	Tot nu toe zijn er geen deeltjes direct waargenomen die een kandidaat voor donkere materie zouden kunnen zijn, maar er wordt wel steeds meer informatie over donkere materie verzameld.
<b>Wat betekenen deze resultaten voor de maatschappij/toekomst/de leerlingen?</b>	Als de deeltjes waar donkere materie uit bestaat worden waargenomen, betekent dat ten eerste dat we meer weten over hoe het universum in elkaar zit. Praktische toepassingen van donkere materie zullen pas later komen.
<b>Wat willen we verder nog te weten komen?</b>	Wetenschappers willen ten eerste de deeltjes waarnemen waaruit donkere materie bestaat. Verder willen wetenschappers graag weten wat de precieze eigenschappen van deze deeltjes zijn.

### **Verder kijken en lezen over het Higgsdeeltje:**

Het Klokhuis heeft een aflevering gemaakt over de ontdekking van en het onderzoek naar het Higgsdeeltje: <http://www.hetklokhuis.nl/tv-uitzending/2426>.

Het Jeugdjournaal heeft ook aandacht besteed aan het Higgsdeeltje: <http://jeugdjournaal.nl/item/391400-wetenschapper-dolblij-met-ontdekking-van-de-eeuw.html>.

Website van CERN: daar kun je zien hoe leerlingen spelenderwijs leren over het onderzoek dat daar wordt gedaan (deze site is niet in het Nederlands): <http://www.cernland.net>.

Diverse filmpjes en artikelen over Higgs:

<http://www.nrc.nl/nieuws/2012/07/04/wat-is-het-higgs-deeltje-en-waarom-is-het-zo-moeilijk-te-vinden>

<http://www.wetenschap24.nl/specials/Higgs.html>

<http://www.higgsdeeltje.nl>

Documentaire over de zoektocht naar het Higgsdeeltje: <http://www.uitzendinggemist.nl/afleveringen/1127755>.

## Het Higgsdeeltje


College door prof. dr. Frank Linde, waarin hij uitlegt hoe we dankzij het Higgsdeeltje de wereld om ons heen beter kunnen begrijpen: <http://www.universiteitvannederland.nl/college/hoe-heeft-het-higgs-deeltje-de-wereld-veranderd>.

Artikel op Kennislink over de huidige stand van zaken rondom het Higgsdeeltje: <http://www.kennislink.nl/publicaties/het-higgsdeeltje-een-jaar-later>.

Powers of Ten, een film waarbij je een idee krijgt van de afstandsschalen in het universum: <http://www.youtube.com/watch?v=0fKBhvDjuy>.

## 3.2 Het Higgsdeeltje de klas in!

*Montessorischool Westervoort: Marijke Weijland (lerares), Monique Schaminée (lerares)*  
*Mariaschool Boven-Leeuwen: Danielle ten Bult (lerares), Astrid Lammers (lerares)*

In deze paragraaf beschrijven we hoe je als leraar in de klas een project onderzoekend leren kunt opzetten met als thema het Higgsdeeltje. Bij elke stap van het onderzoekend leren geven we activiteiten, praktische tips en suggesties. We doen dit op de drie niveaus van onderzoekend leren, zoals beschreven in Hoofdstuk 1. De beschrijvingen in deze paragraaf zijn gebaseerd op de ervaringen van de Montessorischool Westervoort en de Mariaschool in Boven-Leeuwen. De 'online bijlagen' waar bij verschillende activiteiten naar wordt verwezen, zijn te vinden op onze website [www.wetenschapsdeklasin.nl](http://www.wetenschapsdeklasin.nl). Wanneer je dit symbool  tegenkomt, dan is dit een verwijzing naar deze website. De materialen waarnaar verwezen wordt, staan op de webpagina's die voor dit boek zijn ingericht.

### Kerdoelen

Bij dit project kunnen de volgende kerndoelen aan bod komen, afhankelijk van hoe breed wordt ingestoken:

Engels

- 13 De leerlingen leren informatie te verwerven uit eenvoudige gesproken en geschreven Engels teksten.

*Rekenen/wiskunde*

- 33 De leerlingen leren meten en leren te rekenen met eenheden en maten, zoals bij tijd, geld, lengte, omtrek, oppervlakte, inhoud, gewicht, snelheid en temperatuur.

*Oriëntatie op jezelf en de wereld*

- 41 De leerlingen leren over de bouw van planten, dieren en mensen en over de vorm en functie van hun onderdelen.  
 42 De leerlingen leren onderzoek doen aan materialen en natuurkundige verschijnselen, zoals licht, geluid, elektriciteit, kracht, magnetisme en temperatuur.  
 50 De leerlingen leren omgaan met kaart en atlas, beheersen de basistopografie van Nederland, Europa en de rest van de wereld en ontwikkelen een eigentijds geografisch wereldbeeld.

*Kunstzinnige oriëntatie*

- 54 De leerlingen leren beelden, taal, muziek, spel en beweging te gebruiken, om er gevoelens en ervaringen mee uit te drukken en om er mee te communiceren.

### Doelen van het project

Met dit project kan aan de volgende doelen worden gewerkt:

*Cognitieve doelen*

- De leerlingen krijgen een beeld van de deeltjes waaruit alles om hen heen en in de kosmos is opgebouwd;
- De leerlingen weten dat er naast het Higgsdeeltje nog andere elementaire deeltjes zijn;
- De leerlingen leren door middel van de informatie en activiteiten hoe onderzoek naar deeltjes (in vereenvoudigde vorm) gedaan worden en welke veronderstellingen daaraan ten grondslag liggen;

## Het Higgsdeeltje

- De leerlingen weten dat CERN in Zwitserland ligt en kennen de belangrijkste topografie van Zwitserland.

### *Vaardigheidsdoelen*

- De leerlingen doen ervaringen op met het werken van de cyclus van onderzoekend leren;
- De leerlingen leren op basis van de voorbeelden die ze aangeboden krijgen zelf een onderzoeksvraag te stellen en die door middel van een praktisch onderzoek zelf te beantwoorden;
- De leerlingen leren op basis van eerdere ervaringen en analyse een hypothese te formuleren;
- De leerlingen leren om een tentoonstelling/ presentatie voor te bereiden op basis van hun eigen onderzoek;
- De leerlingen leren om gegevens in tabellen en grafieken te verwerken;
- De leerlingen leren te reflecteren op hun eigen ideeën en activiteiten;
- De leerlingen leren conclusies te trekken uit eigen onderzoek.

### *Samenwerkingsdoelen*

- De communicatie tussen de leerlingen bij samenwerking in groepjes wordt versterkt;
- De leerlingen leren dat samenwerken binnen een groepje dat dezelfde interesse/vraag heeft stimulerend werkt;
- De leerlingen dragen kennis aan elkaar over (bij verschillende niveaus van ervaring);
- Ouders raken betrokken bij het leerproces (omdat ze worden uitgenodigd de presentaties bij te wonen).

### *Affectieve doelen*

- De leerlingen maken kennis en werken met een baanbrekend thema;
- De leerlingen maken kennis met wetenschap en met de universiteit;
- De leerlingen maken kennis met literatuur en beeldmateriaal (films, documentaires, series, fotomateriaal, enzovoort) over het onderwerp.



## Stap 1. Introductie

Tijdens de introductiefase komen leerlingen voor het eerst in aanraking met een onderwerp. Het doel is hen te prikkelen en nieuwsgierig te maken naar het onderwerp.

1 2 3

Omdat het Higgsdeeltje een moeilijk onderwerp is, hebben beide scholen die het project hebben uitgevoerd ervoor gekozen om het onderwerp te introduceren met een filmpje. Er kan natuurlijk ook gekozen worden voor een actievere vorm.

### ACTIVITEIT 1: ZOEK HET UIT! KLEINSTE DEELTJE

#### Doelen

- De leerlingen maken kennis met de terminologie rondom het Higgsdeeltje;
- De leerlingen krijgen informatie over het Higgsdeeltje;
- De leerlingen leren informatie te halen uit een film door aantekeningen te maken en deze te verwerken in een mindmap;
- De leerlingen oefenen met het maken van aantekeningen terwijl ze luisteren (aandacht spreiden);
- De leerlingen trainen volgehouden aandacht.

#### Werkvorm

Klassikaal film kijken en bespreken.

#### De activiteit zelf

##### Voorbereiding en benodigdheden

Film op het digibord klaarzetten.

##### Duur

Filmduur 20 minuten, met stilzetten en vragen beantwoorden totaal 45 minuten.

##### Inleiding/oriëntatie

Er wordt kort uitgelegd waar de film over gaat en hoe die aansluit bij het thema. De leerlingen krijgen de opdracht mee om tijdens het kijken aantekeningen te maken in de vorm van een mindmap. Ook vertelt de leraar wat leerlingen zouden moeten weten nadat ze de film hebben gezien.

##### Activiteit

Het Klokhuis-filmpje wordt op het digibord getoond. De leerlingen bekijken het filmpje en maken aantekeningen in de vorm van een mindmap. De leraar zet de film regelmatig stil om met vragen te peilen of de inhoud duidelijk overkomt en om vragen van leerlingen te beantwoorden.

##### Afronding

De leerlingen praten met elkaar en beantwoorden vragen; daarbij gebruiken ze de mindmap.

## Het Higgsdeeltje

### Tips

Het is fijn als leerlingen deze werkvorm al geoefend hebben bij inhoudelijk minder moeilijke lesstof, zodat ze gewend zijn aan luisteren, nadenken en schrijven tegelijk en kunnen aangeven wanneer ze de draad kwijt zijn.

### Bronnen

Klokhuis-filmpje 'Zoek het uit! Kleinste deeltje' <http://www.hetklokhuis.nl/tv-uitzending/2426>



## Stap 2. Verkennen

In de verkenningsfase gaande leerlingen het onderwerp breed verkennen. Dit doen ze met behulp van allerlei activiteiten die ze soms individueel, soms in groepjes en soms klassikaal uitvoeren.

1 2 3

Hieronder staat een scala aan activiteiten beschreven. Aan de activiteiten is goed te zien hoe je een puur natuurkundig onderwerp als het Higgsdeeltje kunt koppelen aan heel andere lessen, zoals aan topografie en handvaardigheid. De volgorde van de activiteiten is zo opgebouwd dat ze een lange, gevarieerde verkenningsfase vormen. Je kunt natuurlijk ook zelf een keuze maken uit het ruime aanbod.

### ACTIVITEIT 2: WAAROM HET HIGGSVELD MASSA GEEFT

#### Doelen

- De leerlingen krijgen zicht op het bestaan van het Higgsveld;
- De leerlingen krijgen zicht op hoe het kan dat het ene deeltje meer massa heeft dan het andere.

#### Werkvorm

Klassikaal 'spel'

#### De activiteit zelf

##### Vorbereiding en benodigdheden

- Er worden twee stapeltjes kaartjes gemaakt. De ene stapel is hoger dan de andere (ongeveer in een verhouding van 3:2), iedere stapel heeft een eigen kleur;
- Een ruimte zonder al te veel obstakels (bijvoorbeeld een ruime gang of een gymzaal).

**Duur: 10 minuten**

#### Inleiding/oriëntatie

Uitleg wat er gaat gebeuren, zonder verdere achtergrondinformatie.

### **Activiteit**

Twee leerlingen krijgen ieder één van de stapels kaartjes. De andere leerlingen verspreiden zich over de ruimte. De twee leerlingen delen hun kaartjes uit aan de leerlingen die verspreid staan, maximaal één kaartje per kind per keer. Alle kaartjes moeten uitgedeeld worden. Omdat de stapels niet even groot zijn, is het ene kind eerder klaar dan het andere kind.

### **Afronding**

In een gesprek wordt het verband gelegd tussen deze activiteit en het Higgsdeeltje. De leerlingen die zich door de ruimte hebben verspreid, zijn als het ware Higgsdeeltjes. De mensen die naar de overkant moeten gaan, stellen andere deeltjes voor die natuurkundigen hebben waargenomen. De vraag die natuurkundigen zich al langer stelden, was waarom het ene deeltje sneller en makkelijker beweegt dan het andere deeltje en dus lichter is. De verklaring is dat de hele ruimte gevuld is met Higgsdeeltjes (net zoals de zaal gevuld is met mensen). Als er andere deeltjes door de ruimte bewegen, kunnen deze deeltjes veel of weinig interactie hebben met de Higgsdeeltjes (dit wordt door natuurkundigen *koppeling* genoemd en wordt geïllustreerd door het uitdelen van de kaartjes). Lichte deeltjes (weinig kaartjes) worden dus niet of nauwelijks beïnvloed door Higgsdeeltjes en kunnen zich bijna ongestoord door de ruimte bewegen, terwijl zware deeltjes (veel kaartjes) meer invloed ondervinden. Op deze manier kan worden verklaard waarom het ene deeltje lichter of zwaarder is dan het andere deeltje.

### **Tips**

- De leerlingen gaan al snel rennen om de kaartjes uit te delen, zorg voor een grote ruimte waar dat kan;
- Omgekeerd kan ook, dat leerlingen kaartjes van hun kleur ophalen;
- Zorg dat je bij het eindgesprek zelf genoeg weet over het Higgsveld. De vragen van de kinderen kunnen heel verrassend zijn.

### **Bronnen**

Materialen WKRU Winterschool 2014 [http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop\\_spelen\\_met\\_het\\_higgsdeeltje.zip](http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop_spelen_met_het_higgsdeeltje.zip) (deze activiteit is een variant op de activiteit 'het Higgsspel').

### ACTIVITEIT 3: EIN-O MOLECUUL – OPGEBOUWD UIT ATOMEN

#### Doelen

- De leerlingen krijgen inzicht in de opbouw van moleculen;
- De leerlingen krijgen inzicht in de verschillen in complexiteit van moleculen;
- De leerlingen maken kennis met naamgeving van stoffen/moleculen;
- De leerlingen leren gebruik te maken van de fotogramemogelijkheid op een laptop.

#### Werkvorm

Individueel, in eigen werktijd

#### De activiteit zelf

##### Vorbereiding en benodigheden

Ein-O pakket aanschaffen

##### Duur

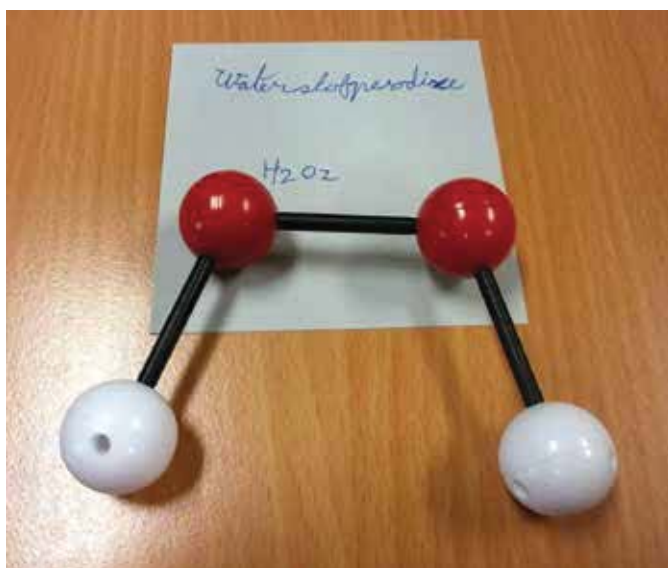
Dit kost qua voorbereiding bijna geen tijd; de leerlingen kunnen zelfstandig aan de slag met het pakket.

##### Activiteit

Het Ein-O pakket is een set waarmee je moleculen driedimensionaal kunt nabouwen. In het pakket zitten instructies voor de bouw van verschillende moleculen. De leerlingen kunnen met dit pakket dus zelfstandig ontdekken en uitproberen. Om iets van deze activiteit te kunnen bewaren in een projectmap kun je leerlingen een foto laten maken.

##### Afronding

De afgedrukte foto's van de gebouwde moleculen worden beoordeeld.



Waterstofperoxidemolecuul van een leerling.



**ACTIVITEIT 4: WAAROM ÉÉN EXPERIMENT NIET GENOEG IS: HET DOBBELSTEENEXPERIMENT**

**Doelen**

- De leerlingen begrijpen en kunnen verwoorden waarom een experiment een groot aantal keer herhaald moet worden om zeker te zijn van de resultaten;
- Doorzetten: de leerlingen hebben al snel door dat de oorzaak van de afwijking bij de worpen zit in het verschil in gewicht van een van de dobbelstenen. De vraag is echter wanneer er vaak genoeg gegooid is om met een aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid te kunnen zeggen welk aantal ogen het meest gegooid wordt;
- De leerlingen leren consistent een opdracht uit te voeren (namelijk steeds op dezelfde manier werpen van de dobbelstenen);
- De leerlingen oefenen in het samenwerken (gebruikmaken van elkaars acties, afspraken maken binnen het groepje, taakverdeling);
- De leerlingen leren hun waarnemingen nauwkeurig te noteren (zijn de metingen zodanig genoteerd dat duidelijk is wat ze betekenen?).

**Werkvorm**

Er worden groepjes gevormd van vier tot vijf leerlingen die gezamenlijk het experiment uitvoeren.

**De activiteit zelf**

**Voorbereiding en benodigdheden**

- Formulieren (één per groepje);
- Dobbelstenen (per groepje vier gewone en één verzwaarde dobbelsteen, te vinden in (online) spelletjeswinkels);
- Bekers om te gooien (één per groepje).

**Duur: 60 minuten**

**Inleiding/oriëntatie**

Ieder groepje krijgt vijf dobbelstenen (waarvan er één is verzwaard) en een beker waarmee de dobbelstenen gegooid moeten worden. Het aantal ogen dat gegooid wordt, moet systematisch geturfd worden. Het doel is om aan te tonen met welke waarde (het aantal ogen) iets mis is (door de verzwaaring wordt een bepaald getal bovenmatig vaak gegooid, maar dat vertel je ze niet). Voordat de dobbelstenen op tafel komen, bespreek je eerst het werkblad en worden de taken verdeeld binnen de groepjes. Je kunt ze ook zelf laten bedenken welke taken er verdeeld moeten worden of je geeft aan welke taken het zijn: één kind werpt, één kind noteert, één kind controleert of er goed genoteerd wordt, twee kinderen tellen het aantal ogen. Elk groepje maakt een plan hoe ze gaan bewijzen dat er iets mis is en wát er mis is.

**Activiteit**

De leerlingen gooien een groot aantal keren alle dobbelstenen tegelijk op tafel. Ze gebruiken daarvoor een beker. Na iedere worp wordt in de eerste kolom van het werkblad geturfd welke waarden (aantal ogen) zijn gegooid. Na vijf keer gooien wordt in de tweede kolom genoteerd hoeveel streepjes er bij ieder aantal ogen in de eerste kolom staan. Na tien worpen doen ze hetzelfde in de derde kolom, enzovoort. Ze gaan hier net zolang meer door tot ze denken te weten wat er afwijkt en waarom. Na hoeveel worpen denken ze het te weten en na hoeveel worpen weten ze het helemaal

## Het Higgsdeeltje

zeker? Ze mogen de conclusie alleen trekken op basis van het gooien van de dobbelsteen, niet door de dobbelsteen van dichtbij te bekijken (omdat de verzwaaring zichtbaar is).

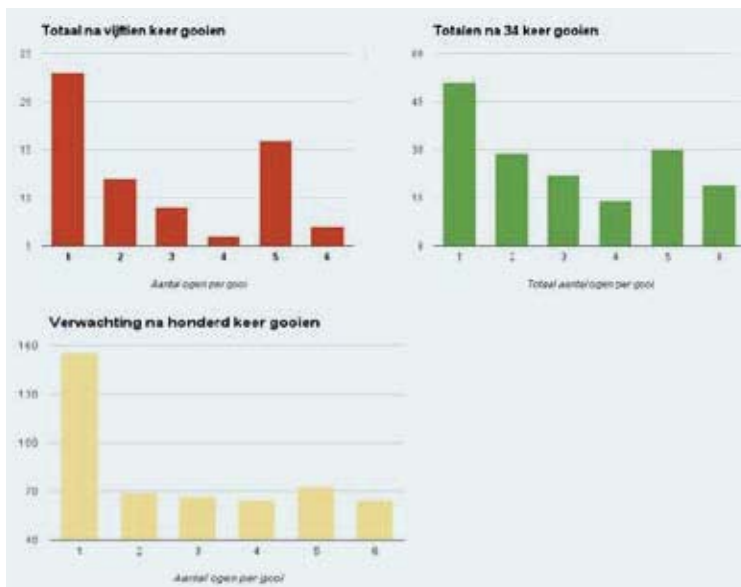
### Afronding

Bespreken resultaten: wanneer, na hoeveel worpen kon je met zekerheid zeggen dat er met een bepaalde waarde iets mis was en waar bleek dat uit?

Relatie leggen met het Higgsdeeltje: deze oefening maakt duidelijk waarom in de LHC heel vaak deeltjes op elkaar moeten botsen voordat je zeker weet dat je het Higgsdeeltje gevonden hebt. Je moet een experiment dus vaak herhalen om iets te bewijzen.

Evalueren activiteit: aan de dobbelsteen is te zien dat die verzwaard is. Omdat leerlingen daardoor eigenlijk al weten welk getal het meest zal voorkomen, is het lastig door te gaan, ook als ze begrijpen waarom het nodig is om door te gaan. Maar dit kan bij echt onderzoek ook gebeuren: je denkt het antwoord op je vraag eigenlijk al te weten, toch moet je meer experimenten doen om zeker te weten dat het antwoord dat je geeft ook klopt.

De onderzoekers die dit spel mede hebben bedacht, laten zien hoe vaak zij zelf hebben gegooid voordat ze zeker waren van hun zaak. Dit hebben ze geïllustreerd met een aantal diagrammen die je in de klas kunt gebruiken (zie online bijlagen [🔗](#)).



Verdeling van het aantal ogen na 15, 34 en 100 keer gooien. Wanneer weet je echt zeker wat het afwijkende nummer is?

### Tips

- Het is belangrijk dat de leerlingen kunnen verwoorden dat er een aanzienlijk verschil is tussen de uitspraken die je kunt doen na 5, 10 of 25 worpen;
- Benadruk dat het gaat om het leveren van het bewijs;
- Leg na enkele minuten de activiteit even stil en vraag waar ze tegenaan lopen en of het goed gaat met registreren of turven.

### Online bijlagen ☉

- Werkblad dobbelsteenexperiment;
- Diagrammen voorbeeldexperiment (voor presentatie).

### Bronnen

Materialen WKRU Winterschool 2014 [http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop\\_spelen\\_met\\_het\\_higgsdeeltje.zip](http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop_spelen_met_het_higgsdeeltje.zip) (deze activiteit is gebaseerd op de activiteit 'Achtergrond en signaal').

### ACTIVITEIT 5: DE WEBSITE CERNLAND VERKENNEN

---

*NB: dit is een Engelstalige website!*

### Doelen

- Kennis opdoen over CERN en de experimenten die daar gedaan worden, de inrichting van het gebied, de mensen die er werken, enzovoort;
- Op een speelse manier bezig zijn met een complex thema;
- Engels lezen (inclusief terminologie over deeltjes).

### Werkvorm

Individueel en zelfstandig, de opdracht staat wekelijks op de weektaak.

### De activiteit zelf

#### Vorbereiding en benodigdheden

Er is weinig voorbereiding nodig, omdat de opdrachten op de website staan. Controleer of de website goed bereikbaar is. Bekijk hem zelf van tevoren goed, zodat je er een introductie over kunt geven.

#### Inleiding/oriëntatie

Laat de website zien en geef korte introductie over de verschillende mogelijkheden. Leg uit wat er van de leerlingen verwacht wordt bij het invullen van het logboek.

#### Activiteit

De leerlingen kunnen individueel aan de slag met de opdrachten op de website. Ze houden zelf in een logboek bij hoeveel tijd ze besteden, wat ze doen, wat ze inhoudelijk hebben geleerd en welke nieuwe Engelse woorden ze nu kennen (zie online bijlagen ☉). De leraar loopt rond om vragen te beantwoorden en geeft feedback op het logboek tijdens het nakijken van de weektaak.

#### Afronding

Aan het einde van het project wordt het logboek beoordeeld. Hoe vaak hebben ze de activiteit gedaan, wat is er genoteerd en geleerd?

#### Tips

Geef leerlingen de ruimte om aan elkaar te vertellen wat ze hebben ontdekt op de website; ze kunnen elkaar tips geven voor andere leuke games of filmpjes.

## Het Higgsdeeltje

**Online bijlagen** ©  
Logboekpagina CERN

**Bronnen**  
[www.cernland.net](http://www.cernland.net)



*Leerlingen verkennen het CERNland.*

### ACTIVITEIT 6: KENNISBANK OVER HIGGS MAKEN

#### **Doelen**

- De leerlingen doen kennis op over het Higgsdeeltje;
- De leerlingen verdiepen de kennis die ze met het Klokhuis- filmpje hebben opgedaan (zie activiteit 1);
- De leerlingen oefenen met het lezen en begrijpen van een tekst;
- De leerlingen oefenen het hardop lezen: intonatie, uitspraak, volume;
- De leerlingen oefenen het vragen stellen, kennis delen en in gesprek gaan met elkaar;
- De leerlingen gaan aan de slag met coöperatief leren;
- De leerlingen leren een samenvatting te maken;
- De leerlingen gaan aan de slag met 'leren leren'.

#### **Werkvorm**

Klassikaal lezen en bespreken  
Individueel studiekaartjes maken  
Individueel en samen leren van de kaartjes  
Individueel een toets maken

### **De activiteit zelf**

#### **Vorbereiding en benodigdheden**

De leraar kopieert voor elke leerling een eenvoudige tekst over het Higgsdeeltje, evenals de studieopdracht (zie online bijlagen). Het hoofdstuk 'Hoe klein is het kleinste deeltje?' uit het Klokhuis-boek is zeer geschikt (zie Bronnen). Deze tekst sluit ook goed aan bij het filmpje bij activiteit 1: Zoek het uit! Kleinste deeltje.

Voor iedere leerling worden drie kaartjes gesneden in verschillende kleuren, rood, blauw en wit.

#### **Duur**

Lezen en bespreken van de tekst: 45 minuten

Maken van de kaartjes: 30 tot 45 minuten

Leren voor de toets: in eigen studietijd

Afnemen van de toets: 20 minuten

#### **Inleiding/oriëntatie**

De tekst wordt klassikaal doorgelezen. Vragen van de leerlingen worden besproken, de leraar stelt verdiepende vragen en checkt door middel van vragen of de leerlingen alles echt begrepen hebben. Er is nu gelegenheid om kennis toe te lichten, ervaringen te delen en instructie te geven. Ook kunnen de leerlingen op elkaar reageren als er vragen worden gesteld; de leraar moedigt het gesprek en de discussie aan en staat toe dat er tot een bepaalde reikwijdte van het onderwerp wordt afgedwaald.

#### **Activiteit**

Na het lezen van de tekst volgt de opdracht voor de studiekeartjes. De opdracht is als volgt: elk kind maakt een vraag over het stukje tekst, schrijft deze op de voorkant van een rood studiekeartje en schrijft het antwoord erachter. Daarna maakt iedereen een tekening over het stukje tekst op een wit kaartje en schrijft op de achterkant van het kaartje wat hij of zij getekend heeft. Vervolgens haalt elk kind een moeilijk woord uit de tekst, schrijft dat woord op de voorkant van een blauw studiekeartje en schrijft de betekenis ervan op de achterkant. De leraar controleert alle kaartjes. Als het niet goed is, doen ze het opnieuw. Het gaat bij deze activiteit vooral om de relatie met de tekst, de leesbaarheid en de juistheid van de informatie. De studiekeartjes worden gebruikt om te leren voor een toets over de tekst.

#### **Afronding**

Na de les worden de kaartjes gelamineerd en in een bakje gezet, zodat de leerlingen er tijdens het project nog eens naar kunnen kijken. De toets volgt aan het einde van de projectperiode.

#### **Tips**

- Laat de leerlingen eerst elkaars kaartjes beoordelen, voordat de leraar dat doet;
- De leerlingen kunnen gezamenlijk studeren en elkaar overhoren.

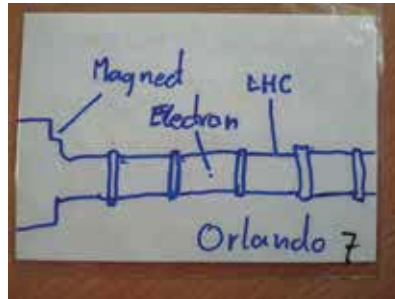
#### **Online bijlagen**

Studieopdracht kennisbank

#### **Bronnen**

Heinsman, Edda (2013), *Zoek het uit! Het Klokhuisboek over onderzoek*.

## Het Higgsdeeltje



Een studiekaartje voor de kennisbank.

### ACTIVITEIT 7: AANDACHTSTAFEL HIGGS EN GERELATEERDE THEMA'S

#### Doelen

- De leerlingen leren te kiezen welke inhoud hen aanspreekt;
- De leerlingen breiden hun woordenschat uit door de betekenis van moeilijke woorden op te zoeken;
- De leerlingen oefenen begrijpend lezen;
- De leerlingen verwerven zelfstandig nieuwe kennis.

#### Werkvorm

Individueel

#### De activiteit zelf

##### Vorbereiding en benodigheden

Selecteer boeken over het Higgsdeeltje en aanverwante onderwerpen, zoals over deeltjes, moleculen, en dergelijk (zie 'Bronnen' voor voorbeelden). Leg de boeken op een plek waar de leerlingen er bij kunnen en er doorheen kunnen bladeren.

##### Duur:

Zoveel tijd als je de leerlingen wilt geven.

##### Activiteit

Leerlingen kiezen een boek dat hen aanspreekt. Tijdens hun zelfstandige werktijd lezen ze het boek (of stukken uit meerdere boeken). Woorden die ze niet begrijpen zoeken ze op. Als ze verder iets niet begrijpen, nemen ze zelf het initiatief om een medeleerling of de leraar om hulp te vragen.

##### Tips

Laat de leerlingen aan elkaar vertellen wat ze hebben gelezen en wat ze daarvan hebben geleerd.

##### Online bijlagen ©

Leeslogboek aandachtstafel

### Bronnen

- Hendriks, L., & Walrecht, R. (2012) *Higgs gevonden: Compleet overzicht van de bouwstenen van de materie*.
- Wetenschap in beeld (2014) 'Higgs - en nu?'
- Richardson, H. & Anderson, S. (1999), *Hoe... splits je een atoom? De praktische gids voor toekomstige supergeleerden*.
- Schilling, G. (2012) *Higgs, het elementair abc van een elementair deeltje*.
- Keulen, J.P. (2012), *De deeltjesdierentuin: Over higgsbosonen, neutrino's en meer*.
- Platt, R. (2001), *Uitvindingen verklaard: een beginnersboek over technologische doorbraken*.
- Flood, M. & Spurgeon, R. (1995) *Energie & Kracht: proeven en experimenten voor beginners (uit de serie 'De wereld van de wetenschap')*.
- Bais, S. (2009), *De natuurwetten: iconen van onze kennis*.
- Sykora, C. (2004), *Natuurwetenschap in beeld*.
- Farndon, J. & Hattum, D. van, (2008), *De grote wetenschappers*.

### ACTIVITEIT 8: OBJECTIEVE OBSERVATIE OFWEL 'HET BLACK BOX-EXPERIMENT'

#### Doelen

- De leerlingen krijgen inzicht in hoe wetenschappers onderzoek doen naar iets dat niet zichtbaar is;
- De leerlingen leren conclusies te trekken op basis van alleen objectieve observaties.

#### Werkvorm

Carrousel in groepjes

#### De activiteit zelf

##### Vorbereiding en benodigdheden

- Plaats vier dozen met de onderkant open op satéprikkers op een tafel. Tussen de doos en het tafelblad is precies zoveel ruimte dat er knikkers onderdoor kunnen rollen (zie afbeelding);
- Zet onder iedere doos een voorwerp, zodanig dat je het niet meer ziet. Kies voorwerpen van verschillende vorm en materiaal (zie het online fotoblad voor voorbeelden);
- Circa twintig knikkers;
- Zet de dozen in een bak, zodat de knikkers niet van tafel kunnen rollen.

**Duur: 30 minuten**

##### Inleiding/oriëntatie

De leerlingen krijgen de opdracht zoveel mogelijk eigenschappen van het voorwerp onder de doos te raden door er knikkers naar toe te rollen. Het is belangrijk om die eigenschappen goed op te schrijven, omdat die tekst later nodig is om het voorwerp te laten raden.

##### Activiteit

Ieder groepje gaat bij een doos staan. De kinderen rollen om de beurt een knikker onder de doos door naar het voorwerp. Het al dan niet terugkaatsen van de knikker, de richting en snelheid van het terugkaatsen, het geluid dat je hoort wanneer de knikker het voorwerp raakt, al die dingen zeggen iets over het voorwerp: welke vorm het heeft, is het hard of zacht, is het hol of massief, enzovoort. Na circa tien minuten draaien de groepjes door naar een volgende doos, daarna steeds na vijf minuten, totdat elke groepje elke doos heeft gehad.

## Het Higgsdeeltje

### **Afronding**

Als de kinderen de vier dozen (black boxes) onderzocht hebben, hangt de leraar een blad met foto's op voor de klas. Er staan foto's op van de vier voorwerpen die onder de dozen stonden, maar ook van enkele andere. In een klassikaal gesprek beargumenteren de leerlingen welk voorwerp onder welke doos stond. Hierna worden de black boxes opgetild, de voorwerpen worden zichtbaar. De ervaring leert dat het behoorlijk moeilijk is om het goede voorwerp te raden.

Ten slotte wordt een link gelegd met het Higgsdeeltje: deze activiteit laat zien hoe je een voorwerp en de eigenschappen ervan kunt achterhalen zonder dat je het voorwerp kunt zien. Op precies dezelfde manier zijn in 1922 de allereerste atomen ontdekt, namelijk door alfadeeltjes tegen een fotografische plaat aan te schieten, waarna de alfadeeltjes lichtflitsjes afgaven. Door een atoom voor de fotografische plaat te plaatsen kan bepaald worden of er een kern in het atoom zit. Als dat namelijk het geval is, zullen de alfadeeltjes op die kern afketsen en zo niet meer tegen de fotografische plaat komen. Op die plek op de plaat is dan geen lichtflitsje geweest en daar zal de fotografische plaat dus donker zijn (het Rutherford-experiment). Tegenwoordig worden deeltjes in deeltjesversnellers gevonden door ze met enorme snelheden tegen elkaar te laten botsen. Raken de deeltjes elkaar, dan ketsen ze af en kunnen wij ze waarnemen in een omliggende detector.

### **Online bijlagen**

- Fotoblad inhoud black boxes (ter inspiratie)
- Extra activiteit 1: een alternatieve versie van de opdracht, met een rollenspel om het objectief observeren extra te oefenen.

### **Bronnen**

Downloads Winterschool 2014 van de website wkru.nl: [http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop\\_spelen\\_met\\_het\\_higgsdeeltje.zip](http://www.ru.nl/publish/pages/601983/workshop_spelen_met_het_higgsdeeltje.zip) . Deze activiteit is een variant op het black box-experiment (Rutherford experiment).



*Leerlingen proberen er met knickers achter te komen wat er onder de doos ligt.*



### ACTIVITEIT 9: TWEE COLLEGES OVER HET HIGGSDEELTJE

Deze activiteit is vooral bedoeld voor leerlingen die extra verdieping zoeken en ook aankunnen. De activiteit bestaat uit twee colleges over het Higgsdeeltje: een college van prof. dr. Frank Linde, te zien bij de 'Universiteit van Nederland' en een college dat prof. dr. Nicolo de Groot gaf voor de Winterschool van het WKRU. Beide colleges zijn behoorlijk pittig voor leerlingen van de basisschool; het college van Nicolo de Groot is nog wat moeilijker dan dat van Frank Linde. We raden dan ook aan om deze colleges pas na verloop van tijd te laten bekijken en beslist niet als inleiding.

#### Doelen

- De leerlingen krijgen nogmaals uitleg over het Higgsdeeltje, maar nu op een andere manier;
- De leerlingen krijgen meer wetenschappelijke informatie over kleine deeltjes cq. het Higgsdeeltje;
- De leerlingen oefenen het halen van informatie uit een film;
- De leerlingen zien met wat voor ingewikkelde materie wetenschappers zoal bezig zijn;
- De leerlingen oefenen het maken van aantekeningen terwijl ze luisteren (aandacht spreiden);
- De leerlingen trainen volgehouden aandacht.

#### Werkvorm

Klassikaal

#### De activiteit zelf

##### Voorbereiding en benodigheden

Digibord klaarzetten met de twee colleges (zie Bronnen).

##### Duur

De films van de colleges duren respectievelijk 20 en 30 minuten. Als de film zo nu en dan wordt stilgezet om vragen te beantwoorden, is er meer tijd nodig.

##### Inleiding/oriëntatie

Voorkennis ophalen en verdiepen; duidelijk maken dat het om dezelfde informatie gaat, dat die alleen anders wordt verteld en gepresenteerd.

##### Activiteit

De colleges worden bekeken op het digibord. De leerlingen bekijken een film en maken ondertussen aantekeningen in de vorm van een mindmap. De film wordt regelmatig stilgezet zodat de leraar vragen kan beantwoorden en verdiepende vragen kan stellen.

##### Afronding

De leerlingen praten met elkaar, stellen vragen en beantwoorden elkaars vragen. Ze gebruiken hierbij hun mindmap. Deze kunnen ze na afloop van het gesprek nog verder aanvullen met nieuwe inzichten.

##### Tips

Het is fijn als de leerlingen deze werkvorm al eerder geoefend hebben bij inhoudelijk minder moeilijke leerstof, zodat ze gewend zijn aan luisteren, nadenken en schrijven tegelijk en ook kunnen aangeven wanneer ze even de draad kwijt zijn. Het doel is niet dat leerlingen alles moeten begrijpen. Het gaat erom dat ze inzien dat wetenschappers bezig zijn met zeer ingewikkelde materie. Deze werkvorm is heel geschikt voor leerlingen die een extra uitdaging aankunnen.

### **Bronnen**

College van prof. dr. Frank Linde bij de Universiteit van Nederland: <http://www.universiteitvannederland.nl/college/hoe-heeft-het-higgs-deeltje-de-wereld-veranderd/>.

College van prof. dr. Nicolo de Groot bij de Winterschool van het WKRU: <http://www.ru.nl/wetenschapsknooppunt/activiteiten/winterschool/winterschool-2014-0/>.

### ACTIVITEIT 10a: DEELTJESDIERENTUIN MAKEN

---

#### **Doelen**

- Verdere verdieping op een speelse manier van het onderwerp 'deeltjes';
- Een deeltje maken/verbeelden;
- Vertalen van Engelse tekst.

#### **Werkvorm**

Individueel

#### **De activiteit zelf**

##### **Vorbereiding en benodigdheden**

Kies op de website [particlezoo.net](http://particlezoo.net) verschillende deeltjes uit, print ze en kopieer de afbeeldingen met de tekst. Bespreek de opdracht (zie online bijlagen). Verzamel de materialen (goede kleuren vilt, naald en draad, vulmiddelen van verschillend gewicht en labels).

##### **Inleiding/oriëntatie**

Relatie leggen met Higgsdeeltje of met deeltjes in het algemeen: de deeltjes die de leerlingen gaan maken, bevinden zich allemaal binnenin een atoom, net als het Higgsdeeltje. Ze maken nu kennis met heel andere deeltjes, die ze misschien eerder al eens tegengekomen zijn.

##### **Activiteit**

Elke leerling krijgt een afbeelding van een deeltje. Ze vertalen de Engelse tekst en maken het deeltje na (zie opdrachtblad bij de online bijlagen).

##### **Afronding**

Lijkt jouw deeltje op het deeltje op de afbeelding? Heb je het gevuld met het materiaal dat bij de specificaties hoort?

##### **Tips**

Besteed aandacht aan het 'ontwerpprobleem': laat de kinderen zelf nadenken over het materiaal dat ze gebruikten om hun deeltje op te vullen, afhankelijk van of het 'light' is of 'heavy'.

##### **Online bijlagen** ©

Opdrachtblad 'Deeltjesdierentuin'

### **Bronnen**

[www.particlezoo.net](http://www.particlezoo.net)



#### ACTIVITEIT 10b: DEELTJESDIERENTUIN ALS THEATER

##### **Doelen**

- Verwerking en presentatie van opgedane kennis;
- Klassikale samenwerking;
- Delen van het project met de rest van de school.

##### **Werkvorm**

Klassikaal: bepalen script/rollen/teksten, doorloop en uitvoeren

Individueel: tekst schrijven

##### **De activiteit zelf**

##### **Vorbereiding en benodigheden**

**Duur:** doorlooptijd van drie dagen voor een presentatie van 10 minuten over 'De deeltjesdierentuin'

##### **Inleiding/oriëntatie**

Verdelen van rollen: de leerlingen spelen de verzorgers van de deeltjes uit de 'deeltjesdierentuin' die ze gemaakt hebben. Daarnaast zijn er caissières/receptionistes van de dierentuin, bezoekers, de professor en zijn hulpje, de directeur van de dierentuin en enkele technici.

##### **Activiteit**

Eerst wordt er een algemeen script bedacht, vervolgens schrijven de leerlingen als 'verzorgers' van de deeltjes hun eigen tekst. Ze doen dit aan de hand van de tekst bij het deeltje dat ze zelf gemaakt hebben. Elk kind dat een deeltje heeft gemaakt, schrijft een tekst over dat deeltje.

dag 1: de leerlingen schrijven de tekst bij hun rol;

dag 2: eerste doorloop en bijschaven;

dag 3: tweede doorloop, opnieuw bijschaven.

##### **Afronding**

Het toneelstuk wordt voor de hele school uitgevoerd.

##### **Tips**

Houd de doorlooptijd kort om de spontaniteit te behouden. Door deze activiteit raakt de hele school betrokken bij het project.

## Het Higgsdeeltje

### Online bijlagen ©

Voorbeeldscript 'Deeltjesdierentuin'

Filmpje uitvoering 'Deeltjesdierentuin'

(beide van de uitvoering van de Ara's van de Montessorischool Westervoort)

### Bron

Inspiratie was de voorstelling 'Aart' in Burgers' Zoo, waar bezoekers dansvoorstellingen door leerlingen van het Kunstbedrijf te zien kregen. Bij die dansen beeldden de dansers steeds andere dieren uit. Ze dansten in, rond of voor het verblijf van de dieren.



De kaart van Zwitserland en omgeving op het bord voor een laatste blik vóór het begin van de toets.

## ACTIVITEIT 11: DE TOPOGRAFIE VAN CERN EN OMGEVING/TOPOGRAFIE VAN ZWITSERLAND

### Doelen

- De leerlingen weten in welk(e) land(en) CERN ligt.
- De leerlingen kennen de topografie van Zwitserland.

### Werkvorm

Individueel aan de hand van een website.

### De activiteit zelf

#### Vorbereiding en benodigheden

Bekijk de website van TopoMania goed, zodat je weet hoe die in elkaar zit.

**Duur: wekelijks 15 minuten**

### ***Inleiding/oriëntatie***

Laat de leerlingen de website van TopoMania bekijken en geef ze de opdracht de topografie van Zwitserland te oefenen. Als ze er zelf niet uitkomen, kunnen ze de leraar om hulp vragen.

### ***Activiteit***

De wekelijkse taak is: oefenen van buurlanden, plaatsen, gebieden en rivieren.

### ***Afronding***

De kennis wordt getest met een afsluitende toets.

### ***Tips***

Kaarten voor de toets kunnen worden aangemaakt op de website van TopoMania.

### ***Online bijlagen***

Voorbeeldtoets topografie van Zwitserland (exclusief kaarten).

### ***Bronnen***

<http://www.topomania.net>



*Leerlingen maken de topotoets.*

2 3

Bij onderstaande activiteit gaan de leerlingen zelf bedenken hoe je een voorwerp zou kunnen versnellen. Daarmee lijkt de activiteit erg op het zelf bedenken van een onderzoek bij een gegeven vraag. Daarom is deze activiteit vooral geschikt voor begeleid en zelfstandig onderzoekend leren (niveau 2 en 3). Ze kunnen hiermee alvast warm lopen voor het onderzoek dat ze later gaan uitvoeren. Het hoeft niet per se de laatste activiteit te zijn.

### ACTIVITEIT 12: **VERSNELLING EGGSPERIMENT**

---

#### **Doelen**

- De leerlingen leren een probleem te beschrijven;
- De leerlingen leren een doel te formuleren;
- De leerlingen leren een manier te bedenken om een probleem op te lossen (ontwerpvoorbeeld);
- De leerlingen oefenen het samenwerken;
- De leerlingen oefenen het bijhouden van wat er gebeurt, wat er gedaan is en welke keuzes er zijn gemaakt (verslaglegging);
- De leerlingen oriënteren zich op natuurkundige krachten die voortvloeiend uit Higgs (zwaartekracht, hefboomwerking, slingerbeweging, luchtdruk, magnetisme, ...).

#### **Werkvorm**

Samenwerken in groepje; vrije keuze.

#### **De activiteit zelf**

##### **Vorbereiding en benodigheden**

Nodig: per groepje twee of drie surprise-eieren.

##### **Duur:**

De doorlooptijd van deze activiteit was 1,5 week; in totaal hebben de leerlingen er twee tot drie uur aan besteed.

##### **Inleiding/oriëntatie**

Opdracht toelichten en relatie leggen met onderzoek bij CERN: in de deeltjesversneller van CERN worden protonen in een cirkelvormige buis van 27 km lengte versneld door middel van magneten. De protonen bewegen in twee, tegengestelde richtingen. Op een bepaald moment laten de onderzoekers twee protonen tegen elkaar botsen; precies op dat moment worden daarvan beelden vastgelegd door detectoren. Die beelden worden geanalyseerd er worden uitspraken gedaan over de sporen die ontstaan door de deeltjes die wegspringen als gevolg van de botsing. De leerlingen gaan nu zelf onderzoeken hoe ze een surprise-ei na een versnelling kunnen laten botsen, waarbij ze proberen zoveel mogelijk deeltjes binnenin het ei te laten wegspringen.

##### **Activiteit**

De leerlingen werken in groepjes. Samen bedenken ze hoe ze een surprise-ei zo'n vaart kunnen geven dat bij botsing met een ander voorwerp de verpakking kapotgaat, het chocolade-omhulsel kapotgaat, het gele plastic busje kapotgaat en het voorwerpje – meestal een poppetje – zichtbaar wordt.

Er zijn twee criteria: ten eerste mogen ze het ei niet met de hand vasthouden als het wordt gelanceerd; ze moeten dus op zoek naar een manier om het ei in een stabiele uitgangspositie te brengen. Ten tweede moet de veiligheid van de omgeving en van de mensen die eromheen staan gewaarborgd zijn.

### **Afronding**

De groepjes voeren om de beurt hun experiment uit, terwijl de anderen toekijken. Per groepje wordt besproken wat er goed ging en wat verbeterd zou kunnen worden om het ei nog meer te versnellen.



*Leerlingen versnellen een verrassingsei met behulp van een ventilator.*

### **Tips**

Houd de doorlooptijd kort. Het bedenken, ontwerpen en uitvoeren van het experiment hoeft niet langer te duren dan 1 à 1,5 week. Dan blijven de leerlingen enthousiast. Op een van de scholen die dit project mee ontwikkeld hebben, was de afronding gepland op de dag van de paasviering. Dat bleek een leuke combinatie met de eieren.

### **Online bijlagen**

Logboekblad *Eggsperiment*



*Leerlingen versnellen een verrassingsei met behulp van een waterraket.*



### Stap 3. Opzetten onderzoek: onderzoeksvraag en onderzoeksplan

#### STAP 3A. DE ONDERZOEKSVRAAG

1 2 3

De onderzoeksvraag is gebaseerd op het hoofdthema van dit project: 'het Higgsdeeltje'. Het is lastig om een onderzoek te bedenken op basis van de verkenningstap rondom het Higgsdeeltje. Als we echter het idee loslaten dat we onderzoek moeten doen naar het Higgsdeeltje zelf, dan zien we dat dit deeltje, en het onderzoek ernaar, raakt aan heel veel onderwerpen of subthema's waar de leerlingen wél onderzoek naar kunnen doen. Deze subthema's linken het specifieke thema 'het Higgsdeeltje' aan meer algemene fenomenen die wel herkenbaar zijn voor de leerlingen en die dan ook direct (onderzoekbare) vragen oproepen. Subthema's bij Higgs zijn bijvoorbeeld:

- Gewicht/massa/zwaartekracht;
- Botsingen;
- (On)zichtbaarheid;
- Magnetisme;
- Sporen;
- Fotografie;
- Zwaartekracht;
- Versnelling.

Op niveau 1 en 2 legt de leraar de leerlingen één van onderstaande onderzoeksvragen voor.

Op niveau 3 bedenken de leerlingen zelf een onderzoeksvraag.

1 2

Voor projecten op niveau 1 en 2 (gestructureerde en begeleid onderzoekend leren) zijn hieronder vijf onderzoeksvragen geformuleerd, met per vraag een korte uitleg over de relatie van die vraag met het Higgsdeeltje en onder welk subthema de vraag valt. Zo zien leerlingen ook het verband tussen wat ze hebben verkend en wat ze gaan onderzoeken. Leraren kunnen ervoor kiezen om de hele klas één onderzoeksvraag voor te leggen of om groepjes verschillende vragen te geven. Alle onderzoeksvragen zijn bedacht door leerlingen van de scholen die aan dit boek hebben meegewerkt.

1. *Welke instelling van de fotocamera kun je het beste gebruiken om de route van botsende knikkers in beeld te brengen? (subthema's: botsen, sporen, fotografie)*

In de Large Hadron Collider van Cern zitten detectoren die de deeltjes vastleggen die uit de botsingen voortkomen. Het onderzoek naar de beste manier om een botsing tussen knikkers vast te leggen heeft dus een relatie met dit aspect van het hoofdthema.

2. *Wat valt sneller naar beneden: een grote, zware of een kleine, lichte knikker? (gewicht/versnelling)*

Het Higgsdeeltje zorgt voor massa en zorgt er dus ook voor dat dingen gewicht hebben. Want de massa zorgt dat objecten elkaar aantrekken (de aarde en de knikker). Of een verschil in gewicht ook voor een verschil in snelheid zorgt, heeft dus direct te maken met de invloed van het Higgsdeeltje. Meer indirect is versnelling een belangrijk onderdeel van het onderzoek in de Large Hadron Collider en dus een onderdeel van het onderzoek naar het Higgsdeeltje.



3. *Verandert je gewicht als je je in een bewegende lift bevindt en zo ja wat is het verloop van die verandering? (gewicht/versnelling)*

Het Higgsdeeltje zorgt voor massa en zorgt er daarmee ook voor dat dingen gewicht hebben. Maar massa en gewicht zijn niet hetzelfde: massa blijft altijd hetzelfde, waar in het heelal je ook bent. Maar gewicht kan verschillen: op de maan ben je veel lichter dan op de aarde en in de ruimte ben je zelfs gewichtloos. In dit experiment wordt onderzocht wat de invloed is van snelheid, versnelling en vertraging op gewicht.

4. *Stroomt vloeibare stroop sneller over glas of over plastic? (snelheid/gewicht)*

Deze vraag houdt minder direct verband met het hoofdthema. Gewicht is natuurlijk direct verbonden met het Higgsdeeltje, maar wat hier onderzocht wordt, heeft alles te maken met wrijving. Deze vraag laat zien hoe vanuit subthema's ook vragen kunnen ontstaan die wat verder van het hoofdthema afliggen. Dit hoeft niet erg te zijn, want het hoofdthema is ook hier de inspiratie voor het onderzoek geweest. Zonder het Higgsdeeltje zou dit experiment niet mogelijk zijn geweest. Dan zou de stroop namelijk gewichtloos zijn.

5. *Wat stuitert vaker binnen een minuut: een tennisbal of een (goed opgepompte) voetbal? (gewicht/versnelling)*

Ook bij deze vraag is er alleen een indirect verband met het hoofdthema. Hoewel gewicht en versnelling wel linken naar het hoofdthema (zie de uitleg bij vraag 2), zijn er voor stuiten meer elementen belangrijk, zoals elasticiteit. Toch is ook dit experiment geïnspireerd op de lessen en activiteiten over het Higgsdeeltje en raakt het aan elementen daarvan. Daarmee is de vraag wel degelijk relevant binnen het project.

3

Op niveau 3 bedenken de leerlingen zelf hun onderzoeksvraag. De subthema's en vragen hierboven kunnen voor de leraar een voorbeeld zijn voor de richting waarin die de leerlingen zelf een onderzoeksvraag laat bedenken. Let er echter op dat de leerlingen niet te vroeg worden gestuurd; ze zijn prima in staat om zelf een vraag te bedenken. De vragen hierboven zijn immers ook bedacht door leerlingen.

### STAP 3B. HET ONDERZOEKSPLAN

1

In de afbeelding staat één van de vijf vragen als voorbeeld in een plan uitgewerkt. Een uitwerking van alle vragen is online te vinden [🔗](#). Een aantal details van het plan moet door de leerlingen overigens nog wel worden ingevuld zoals de tijdsplanning en de taakverdeling. In de plannen zoals die online staan zijn deze velden toegevoegd en kunnen dus zo worden ingevuld.



**1. Wat is onze onderzoeksvraag?**

Wat stuitert vaker binnen een minuut: een tennisbal of een voetbal?

**2. Hoe past deze vraag bij het thema van het project?**

Het gaat over gewicht en versnelling (stuiten) en dit past bij het Higgsdeeltje.

**3. Wat zal volgens ons het antwoord zijn op de onderzoeksvraag? En waarom denken we dat?**

[Dit noemen onderzoekers een 'hypothese'.]

**4. Naar welke personen of materialen doen we onderzoek?**

Wij onderzoeken twee soorten ballen: een tennisbal en een (goed opgepompte) voetbal. We kijken dan welke bal vaker stuitert.

**5. Wat gaan we precies meten?**

[Meten kan zijn: hoe lang iets duurt of hoe zwaar iets is.

Meten kan ook zijn: alle mensen dezelfde vraag stellen en dan de antwoorden vergelijken.]

Wij gaan tellen hoe vaak een stuiterval en een (goed opgepompte) voetbal stuiten binnen één minuut.

**6. Op wat voor manier gaan we meten?**

[Bijvoorbeeld met een testje, een vragenlijst of interviews]

Wij laten de stuiterval en de voetbal vanaf 2 meter naar beneden vallen en dan tellen we hoe vaak de stuiterval en de voetbal stuiten. Dit doen we één minuut lang. Of tot de bal stopt met stuiten, als dat gebeurt voordat de minuut om is.

**7. Hoe vaak of bij hoeveel mensen moeten we het onderzoek doen om echt antwoord op de vraag te krijgen?**

We voeren het proefje vijf keer uit. We laten de tennisbal en de voetbal allebei vijf keer één minuut stuiten.

**8. Hoe schrijven we de resultaten op tijdens het uitvoeren van het onderzoek?**

[Antwoorden kort opschrijven, in een tabel opschrijven, streepjes zetten.]

Wij schrijven onze antwoorden op in een tabel.

Hoe vaak stuiterde de tennisbal/voetbal in één minuut:

	1 <sup>e</sup> keer	2 <sup>e</sup> keer	3 <sup>e</sup> keer	4 <sup>e</sup> keer	5 <sup>e</sup> keer
Tennisbal					
Voetbal					

Daarna gaan we het gemiddelde berekenen.

**9. Wat moet in het onderzoek hetzelfde blijven en wat verandert (eerlijk meten)?**

Hetzelfde: de hoogte waarvan we de ballen laten vallen (2 meter), de ondergrond (bijvoorbeeld gymzaal), we laten de bal vallen (we gooien niet).

Anders: de bal (tennisbal en voetbal).

**10. Plan hieronder wanneer je de onderzoeksactiviteiten doet.**

Activiteit:	Plaats/locatie:	Dag:	Tijd:

**11. Welke hulp en materialen hebben we nodig?**

Tennisbal  
 Voetbal  
 Stopwatch  
 Papier om resultaten op te schrijven  
 Gymzaal

**12. Van wie hebben we toestemming nodig, behalve van de leraar van onze groep?**

--

**13. Wie doet er wat bij de voorbereiding en de uitvoering van het onderzoek?**

Naam:	Taken:	Wanneer af:

## Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen (WKRU)

Dit boek is een uitgave van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen (WKRU). Het WKRU is een knooppunt tussen leraren en kinderen van het basis- en voortgezet onderwijs, onderzoekers van de Radboud Universiteit en pabo-docenten en -studenten van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN).

### **Missie**

Het WKRU heeft tot doel de relatie tussen de RU en het basis- en voortgezet onderwijs verder te versterken en te komen tot een betere afstemming tussen vraag en aanbod van wetenschappelijke kennis voor het onderwijs. Hiermee wil het WKRU de houding van leerlingen en (toekomstige) leraren ten opzichte van wetenschap en technologie positief beïnvloeden en hun onderzoekende houding stimuleren. Daarnaast wil het WKRU onderzoekers van de RU een podium geven om hun wetenschappelijke resultaten en de implicaties daarvan ten toon te kunnen spreiden aan een breed publiek.

### **Activiteiten**

Het WKRU heeft een gevarieerd palet van activiteiten, waaronder: jaarlijkse nascholingsdagen wetenschap en technologie voor pabo-studenten en leraren basis onderwijs (Winterschool), samenwerking in projectteams tussen wetenschappers, pabo-studenten en leraren waarbij een wetenschappelijk onderwerp vertaald wordt naar een project rondom onderzoeksactiviteiten, kinderlezingen (Mystery X), cursussen voor jonge onderzoekers waarin ze leren hoe ze hun onderwerp toegankelijk kunnen maken voor kinderen (Onderzoeker in de klas), een professionaliseringscursus Onderzoekend leren, studiedagen voor docenten uit het voortgezet onderwijs... en nog veel meer (zie [www.wkru.nl](http://www.wkru.nl)).



KONINKLIJKE NEDERLANDSE  
AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN

**Radboud Universiteit Nijmegen**



**Radboudumc**

Hogeschool  **van Arnhem en Nijmegen**



**Institute for Science,  
Innovation and Society**



**Faculteit der Letteren**

## Foto- en illustratieverantwoording

Tenzij hieronder anders vermeld zijn de foto's in deze uitgave gemaakt door het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit ©WKRU 2015. Deze foto's vallen *niet* onder de Creative Commons Licentie omdat op veel van de foto's leerlingen of door hen gemaakte materialen staan afgebeeld, waardoor geen toestemming voor hergebruik kan worden gegeven.

- Groeimodel onderzoekend leren CC BY SA 4.0 WKRU p. 18
- Het vragenmachientje CC BY SA 4.0 WKRU p. 36
- Onderzoeksplan CC BY SA 4.0 WKRU p. 39
- De ATLAS detector © 2014 CERN p. 46
- Niveaus materie © Nikhef p. 48
- Omtrek LHC CC BY SA 4.0 Maximilien Brice (CERN) p. 50
- ATLAS detector CC BY-SA 2.0 Argon National Laboratory p. 51
- Botsing Higgsdeeltje in ATLAS detector © 2014 CERN p. 51
- Foto Nicolo de Groot, archief Nicolo de Groot p. 53
- Foto Frank Filthaut, archief Frank Filthaut p. 53
- Formaat elementaire deeltjes CC BY SA 4.0 WKRU; gebaseerd op: p. 55
  - Person icon Black CC BY-SA 4.0 door Macruz(WMF)
  - Red blood cell CC 3.0 door DBCLS
  - ©images/123RF Stockfoto
  - Nucleus drawing CC BY-SA 3.0 door Marekich
- Een atoom ©images/123RF Stockfoto p. 56
- De ATLAS detector © 2014 CERN p. 57
- Metafoor Higgsveld © 1996 CERN p. 59
- Grafische weergave dobbelspel CC BY SA 4.0 WKRU p. 70
- Uitgewerkt onderzoeksplan CC BY SA 4.0 WKRU p. 86, 87
- Neuronen en Synapsen door NIH, Publiek domein p. 91
- Dandy Walker malformation (Radiopaedia.org), CC BY-NC-SA 3.0 Ian Bickle p. 92
- Foto Hans van Bokhoven, archief Hans van Bokhoven p. 93
- Foto Arjan de Brouwer, CC BY SA 4.0 WKRU p. 93
- Human male karyotype door NHGRI CC BY-SA 3.0, publiek domein p. 96
- Eukaryote DNA CC BY-SA 3.0 Sponk (vertaling WKRU) p. 96
- Hersengebieden door Arjan Brouwer, CC BY SA 4.0 WKRU; gebaseerd op: p. 97
  - CC BY 2.5 Patrick J. Lynch, medical illustrator
- IQ curve CC BY SA 2.5 Alessio Damato, Mikhail Ryazanov p. 98
- Schema activiteit door Dirk Schubert CC BY SA 4.0 WKRU p. 111
- Symbolen van een genetische stamboom CC BY SA 4.0 WKRU p. 120
- Uitgewerkt onderzoeksplan CC BY SA 4.0 WKRU p. 127, 128
- Copernicaans Wereldbeeld, Publiek domein p. 130
- Het graf van Goorle, foto Klaas Tijdsma p. 132
- Titelblad Exercitationes, bron Tresoar, Leeuwarden p. 133
- Document onderzoek, Publiek domein p. 134
- Henricus de Veno, bron Museum Martena, Franeker p. 135
- Inschrijvingsbewijs Universiteit Gorlaeus, foto Christoph Lüthy p.135
- Rechtszaak tegen Bruno door Ettore Ferrari, Publiek domein p. 136

- Geocentrisch wereldbeeld door Bartolomeu Velho, Publiek domein p. 136
- Aristoteles, foto Giovanni Dall'Orto p. 137
- Democritus door José Ribera, Publiek domein p. 137
- Abraham Gorlaeus, door Hendrik Goltzius, Publiek domein p. 138
- Foto Christoph Lüthy, archief Christoph Lüthy p. 139
- Boek Christoph Lüthy, Publiek domein p. 139
- Copernicaans Wereldbeeld door Andreas Cellarius, Publiek domein p. 143
- Canon van de Geschiedenis, bron: entoen.nu p. 146
- CMS Higgs-event CC BY-SA CMS 3.0 door Lucas Taylor p. 147
- Abraham Gorlaeus door J. de Gheijn, publiek domein p. 150
- Uitgewerkt onderzoeksplan CC BY SA 4.0 WKRU p. 169, 170

Met betrekking tot enkel illustratiemateriaal is het de uitgever ondanks zorgvuldige inspanningen daartoe, niet gelukt eventuele rechthebbende(n) te achterhalen. Mocht u van mening zijn (auteurs) rechten te kunnen doen gelden op illustratiemateriaal in deze uitgave dan verzoeken wij u om contact op te nemen met de uitgever.