**Betekenis en Ontdekking van het Higgs-deeltje**  *(****dia****)*

Jos Engelen

Universiteit van Amsterdam/NIKHEF en Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO)

**Oneindig** *(verschijnt op* ***dia****)*

De aantrekking van de zwaartekracht, die ons met beide voeten op de grond houdt, wordt kleiner als we de hoogte in gaan. Als de afstand tussen het middelpunt (iets preciezer geformuleerd: het zwaartepunt) van de aarde en een persoon *d* is, dan is de zwaartekracht evenredig met *1/d2.* Dat betekent: als de afstand twee keer zo groot wordt, wordt de kracht vier keer zo klein. (Op 6000 km boven de aarde bent U op een kwart van Uw gewicht!)

Maar wat gebeurt er als *d* heel klein wordt? In ons voorbeeld houdt de aarde zelf ons wel op afstand van haar middelpunt en is *d* dus minimaal zo groot als de straal van de aarde, maar laten we ons voorstellen dat we de aarde samenpersen tot een klein bolletje. Laten we ons voorstellen dat we *twee* van zulke bolletjes heel dicht bij elkaar brengen, dan wordt de kracht heel erg groot. Hoe ver kunnen we onze fantasie de vrije loop laten? Hoe klein kunnen we de bolletjes maken, hoe groot kunnen we de kracht laten worden?

De kleinste ‘bolletjes’ die wij ons kunnen voorstellen zijn ‘punten’ zonder afmeting. Oneindig klein... De kleinste deeltjes die we kennen zijn inderdaad zó klein dat we er geen afmeting aan hebben kunnen ontdekken. Deze deeltjes noemen we dan ook ‘puntdeeltjes’. Ook ‘puntdeeltjes’ komen in de natuur voor als vrije deeltjes, maar ze kruipen niet oneindig dicht bij elkaar, zodat ze gebonden zouden zijn met een oneindige kracht (waar oneindig veel energie bij vrij zou komen). Daarom moet de theorie die we opstellen voor de wisselwerkingen tussen deeltjes er één zijn waarbij ‘oneindigheden’ vermeden worden. De kwantummechanica biedt het juiste theoretische kader, maar heeft in het meest algemene geval voor het voorkómen van onmogelijke oneindigheden, het Higgs boson nodig.

**Atomen** *(verschijnt op* ***dia****)*

Elektronen, heel gewone deeltjes, zijn puntdeeltjes. Het zijn de deeltjes die rond atoomkernen zweven en samen daarmee de atomen vormen waaruit de alledaagse materie is opgebouwd. Het is niet de zwaartekracht die er voor zorgt dat de elektronen en de atoomkernen elkaar aantrekken, maar de elektrische kracht, die veel sterker is. Als we atomen bestuderen kunnen we de zwaartekracht zelfs verwaarlozen.

Het eenvoudigste atoom is dat van waterstof: bestaande uit een elektrisch positief geladen proton en een negatief geladen elektron dat er omheen beweegt. Het proton is 2000 keer zwaarder dan het elektron, daarom beweegt het elektron en staat het proton vrijwel stil. (Dit heeft niets met de zwaartekracht te maken, die is heel klein, maar wel met de bewegingsenergie: bij een zelfde energie bewegen lichte deeltjes sneller dan zware.)

De elektrische kracht tussen elektron en proton hangt net zo af van de afstand als de zwaartekracht in ons voorbeeld hierboven. Het elektron is een puntdeeltje, het proton is ‘bijna’ een puntdeeltje, maar toch is de afstand tussen proton en elektron in een waterstofatoom 100 000 keer zo groot als de afmeting van het proton. Terwijl de elektrische kracht deze afstand zo klein mogelijk wil maken!

Op het eerste gezicht hoeft dit ons niet te verwonderen. De maan draait immers ook om de aarde zonder erop te vallen, hoewel ze elkaar wel aantrekken, en het zelfde geldt voor de aarde en de zon, etc. Het antwoord is dat de maan met een bepaalde snelheid rond de aarde draait en dat de aantrekkingskracht tussen de twee precies gelijk is aan de kracht de andere kant op, die de maan uit haar baan probeert te slingeren. Deze kracht wordt ook wel de centrifugaalkracht genoemd, en is eigenlijk geen echte kracht. De enige kracht die een rol speelt is de zwaartekracht. In feite valt de maan voortdurend naar de aarde toe, maar wordt als een meteoriet die langs scheert afgebogen. De snelheid is van dien aard dat de maan voortdurend zo wordt afgebogen dat ze ‘gevangen’ zit in haar baan.

Precies zo’n redenering zouden we nu kunnen toepassen op proton en elektron, met aarde en maan vervangen door proton en elektron en zwaartekracht vervangen door elektrische kracht. Maar die redenering gaat niet op! De reden heeft te maken met een eigenschap van de elektrische kracht, of iets preciezer: de elektromagnetische kracht (elektriciteit en magnetisme zijn nauw verweven). De eigenschap waar we op doelen is dat elektrisch geladen deeltjes die versneld worden – doordat er een kracht op werkt – elektromagnetische straling uitzenden. Radiostraling (en ook licht) is een vorm van elektromagnetische straling. Op een elektron dat rond een proton cirkelt werkt een kracht en het elektron ondergaat dus een versnelling. Dit is mooi te illustreren door de baan ‘van opzij’ te bekijken, geprojecteerd op de middellijn van het waterstofatoom: we zien het elektron dan van links naar rechts schieten en weer terug. Dat zo’n ‘oscillerend’ elektron straling uitzendt is bekend uit de radiotechniek: antennes werken zo. Zo’n elektron zou al zijn bewegingsenergie in een fractie van een seconde verliezen en naar het proton getrokken worden.

Maar toch zijn waterstofatomen stabiel! Elektronen vallen niet op het proton. Ze komen niet ‘oneindig’ dichtbij. De theorie die prima voldoet voor de radiotechniek behoeft aanpassing op het niveau van atomen, op heel kleine afstandsschaal. De theorie die voor deze kleine afstanden geldt, is de kwantummechanica. In feite is deze theorie ontwikkeld om de banen van elektronen in atomen te beschrijven, te berekenen. En vervolgens met experimentele waarnemingen te vergelijken natuurlijk.

De kwantummechanica zegt dat het product van de snelheid van een atomair elektron en de straal van de baan niet kleiner kan zijn dan een bepaalde minimale waarde. (Liever gebruiken we de grootheid impuls, product van massa en snelheid.) *Er is dus een principe dat de stabiliteit van atomen regelt.* (Dit principe is vervat in de zogenaamde *onzekerheidsrelaties.*)

**Fotonen** *(verschijnt op* ***dia****)*

Ook op afstanden groter dan die van de kleinste baan zijn niet alle banen toegestaan. Geldt voor de binnenste baan dat impuls maal straal groter moet zijn dan een bepaalde minimumhoeveelheid *h*, dan geldt voor de volgende baan een waarde *2h*, enz. De energie van het elektron neemt toe naarmate de baan verder naar buiten ligt. Als een elektron overgaat van zijn baan naar de naast gelegen lagere baan, dan wordt daarbij energie uitgezonden in de vorm van elektromagnetische straling. Deze straling wordt gekarakteriseerd door een frequentie (die bepaalt de energie van de straling) en bij straling van een bepaalde frequentie hoort ‘een kleinste hoeveelheid’: een kwantum. Voor elektromagnetische straling noemen we dit kwantum: foton. Net als een elektron kan een foton gezien worden als een elementair deeltje. Bij een overgang van een elektron van een hogere naar een lagere baan komt een (één) foton vrij.

*(****dia****)*

**De elektromagnetische wisselwerking** *(****dia****)*

We leggen nu uit hoe twee elektronen, puntdeeltjes, elkaar afstoten: hoe de twee met elkaar wisselwerken. Laten we ons twee elektronen voorstellen die elkaar naderen met snelheid *v*, dan geldt weer dat de minimale afstand waarop de elektronen elkaar kunnen naderen bepaald wordt door de regel dat product van snelheid en afstand niet kleiner kan worden dan een bepaald minimum. En de manier waarop de wisselwerking plaatsvindt, is dat een foton overspringt van het ene elektron naar het andere. Dit is in diagramvorm weergegeven in de figuur (*dia*). Zulke diagrammen zijn heel beroemd, ze heten Feynmandiagrammen en corresponderen met heel precieze rekenregels. Maar ze kunnen ook dienen als handige illustratie.

Het feit dat de elektromagnetische wisselwerking bewerkstelligd wordt door overspringende fotonen betekent dat de wisselwerkende deeltjes en daarmee de ‘oneindigheden’ waar we over spraken, op afstand blijven. Helemaal vanzelfsprekend is dat niet.

Elektrische en magnetische velden volgen uit ‘potentialen’: een elektrisch veld ontstaat als gevolg van een veranderende potentiaal net als het magnetisch veld. De velden zijn meetbaar (‘echt’) en de potentialen zijn de ‘hulpmiddelen’ waaruit deze velden volgen, maar ze zijn als zodanig niet meetbaar en er bestaat een zekere vrijheid in de definitie ervan. Deze vrijheid is essentieel en heet ‘ijkinvariantie’: aan de potentiaal kan op elk punt in de ruimte en op elk moment een willekeurige waarde worden toegevoegd, op zo’n manier dat de energie van de wisselwerking met, in ons voorbeeld het elektron, niet verandert. Dit blijkt – net als de onzekerheidsrelatie – een principe waar een goede theorie, een theorie zonder oneindigheden, aan moet voldoen. Dit principe noemen we *lokale ijkinvariantie.* Het klinkt vrij abstract maar het is een heel krachtig en goed hanteerbaar principe dat ‘al doende’ is ontdekt. Als er een diepere betekenis achter zit, dan hebben we die nog niet ontdekt (een zelfde opmerking geldt overigens voor de onzekerheidsrelaties). Het blijkt relatief eenvoudig aan het principe van *lokale ijkinvariantie* te voldoen omdat de deeltjes waar het elektromagnetische veld uit is opgebouwd, de fotonen, geen massa hebben. De elektromagnetische wisselwerking blijkt om die reden het principe van lokale ijkinvariantie te respecteren.

(De volgende analogie is wellicht een verhelderende illustratie van ijkinvariantie: als een koperdraadje twee polen van een batterij verbindt waar één pool op een spanning van 1 Volt staat en de andere op 0 Volt dan is voor de stroom die gaat lopen alleen het spanningsverschil van belang; wanneer één pool op 1001 Volt staat en de andere op 1000 Volt, dan levert dit precies dezelfde stroom op.)

**De zwakke wisselwerking** *(****dia****)*

Behalve de zwaartekracht (zo zwak dat we ze voor de rest van ons betoog buiten beschouwing laten) en de elektromagnetische wisselwerking, die atomen en moleculen beschrijft, kennen we nog twee soorten wisselwerking. De ene houdt neutronen en protonen bij elkaar in atoomkernen – de sterke wisselwerking – en de andere laat sommige atoomkernen radioactief vervallen – de zwakke wisselwerking. Zoals de elektromagnetische wisselwerking wordt overgebracht door het elektromagnetische veld, of op microscopische schaal: het foton, worden ook de andere krachten overgebracht door een karakteristiek veld, met bijbehorend deeltje.

De zwakke wisselwerking wordt overgebracht door deeltjes die niet, zoals het foton massaloos zijn, maar door deeltjes met massa: de W en Z bosonen. Het principe van *lokale ijkinvariantie*, om ‘oneindigheden’ uit te sluiten, is nu moeilijker te implementeren. Higgs (en Brout en Englert) hebben de methode gevonden om in veldentheorieën velddeeltjes met massa te introduceren en *ijkinvariantie* te behouden. ’t Hooft en Veltman hebben aangetoond dat dergelijke *ijkinvariante* theorieën niet geplaagd worden door ‘oneindigheden’. Het gaat als volgt: formuleer de theorie van zwakke wisselwerkingen in analogie met de theorie van de elektromagnetische wisselwerkingen en begin met massaloze W en Z deeltjes. Voeg vervolgens een nieuw veld toe aan de ‘ingrediënten’ – een veld dat aan de W en Z deeltjes ‘kleeft’ en ze op die manier een ‘effectieve’ massa geeft. Ook met dit nieuwe veld corresponderen weer kleinst mogelijke veranderingen, kwanta (net als de fotonen en de W en Z bosonen); zo’n kwantum noemen we het Higgs-deeltje.

**Op zoek naar het Higgs-deeltje** *(verschijnt op* ***dia****)*

Het principe van *lokale ijkinvariantie* is moeilijk ‘intuïtief’ te verklaren maar het eruit volgende Higgs-deeltje is een heel concrete voorspelling die direct experimenteel verifieerbaar is. Alles wat voor deze verificatie nodig is, is de detectie van dit deeltje! Hoe pakken we dit aan?

We baseren ons op een derde principe, het *relativiteitsprincipe* waaruit volgt *E=Mc2 . (verschijnt op* ***dia****)* We laten het principe hier verder onbesproken maar maken wel gebruik van het resultaat: om een deeltje met massa *M* te creëren uit het ‘niets’ moeten we energie *E* omzetten in massa *M.* Met een deeltjesversneller versnellen we twee deeltjes tot een totale energie die minstens gelijk is aan *E* en we laten die deeltjes vervolgens frontaal met elkaar botsen.

Op deze wijze werden in 1983 op CERN de W en de Z deeltjes ontdekt, door bundels protonen en antiprotonen met elkaar in botsing te brengen. Dit was een technisch-wetenschappelijke prestatie van de eerste orde, slechts mogelijk door vernieuwende versneller-, detectie- en anaysetechnieken. Op één punt was deze ontdekking echter gemakkelijker dan die van het Higgs-deeltje: de massa’s van de W en Z deeltjes waren uit theoretische voorspellingen vrij precies bekend; dat is voor het Higgs-deeltje niet het geval. Het zoeken naar ‘de Higgs’ heeft daarom veel meer van ‘het zoeken naar een speld in een hooiberg’.

**Massa en Energie** *(verschijnt op* ***dia****)*

Hoeveel weegt een proton? Het antwoord is 1,67 10-27 kg. Voor fundamentele deeltjes als het proton is de kilogram duidelijk geen handige eenheid! Als we gebruik maken van de equivalentie van massa en energie en voor energie de ‘elektronvolt’ als eenheid kiezen, dan vinden we een handiger getal: de massa van het proton is dan ongeveer 1 GeV[[1]](#footnote-1). En die van de W en Z deeltjes is 83 resp. 90 GeV.

**De Krachtigste Deeltjesversnellers Anno 2013** *(verschijnt op* ***dia****)*

De krachtigste deeltjesversnellers die in gebruik waren of zijn, zijn zogenaamde synchrotrons. Dit zijn cirkelvormige versnellers, met een vaste straal, waarin de deeltjes versneld worden en tijdens dit proces op hun baan worden gehouden door een magneetveld dat synchroon oploopt met de oplopende energie. Het verband tussen impuls *p*, magneetveld *B* en straal *R* is: *p=0.3 B R.* Impuls *p* en energie *E* zijn voor deeltjes bij hoge energie praktisch aan elkaar gelijk. We zien nu dat grote versnellers (grote *R*, dus grote omtrek) waarin krachtige magneetvelden voorhanden zijn (grote *B*) leiden tot grote *p*, d.w.z. hoge energie.

De Large Hadron Collider, de LHC van CERN, staat in een cirkelvormige ondergrondse tunnel met een omtrek van 27 km. (***dia***) De magneten die langs de omtrek van de versneller geplaatst zijn, zijn ontworpen om velden van 9 Tesla te kunnen produceren. Daarvoor is het nodig de magneetspoelen van supergeleidend draad te fabriceren en te bedrijven bij 2700 onder nul.

De LHC is ontworpen voor een energie van 7 000 GeV per bundel, 14 000 GeV totale botsingsenergie dus. In de eerste fase (van eind 2009 tot begin 2013) heeft de LHC gewerkt bij een maximale totale energie van 8 000 GeV. Na een periode van groot onderhoud zal de LHC eind 2014/begin 2015 weer in bedrijf komen, dan bij de ontwerpenergie van 14 000 GeV.

**Productie van het Higgs-deeltje in botsingen van protonen** *(****dia****)*

Protonen zijn wel heel klein, 100 000 keer kleiner dan het waterstofatoom, maar het zijn geen ‘puntdeeltjes’ zoals het elektron. Protonen bestaan uit quarks die bijeen worden gehouden door een veld, dat we het sterke veld noemen en de kwanta ervan ‘gluonen’. Quarks en gluonen zijn ‘puntdeeltjes’. Een proton kan daarom gezien worden als een kluitje quarks en gluonen. De totale energie van een proton is verdeeld over deze quarks en gluonen. In feite zijn het botsingen tussen quarks en gluonen die kunnen leiden tot de productie van een Higgs-deeltje. Gemiddeld dragen de afzonderlijke quarks en gluonen maar een kleine fractie van de protonenergie, zeg 10%, en daarom moet de energie van de protonbundels om een deeltje met massa M te produceren aanzienlijk groter zijn dan M/2 per bundel. (Voor de ontdekking van de W en Z deeltjes waar hierboven naar verwezen werd, deeltjes van 83 resp. 90 GeV, werden bundels van ieder 270 GeV gebruikt.)

De kans dat in een gegeven botsing tussen twee protonen een Higgs-deeltje wordt gemaakt is klein. Deze kans kunnen we uitrekenen als we een aanname voor de massa van het Higgs-deeltje maken, of beter: we kunnen deze kans uitrekenen als functie van de massa. We komen dan al gauw tot de conclusie dat om één Higgs-deeltje te maken we zo’n 10 miljard protonbotsingen nodig hebben. Naast hoge energie moet de LHC dus protonbundels hebben van hoge intensiteit (‘stroomsterkte’) en bovendien moeten deze bundels samengeknepen worden tot zo klein mogelijke afmetingen (‘zo klein mogelijke doorsnede’) en vervolgens moeten ze met hoge precisie exact op elkaar worden gemikt. Daarmee wordt de botsingsfrequentie gemaximaliseerd.

De LHC kent dus twee belangrijke innovaties: hoge energie via grootschalige toepassing van nieuw ontwikkelde supergeleidende kabels en magneten; hoge botsingsfrequentie door bundels van uitzonderlijke kwaliteit.

**Detectie van het Higgs-deeltje** *(verschijnt op* ***dia****)*

Bij het begin van de zoektocht naar het Higgs-deeltje bij de LHC was bekend dat de massa minimaal 114 GeV moest zijn. Eerdere experimenten bij lagere energie hadden deze ondergrens opgeleverd. Bovendien leren theoretische beschouwingen dat om te doen waar het voor bedoeld is, het realiseren van *lokale ijkinvariantie*, de massa niet groter kan zijn dan 1000 GeV.

De eigenschappen van het Higgs-deeltje zijn goed te voorspellen, met uitzondering van de massa ervan. In het bijzonder zal het Higgs-deeltje onmiddellijk na te zijn geproduceerd vervallen in lichtere deeltjes. In feite kan het Higgs-deeltje vervallen naar alle andere elementaire deeltjes die we kennen en wel naar een ‘deeltje-antideeltje’ paar daarvan, zolang de massa van die deeltjes maar kleiner is dan de helft van de Higgs-massa. Maar die kennen we niet en daarom is onze zoekstrategie afhankelijk van de massa die we aannemen.

**De vondst van het Higgs-deeltje** *(verschijnt op* ***dia****)*

Op 4 juli 2012 werd de vondst van het Higgs-deeltje tijdens een druk bezochte presentatie op CERN wereldkundig gemaakt. Het deeltje was gevonden bij een massa van 125 GeV. De natuur blijkt hiermee een massa gekozen te hebben die de ontdekking zo moeilijk mogelijk maakt. Een Higgs-deeltje met die massa kan namelijk alleen maar vervallen naar lichte elementaire deeltjes. En deze ‘onopvallende’ vervalproducten zijn heel moeilijk te onderscheiden van deeltjesproductie door ‘gewone’ proton-protonbotsingen: het Higgs-deeltje moet worden opgevist uit een enorme achtergrond. Een zwaar Higgs-deeltje zou kunnen vervallen naar twee W bosonen of twee Z bosonen, dat zou aanleiding geven tot opvallende eindtoestanden met veel minder achtergrond. Maar het Higgs-deeltje blijkt relatief licht te zijn.

In feite was het vervalkanaal waarin het Higgs-deeltje het eerst werd ontdekt een buitengewoon moeilijk te meten kanaal, namelijk het verval naar twee fotonen: H$\rightarrow $γγ. Dit verval is buitengewoon zeldzaam. Het Higgs-deeltje is elektrisch neutraal en fotonen ‘koppelen’ aan lading. De onzekerheidsrelaties van de kwantummechanica staan echter toe dat het Higgs-deeltje korte tijd naar twee geladen deeltjes ‘fluctueert’, die elkaar vervolgens ‘opeten’ en daarbij twee fotonen uitzenden. Dit verval is weergegeven in het Feynmandiagram van de figuur (***dia***).

**De Large Hadron Collider – ontwerp, bouw, bedrijf**

***Begeleidende .ppt presentatie***

Supergeleidende kabel (Niobium-Titaan) uit filamenten van 7 micron.

Infrastructuur voor cryogenie, 1.9K

Stroomdichtheid bij 1.9K

Hoog magneetveld (mag supergeleiding niet verstoren)

Levensduur en kwaliteit bundel (vacuüm; zeer homogene magneetvelden)

Luminositeit, pakketjes protonen in bundel 25 ns uit elkaar

**De experimentele opstellingen ATLAS en CMS – ontwerp, bouw bedrijf**

***Begeleidende .ppt presentatie***

Moet 40 miljard keer per seconde klaar staan om 20 ‘simultane’ botsingen te registreren; online 100 hiervan selecteren voor ‘opslag’

Snelle en stralingsbestendige detectoren; veel kanalen (meer dan 100 miljoen); enorm grote en zware opstellingen

**De Toekomst van de Hoge-energiefysica – de volgende versneller?**

Het Higgs-deeltje is gevonden, het Standaard Model is ‘af’. Kunnen we daarmee de missie van de hoge-energiefysica, van de deeltjesversnellers en de experimenten als voltooid beschouwen? Ik denk het niet. Aan het Higgs-deeltje zelf moet nog een en ander gemeten worden alvorens we met zekerheid en met de gewenste precisie kunnen zeggen dat het hier inderdaad om ‘het’ Higgs-deeltje gaat. Welke is de massa precies en wat zijn de vertakkingsverhoudingen naar de diverse eindtoestanden? Is er inderdaad één Higgs-deeltje. Wat is de spin ervan? Is die inderdaad 0, is het inderdaad een scalair deeltje? Het Higgs-deeltje zelf ‘voelt’ ook het alom aanwezige Higgs-veld, ‘koppelt’ het aan dat veld op de wijze die de theorie voorspelt? Allemaal vragen die een antwoord behoeven en allemaal vragen die een verrassend antwoord kunnen opleveren – een antwoord dat vervolgens de toekomst van de hoge-energiefysica in nieuwe richtingen kan sturen. Het zoeken van nieuwe verschijnselen voorbij het Higgs-deeltje zal doorgaan bij de LHC, met name de hogere energie na de *upgrade* biedt daarvoor weer nieuwe mogelijkheden. En er is alle reden om te denken dat zulke nieuwe verschijnselen er zijn, in het bijzonder de ontdekking van zogenaamde supersymmetrische partners van alle bekende deeltjes zou de extrapolatie van de huidige theorie tot veel hogere energieën, die kort na de ‘Big Bang’ voorkwamen, op een aantrekkelijke wijze mogelijk maken. Met dit programma kan de LHC nog tot 2025 door. En als er inderdaad nieuwe ontdekkingen worden gedaan, nog langer. En deze nieuwe ontdekkingen zullen op hun beurt de weg naar de volgende gewenste versneller wijzen: misschien een ‘linear electron-positron collider’, misschien een super-LHC, misschien nog iets anders.

Het fantastische bouwwerk van het Standaard Model heeft ons laten zien hoe verbazingwekkend en ingenieus de natuur in elkaar zit – ik ben ervan overtuigd dat de natuur nog nieuwe verrassingen voor ons in petto heeft. Als we maar blijven zoeken en onze eigen vindingrijk tot het uiterste laten uitdagen.

Leiden, 13 mei, 2013

1. 1 GeV=1 miljard eV. 1 eV (elektronvolt) is de energie die een deeltje met de eenheidslading opneemt bij het doorlopen van een potentiaalverschil van 1 Volt. [↑](#footnote-ref-1)