

INLEIDING

Decennialang zat er een groot, gapend gat in de puzzel van de deeltjesfysica. Het higgsdeeltje, voorspeld in de jaren zestig, wilde maar niet gevonden worden. Maar op 4 juli 2012 was het dan eindelijk zover: experimenten opgesteld langs de deeltjesversneller Large Hadron Collider (LHC) hadden genoeg bewijsmateriaal verzameld om te mogen spreken van 'de ontdekking van een nieuw deeltje, met de eigenschappen van het higgseboson'. De uitpuilende zaal vol fysici op CERN, de Europese organisatie achter de LHC, juichte enthousiast toen het goede nieuws duidelijk werd; een enkeling pinkte zelfs een traantje weg. Ook buiten CERN brak een ware higgshype los. Lang niet iedereen begreep wat het deeltje precies was – maar dat de wetenschap hier een belangrijke overwinning in de wacht had gesleept, was wel duidelijk.

De ontdekking van het higgsdeeltje vormde dan ook het einde van een tijdperk: er kon nu eindelijk een vinkje worden gezet bij het laatste deeltje waar min of meer op gerekend werd. Dat wil zeggen: er waren fysici die er rotsvast van overtuigd waren dat het higgsdeeltje bestond, er waren er die vonden dat je dat niet mocht zeggen totdat de experimenten uitsluitsel hadden geboden, en er waren er die er hun eigen ideeën op na hielden. Maar het higgsmechanisme was hoe dan ook de meest geaccepteerde manier om elementaire deeltjes hun massa te geven; en bij dat mechanisme hoorde nu eenmaal een deeltje. Het feit dat men zoveel mankracht en zoveel miljarden durfde te investeren in de zoektocht hiernaar, gaf wel aan hoe serieus men die gedachte nam. En terecht, zo bleek.

Inmiddels zijn we in een volgende fase van de deeltjesfysica beland: een spannendere fase. We weten namelijk niet wát er nu komt, alleen dát er nog iets moet komen. Want hoe goed onze huidige deeltjestheorie, het Standaardmodel genaamd, ook werkt, hij kan niet alle vragen beantwoorden waar fysici mee rondlopen. Zo zit ons heelal vol met materie die we niet kunnen zien, maar die met zijn zwaartekracht wel zijn aanwezigheid verraad; de zogenoemde donkere materie. Waar bestaat die uit? Niet uit de deeltjes van het Standaardmodel; zoveel is zeker. En waarom bevat ons heelal materie, terwijl antimaterie nergens te bekennen is? Ook dat probleem kunnen we niet oplossen met de verzameling deeltjes en het bijbehorende setje regels dat we nu hebben. En zo zijn er nog heel wat andere openstaande vragen over ons universum.

Uiteraard laat de natuurkundige gemeenschap het daar niet bij zitten. Openstaande vragen zijn een uitdaging van de natuur die aangenomen moet worden. En dus zijn er talloze wetenschappelijke artikelen die proberen ze te beantwoorden. Vaak blijkt dat antwoord een deeltje te behelzen. Soms is dat logisch, zoals bij donkere materie. Soms vergt het wat meer denkwerk om in te zien hoe een bepaald deeltje een bepaald probleem oplost, zoals bij de kwestie van de ontbrekende antimaterie. Maar heel vaak is de strekking van zo'n artikel: 'Ik denk dat we dat en dat probleem op die en die manier kunnen oplossen, en dan moet er dus een nieuw deeltje zijn dat er zus en zo uitziet.'

Over die nieuwe deeltjes gaat dit boek; hypothetische deeltjes. Deeltjes die heel goed zouden kunnen bestaan, maar die vooralsnog niet in experimenten zijn opgedoken – en dat misschien ook wel nooit zullen doen. Dat maakt dit boek heel anders dan zijn voorganger, *De deeltjesdierentuin*, verschenen in november 2012. Daarin liepen we als het ware door een zorgvuldig opgezet park, waarbij we bij elke kooi even bleven staan om te kijken en het tekstje te lezen dat ons vertelde wat we precies zagen.

In *De deeltjessafari* gaan we daarentegen de wilde natuur in, op zoek naar soorten waarvan we niet zeker weten dat ze bestaan. Sommige zullen mythische wezens blijken, zoals draken of griffioenen, waar we ooit glimlachend aan terug zullen denken: 'Kun je je voorstellen dat mensen daar ooit écht in geloofden?' Andere soorten zul-

len misschien nog eeuwenlang hun onduidelijke status behouden; we slagen er maar niet in een echt goede foto van ze te maken, maar we kunnen ze ook niet definitief naar het rijk der fabelen verwijzen. Ten derde staan er in dit boek wellicht deeltjes die zich nu nog ophouden in de jungle, maar die ooit hun eigen kooi zullen krijgen in de dierentuin. Welke, dat zal de tijd moeten leren. Maar het zou zomaar kunnen dat de volgende keer dat CERN of een ander deeltjesinstituut met een grote aankondiging komt, jij al snapt waar het over gaat. 'Ah ja, het steriele neutrino,' zul je dan denken, terwijl het overgrote deel van de rest van de wereld wanhopig probeert iets te begrijpen van verwarrende nieuwsberichten, inderhaast geschreven door journalisten die ook zelf tot een uur geleden nog nooit van het deeltje in kwestie gehoord hadden.

Daarbij moet ik wel gelijk zeggen dat dit boek allesbehalve uitputtend is. Ooit was het plan om zoveel mogelijk deeltjes te behandelen, maar dat bleek al gauw een ondoenlijke klus. Alleen al met alle deeltjes die zijn bedacht om het donkerematerieprobleem op te lossen, zou je een veel dikker boek dan dit kunnen vullen – of bij elk deeltje moeten volstaan met een paar zinnen aan uitleg. In plaats daarvan heb ik me beperkt tot een selectie, om daar dieper op in te gaan. Zodat je aan het eind niet alleen weet dat er natuurkundigen zijn die denken dat er zoiets is als spiegeldeeltjes, maar ook snapt waaróm ze dat denken, en hoe we hun gelijk of ongelijk met experimenten of waarnemingen zouden kunnen bewijzen.

Tot slot nog dit. In zekere zin heb je hier een vervolg op *De deeltjesdierentuin* in handen – en vervolgen hebben, zeker in de filmwereld, geen al te beste naam. Maar, je hebt hier niet te maken met een cynisch deel twee dat ik op aandringen van de uitgeverij met tegenzin uit mijn mouw heb moeten schudden omdat deel één zo goed liep. Aanvankelijk was het mijn plan om één boek te schrijven dat zowel bekende als hypothetische deeltjes bevatte. Dat bleek een al te ambitieus plan, waardoor ik me in *De deeltjesdierentuin* moest beperken tot quarks, antimaterie, neutrino's, de krachtbosonen en het higgsdeeltje, aangevuld met supersymmetrie en majoranadeeltjes, omdat die naar mijn idee niet mochten ontbreken.

Zelf keek ik echter veel meer uit naar het beschrijven van de meer

exotische deeltjes: magnetische monopolen, gravitonen, axionen... Niet alleen was ik daar zelf veel nieuwsgieriger naar, ook zou het een veel uitdagendere en dus interessantere klus zijn om erover te schrijven. Over dit soort deeltjes zijn namelijk niet al hele boeken volgeschreven door anderen. Wat dat betreft ben ik zelf het afgelopen jaar óók op safari geweest; de juiste deskundigen vinden bleek een stuk lastiger, de literatuur een stuk obscurder. Zo ben ik er nooit in geslaagd om een Nederlandstalige expert te vinden op het gebied van ondeeltjes, die er dus waarschijnlijk gewoon niet is. En ik heb boeken opgedoken uit de universiteitsbibliotheek die volgens mij in geen jaren meer waren aangeraakt.

Uiteindelijk hoop ik dat het is gelukt om een mooi verslag van mijn ontdekkingstocht te maken, dat goed dienst kan doen als een soort *Lonely Planet*-gids bij je eigen reis door de *terrae incognitae* van de natuurkunde. Een reis die niet alleen uitgebreid de wereld van het allerkleinste aandoet, maar ook zal gaan langs onzichtbare planeten, superzware sterren, experimenten die instorten tot zwarte gaten, en de gewelddadige geboorte van ons heelal: de oerknal. Kom daar maar eens om, in het Krugerpark.

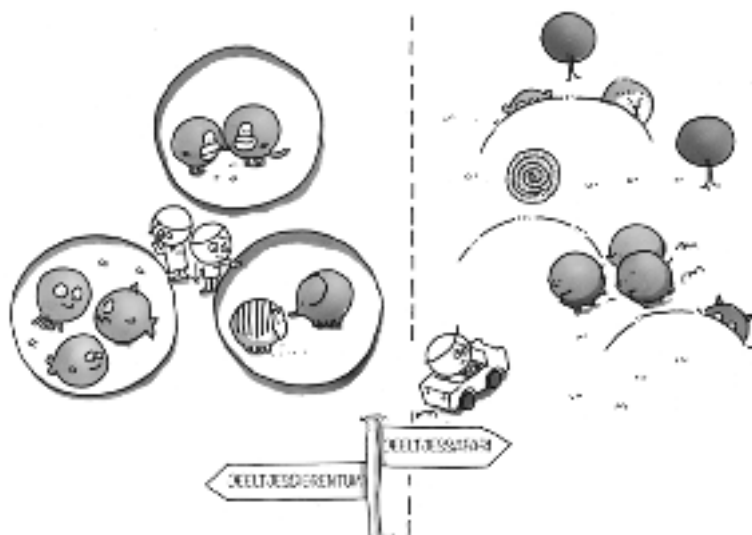
Jean-Paul Keulen
Augustus 2014

IN SNELTREINVAART DOOR DE DEELTJESDIERENTUIN

Deeltjes met een onzekere status, daarop richten we ons als we straks op safari gaan. Maar natuurlijk beginnen we niet onvoorbereid aan zo'n bijzondere ontdekkingsreis. Om te kunnen begrijpen en waarderen wat je straks allemaal in de jungle van de hypothetische deeltjes gaat tegenkomen, moet je eerst weten wat de huidige stand van zaken is. Van welke deeltjes staat al onomstotelijk vast dat ze bestaan, en hoe passen ze in het totaalplaatje?

Dat alles vind je in mijn vorige boek, *De deeltjesdierentuin*.^{*} Hierin presenteerde ik mijzelf als een gids die de bezoekers van deze zonderlinge zoo begeleidde van kooi naar kooi. Daarbij heb ik geprobeerd om in een zo logisch mogelijke volgorde te vertellen wat de deeltjes in die kooien precies inhouden, hoe ze werden ontdekt, en hoe ze met elkaar in verband staan. Mocht je *De deeltjesdierentuin* hebben gelezen, dan kun je dit hoofdstuk in principe overslaan: je weet wat je moet weten om op safari te kunnen gaan.

* 'De deeltjesdierentuin' is geen door mij bedachte term, helaas. Voor zover ik heb kunnen nagaan, sprak de natuurkundige J. Robert Oppenheimer, de 'vader van de atombom', in 1956 op een conferentie voor het eerst over de *subnuclear zoo*; de dierentuin van deeltjes kleiner dan een atoomkern. Conferentiedeelnemers en verslaggevers namen de kreet van hem over. Sindsdien is de variant *particle zoo* – deeltjesdierentuin – in vele teksten over deeltjesfysica opgedoken.



Heb je dat boek niet in de kast staan? Of is het alweer wat weggezakt? Geen nood! In dit hoofdstuk doe ik de rondleiding van destijds over. Zie het als stoomcursus vooraf voor wie wel mee wil op safari, maar eerst nog even het verschil moet leren tussen een doodgewone impala en een veel zeldzamere soort antilope, of tussen een witte en een zwarte neushoorn. De anekdotes over de wetenschappers achter deze deeltjes laat ik deze keer achterwege, alsmede de lange, vaak kronkelige weg die afgelegd moest worden voordat een nieuw deeltje definitief zijn intrek in een kooi kon nemen. De *bare facts*, daar gaat het nu even om.

Om te beginnen zoomen we in op de wereld om ons heen. Alles wat je om je heen ziet, is opgebouwd uit moleculen, die op hun beurt zijn gemaakt van atomen. Een molecuul water bestaat bijvoorbeeld uit één zuurstofatoom en twee waterstofatomen, een ammoniakmolecuul uit één stikstofatoom en drie waterstofatomen, en zo zijn er nog op talloze manieren atomen te combineren tot allerlei bekende en onbekende stoffen.

De verschillende soorten atomen die bestaan, noemen we de elementen. Die vind je terug in het beroemde periodiek systeem, dat prijkt aan de muur van zo'n beetje elk scheikundelokaal ter wereld. In

deze tabel zijn de elementen niet zomaar willekeurig neergekwakt; ze hebben allemaal een nummer. Waterstof heeft bijvoorbeeld nummer 1, zuurstof nummer 8, ijzer nummer 26.

Deze nummers noemen we de atoomgetallen. Om te begrijpen waar die op slaan, moeten we de innerlijke structuur van een atoom in kaart brengen. Neem het waterstofatoom; het simpelste atoom dat er is. Dat bestaat uit een kern van één deeltje, het proton genaamd, waaromheen een ander deeltje cirkelt, het elektron. Het proton en het elektron worden bij elkaar gehouden door hun elektrische ladingen. Het proton is namelijk positief geladen, het elektron negatief, en tegengestelde ladingen trekken elkaar aan. Bekijk je het waterstofatoom als geheel, dan is dat elektrisch neutraal: de positieve lading van het proton in het midden wordt gecompenseerd door de negatieve lading van het elektron aan de buitenkant.

Wat is dan dat atoomgetal? Dat is het aantal protonen waaruit een atoomkern bestaat, en tegelijkertijd het aantal elektronen dat daaromheen cirkelt. Waterstof, met zijn ene proton en elektron, heeft dus atoomnummer één. Zuurstof, dat zoals gezegd atoomnummer acht heeft, beschikt over een kern met acht protonen, met daaromheen een wolk van acht elektronen. En element 118, het zwaarste element dat we tot nu toe in het lab hebben weten te maken, bevat maar liefst 118 protonen en evenveel elektronen.

Daarmee is één belangrijke speler nog onvermeld gebleven: het neutron. Dit deeltje is, zoals de naam al zegt, elektrisch neutraal. Verder weegt het iets meer dan het proton en maakt het deel uit van elke atoomkern, behalve waterstof. Voor de lichtere elementen kun je daarbij als vuistregel hanteren dat er ongeveer evenveel neutronen als protonen in een atoomkern zitten. Zo bestaat een heliumkern (atoomgetal twee) uit twee protonen en twee neutronen, terwijl zuurstof acht protonen en acht neutronen heeft. Bij de zwaardere elementen gaat die regel niet meer op; daar bevatten de atoomkernen meer neutronen dan protonen.

Met elektronen, protonen en neutronen kunnen we dus atomen bouwen. Maar waar zijn die bouwstenen zelf van gemaakt? In het geval van elektronen denken we momenteel dat het gaat om een elemen-

tair deeltje; een deeltje dat niet meer op te splitsen is in andere deeltjes. Voor het proton en het neutron geldt dat niet. Die bestaan elk uit drie nóg kleinere deeltjes: de quarks.

Van die quarks zijn er zes soorten, of, zoals dat heet binnen de deeltjesfysica: ‘smaken’. Van licht naar zwaar zijn dat: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* en *top*. Door steeds drie van deze deeltjes te nemen, kun je allerlei zwaardere deeltjes bouwen. Neem je bijvoorbeeld twee up-quarks en één downquark, dan heb je een proton gemaakt. Neem je één upquark en twee downquarks, dan heb je een neutron gemaakt. En stel dat je je hand in de quarkgrabbelton steekt en er een strangequark, een charmquark en een bottomquark uit haalt? Dan heb je de ingrediënten beet voor een zogenoemd ‘charmed bottom omega-deeltje’. Zo zijn er nog tal van combinaties mogelijk. Deze deeltjes, die uit drie quarks zijn samengesteld, noemen we baryonen, een woord afgeleid van het Griekse *barus*, zwaar.

Naast gewone materie – waar alles om je heen van gemaakt is – kennen we ook antimaterie. Vrijwel elk deeltje heeft een antideeltje: voor het elektron is er het anti-elektron (of positron), voor het proton het antiproton, voor het neutron het antineutron, voor elke quark een antiquark, enzovoort. Die anti-evenknieën wegen steeds precies hetzelfde als het corresponderende ‘gewone’ deeltje, maar hebben een tegengestelde elektrische lading. Dus waar het elektron negatief is, is het anti-elektron positief, en waar het proton positief is, is het antiproton negatief.

Het spannende aan antimaterie is dat je het spul kunt zien als de Nemesis van gewone materie. Komt een gewoon deeltje namelijk zijn antideeltje tegen, dan zullen ze beide verdwijnen. Hun massa’s worden daarbij in één klap omgezet in energie – best veel energie. Een grammetje antimaterie is daarom in feite een bom: breng het in contact met gewone materie en bats! Een enorme explosie is het gevolg.*

* Voor een spannende thriller over dit gegeven, zie Dan Browns *Angels & Demons*, vertaald als *Het Bernini Mysterie*. Neem de wetenschap in het boek alleen wel met een korreltje zout, hoe stellig Brown ook aan het begin van het boek beweert dat alles wat hij schrijft op feiten gebaseerd is.

Daarnaast zou je, als je de boel wat beter onder controle houdt, kunnen fantaseren over antimaterie als energiebron van de toekomst. Gelukkig voor mensen die bang zijn voor ontploffingen en helaas voor mensen die dromen van schone energie: antimaterie komt in ons heelal nauwelijks voor. We moeten het maken in het lab, waarbij het vooralsnog gaat om heel kleine hoeveelheden.

De wereld om ons heen bevat dus geen antimaterie. Of liever: er ontstaat wel af en toe een antideeltje, maar dat verdwijnt binnen de kortste keren doordat het een corresponderend gewoon deeltje tegenkomt. Toch kun je van antideeltjes in principe prima grotere deeltjes bouwen, zoals dat bij gewone deeltjes ook kan. Als je drie antiquarks op een hoop veegt, krijg je een antibaryon, en een antiproton en een anti-elektron vormen samen een antiwaterstofatoom.

Daarnaast zijn er ook hybrides mogelijk, met als belangrijkste voorbeeld deeltjes die uit één quark en één antiquark bestaan: de zogenoemde mesonen. Die deeltjes zijn geen lang leven beschoren. Sowieso niet als je een quark en een antiquark van dezelfde smaak neemt, bijvoorbeeld charm en anticharm: die twee vernietigen elkaar in een oogwenk. (Waarbij een oogwenk in dit geval is gedefinieerd als een duizendste van een miljoenste van een miljoenste van een miljoenste van een seconde.) Voor mesonen die bestaan uit een quark en een antiquark met verschillende smaken geldt dat op zich niet, maar ook die hebben een gemiddelde levensduur van slechts een paar honderdsten van een miljoenste van een seconde.* We hebben het hier dus in alle gevallen over nogal vluchtige deeltjes. Ze bestaan echter wel, en hebben zowel gewone materie als antimaterie als ingrediënten.

Overigens is het misschien nuttig om te weten dat de net besproken mesonen en de baryonen (deeltjes die uit drie quarks bestaan) samen de hadronen worden genoemd. (*Hadros* is Grieks voor sterk, degelijk, flink.) In de rest van dit boek zal ik die term niet gebruiken, maar hij komt bijvoorbeeld wel voor in de naam van de krachtigste

* Dat deeltjes die bestaan uit een quark en een antiquark van verschillende smaken toch vervallen, heeft te maken met de zwakke kracht; die komt verder op in dit hoofdstuk aan bod.

deeltjesversneller ter wereld: de Large Hadron Collider bij Genève, Zwitserland.

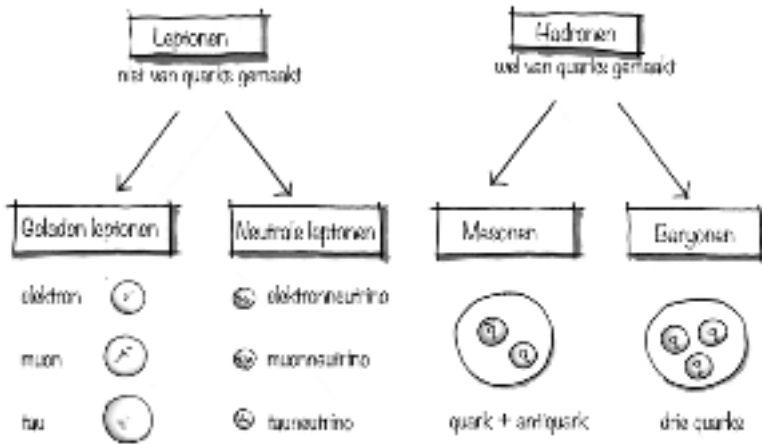
Tot zover de quarks, de antiquarks, en wat je daarvan kunt maken. We gaan terug naar het elektron: het lichte, negatief geladen deeltje dat deel uitmaakt van elk atoom. Dat deeltje blijkt namelijk nog twee zwaardere broertjes te hebben die niet onvermeld mogen blijven: het muon (ruim tweehonderd keer zo zwaar als het elektron) en het tau-deeltje (bijna 3500 keer zo zwaar).

En dan zijn er nog de elektrisch neutrale, extreem lichte neutrino's. Dat zijn misschien wel de meest voorkomende deeltjes in het heelal, maar desondanks zijn ze vrij obscuur. (Of liever: dat waren ze, voordat ze in 2011 uitgebreid in het nieuws kwamen omdat een tijdlang werd gedacht dat ze sneller dan het licht konden reizen). Die relatieve onbekendheid danken ze wellicht aan het feit dat ze zich bar weinig van gewone materie aantrekken. Ze vliegen zo'n beetje overal ongemerkt doorheen – inclusief door jou en mij – waardoor we niet goed doorhebben hoe alomtegenwoordig ze eigenlijk zijn.

Hoewel het in teksten over deeltjes vaak gaat over 'neutrino's', kun je in feite drie soorten onderscheiden: elektronneutrino's, muonneutrino's en tauneutrino's. Als je te maken hebt met een deeltjesproces waarin elektronen een rol spelen, dan zijn eventuele neutrino's die hierbij ontstaan of verdwijnen van het type elektronneutrino. Heb je het over een reactie met muonen, dan komen er muonneutrino's aan te pas. En worden er taudeeltjes opgeslokt of uitgespuwd, dan gaan die vergezeld van tauneutrino's.

De elektronachtige deeltjes en de neutrino's worden samen de leptonen genoemd. Feitelijk betekent dat zoiets als 'lichte deeltjes' (*leptos* is Grieks voor klein, dun, delicaat), wat niet een heel terechte naam blijkt. Het taudeeltje is namelijk bijna twee keer zo zwaar als het proton en dus allesbehalve 'delicaat'. Maar goed, we zitten nu eenmaal vast aan de term.

Met de kreet 'leptonen' op zak kunnen we de tot nu toe behandelde deeltjes in de volgende groepen indelen:



Een interessante vraag is waarom er eigenlijk drie elektron-achtige deeltjes en drie soorten neutrino's zijn. En als we dan toch bezig zijn: waarom zijn er maar liefst zes quarks? Met alleen de up- en de down-quark kunnen we alle materie om ons heen bouwen. Wat hebben we dan aan ook nog een strange-, een charm-, een bottom- en een top-quark? Temeer daar ze niet echt bijzondere eigenschappen hebben; de charm- en de topquark hebben dezelfde elektrische lading als de up-quark (+2/3), terwijl de strange- en bottomquark dezelfde lading hebben als de downquark (-1/3). Waarom is Moeder Natuur zo scheutig met 'overbodige' deeltjes?

Het antwoord op die vraag is er helaas nog niet. Wel kunnen we deze 'elektronachtige' deeltjes, de drie smaken neutrino en de zes quarks in drie groepen verdelen die generaties worden genoemd:

Generatie	Quarks	Geladen lepton	Neutraal lepton
Eerste generatie	up, down	elektron	elektronneutrino
Tweede generatie	strange, charm	muon	muonneutrino
Derde generatie	bottom, top	tau	tauneutrino

Blijft het daarbij? Dat gaan we zien in hoofdstuk 4...

Tot nu toe hebben we het gehad over de deeltjes waar gewone materie uit bestaat; de zogenoemde fermionen. Je zou kunnen denken dat we daarmee klaar zijn, maar de deeltjesdierentuin blijkt nóg een flinke afdeling te hebben. Die is ingeruimd voor een heel ander type deeltjes: de bosonen. Deze fungeren niet als bouwstenen van materie, maar spelen een heel andere rol: ze zorgen ervoor dat andere deeltjes op allerlei manieren elkaars aanwezigheid 'voelen'.

We hebben het dan over de krachten die in ons universum tussen deeltjes werken. Dat zijn er vier: de zwaartekracht, de elektromagnetische kracht, de sterke kracht en de zwakke kracht. De zwaartekracht is het bekendst: de aantrekkende kracht van alles wat maar een massa heeft. Toch is deze kracht binnen de deeltjesfysica het minst belangrijk: hij is in vergelijking met de andere drie het zwakst en is daardoor in de meeste gevallen verwaarloosbaar – zeker aangezien afzonderlijke deeltjes nauwelijks iets wegen. Bovendien is het ons nog niet gelukt om deze kracht in een 'deeltjesvorm' te gieten. Mocht dat ooit toch lukken, dan weten we wel al hoe het zwaartekrachtdeeltje gaat heten: het graviton. Meer hierover in hoofdstuk 5.

Komen we bij de elektromagnetische kracht. Dat is de aantrekkende kracht tussen deeltjes met verschillende elektrische ladingen (zoals de negatief geladen elektronen en de positief geladen protonen) en de afstotende kracht tussen deeltjes met gelijke ladingen (zoals protonen onderling). De elektromagnetische kracht is absoluut geen onbelangrijke kracht: het feit dat atomen kunnen bestaan en dat die atomen samen grotere structuren kunnen vormen zoals dit boek, danken we eraan. Deze kracht wordt echter niet zomaar gevoeld; hij heeft een boodschapper nodig in de vorm van een deeltje. In dit geval: een masaloos deeltje dat we het foton noemen. Misschien denk je nu: 'Hé, maar het foton... Is dat niet gewoon het deeltje waar licht uit bestaat?' Klopt, maar daarnaast is het dus het deeltje dat ervoor zorgt dat verschillend geladen deeltjes elkaar aantrekken en gelijk geladen deeltjes elkaar afstoten. Met andere woorden: het foton verlicht niet alleen de wereld om ons heen, maar zorgt er ook voor dat die wereld überhaupt kan bestaan.

Als derde is er de sterke kracht, die twee taken heeft. Ten eerste houdt hij de groepjes quarks bij elkaar die samen een baryon of meson

vormen. Ten tweede zorgt de sterke kracht ervoor dat protonen, die elkaar onderling afstoten omdat ze allemaal een positieve lading hebben, desondanks samen atoomkernen kunnen vormen. De sterke kracht dient dus in meerdere opzichten als de lijm die de deeltjes waar wij uit bestaan bij elkaar houdt. Die eigenschap zien we terug in de naam van het boson dat deze kracht communiceert: het gluon, waar- in het Engelse woord voor lijm, *glue*, terug te vinden is.

Tot slot is er de zwakke kracht. Die heeft niet een aantrekkende of afstotende rol tussen deeltjes, zoals de andere krachten. In plaats daarvan is de zwakke kracht verantwoordelijk voor radioactiviteit: het verschijnsel waarbij atoomkernen spontaan vervallen tot andere atoomkernen. Dat klinkt misschien als een marginaal verschijnsel; handig als je een kernreactor of atoombom wil bouwen, maar voor ‘de gewone man’ niet zo van belang. In de reacties die ervoor zorgen dat onze zon kan branden, speelt de zwakke kracht echter een sleutelrol. Ook zonder de zwakke kracht zou er dus geen leven mogelijk zijn. En, net zoals de overige krachten, heeft de zwakke kracht deeltjes die hem overdragen. Dat zijn het positieve en negatieve *W*-boson (met de ‘*w*’ van *weak*), en het neutrale *Z*-boson (met de ‘*z*’ van *zero*; een verwijzing naar de elektrische lading van nul).

Kracht	Boson(en)
Zwaartekracht	Graviton
Elektromagnetische kracht	Foton
Sterke kracht	Gluon
Zwakke kracht	W^+, W^-, Z

Wat we hierboven besproken hebben, wordt het Standaardmodel van de deeltjesfysica genoemd, of kortweg het Standaardmodel. Die bijna-alles-omvattende theorie bevat dus alle deeltjes waar wij uit bestaan, allerlei extra deeltjes waar wij niet uit bestaan (zoals de tweede en de derde generatie en antimaterie), en de deeltjes die alle krachten in ons heelal overbrengen – behalve de zwaartekracht. Zijn we daarmee klaar? Nee, want dan hebben we nog één kooi in de deeltjesdierentuin overgeslagen: die van het higgsdeeltje.

Het higgsdeeltje maakt deel uit van de oplossing van een groot probleem waar de deeltjesfysica begin jaren zestig mee kampte. Het was toen namelijk duidelijk geworden dat de deeltjes die de zwakke kracht overdroegen, de W - en Z -bosonen, een massa moesten hebben. (Dit in tegenstelling tot fotonen en gluonen, die massaloos zijn.) Alleen: als je ze die massa ook daadwerkelijk gaf, begon de theorie die men gebruikte om dit soort krachten te beschrijven onzin uit te kramen. De vraag was dus: hoe houd je de theorie werkend, terwijl je toch W - en Z -deeltjes hebt die iets wegen?

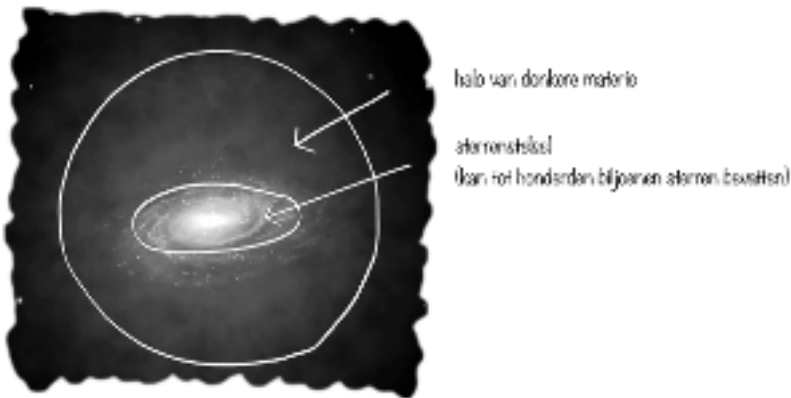
Het antwoord bleek het higgsveld. Dat is een onzichtbaar veld, overal aanwezig in het heelal, dat ervoor zorgt dat de W - en Z -deeltjes de massa krijgen die ze horen te hebben, zonder dat de formules van de bijbehorende theorie doldraaien. Bij wijze van bonus kan zo'n veld ervoor zorgen dat andere elementaire deeltjes, zoals de quarks, ook de massa kunnen krijgen die we weten dat ze hebben. Er is echter een prijs die betaald moet worden als je zo'n 'massa-geefveld' introduceert: er hoort een nieuw boson bij, het higgsdeeltje. Dat bleef na het bedenken van het higgsveld decennialang onvindbaar, waardoor het hele idee al die tijd op losse schroeven bleef staan. Maar zoals gezegd in de inleiding: op 4 juli 2012 konden wetenschappers die werkten met de deeltjesversneller LHC eindelijk aankondigen dat ze het higgsdeeltje hadden ontdekt. Het Standaardmodel was compleet.

Toch is het Standaardmodel niet het hele verhaal. Er is een aantal grote vragen in de natuur- en sterrenkunde die we niet kunnen beantwoorden met de verzameling deeltjes die we nu kennen. Misschien wel het grootste mysterie is dat van de donkere materie. Dat houdt in dat het heelal meer dan zes keer zoveel massa lijkt te bevatten als we kunnen zien. Waar die onzichtbare massa uit bestaat? Dat kan op het moment nog niemand met zekerheid zeggen. Wel is het overgrote deel van de fysici het erover eens dat een nieuw soort deeltje hiervoor verantwoordelijk is.

Allereerst de vraag: hoe weten we dat er donkere materie is? Dat blijkt uit allerlei zaken. Ten eerste bestaat ons heelal uit sterrenstelsels, schijven van soms honderden miljarden sterren, die groepen

vormen, clusters genaamd. Uit de bewegingen van stelsels binnen zo'n groep kun je afleiden hoeveel zo'n cluster in totaal zou moeten wegen. En dat blijkt veel meer te zijn dan de massa's van de zichtbare stelsels bij elkaar opgeteld.

Ook op kleinere schaal zien we donkere materie (of liever gezegd: zien we die niet). Sterren aan de buitenkant van sterrenstelsels bewegen namelijk veel sneller rond het midden van hun stelsel dan je zou verwachten op grond van de massa van het hele stelsel. Ook hier zou een dot extra materie, onzichtbaar voor onze telescopen, het probleem kunnen oplossen. Die materie zou dan waarschijnlijk de vorm hebben van een grote bol rond de schijf van zichtbare sterren: de zogenoemde halo.



En er is meer. Zo komt het soms voor dat het licht van een heel ver sterrenstelsel langs een nabijgelegen stelsel komt op zijn weg naar de aarde. Dat licht wordt door de massa van het tussenliggende stelsels afgebogen; een verschijnsel dat een zwaartekrachtlenze wordt genoemd. De waargenomen mate van afbuiging bij dit soort zwaartekrachtlenzen wijst erop dat dit soort stelsels veel meer massa bevatten dan we kunnen zien.

Al met al is inmiddels wel duidelijk dat ons heelal heel wat meer massa bevat dan besloten ligt in de sterren die we kunnen zien. Je zou dan

kunnen denken aan astronomische objecten die simpelweg geen licht geven, zoals: sterren die te licht zijn om aan kernfusie te doen, neutronensterren (die, zoals de naam al zegt, puur uit neutronen bestaan) en zwarte gaten. Projecten die gebruikmaken van de eerdergenoemde zwaartekrachtlenzen laten echter zien dat er bij lange na niet genoeg van dit soort objecten zijn om het sommetje kloppend te maken. Bovendien kunnen we uitrekenen hoeveel protonen en neutronen er ontstonden na de oerknal – en dat blijken er veel te weinig te zijn om het donkerematerieprobleem op te lossen. Oftewel: donkere astronomische objecten die gemaakt zijn van deze protonen en neutronen, zoals de bovengenoemde voorbeelden, kunnen nooit het antwoord zijn.

Wat dan wel? Deeltjes, zo lijkt het. Deeltjes die natuurlijk een massa moeten hebben – anders zouden ze niet met hun zwaartekracht het heelal kunnen beïnvloeden – maar die voor de rest heel weinig van hun aanwezigheid laten merken. Dat betekent dat ze in elk geval ongevoelig moeten zijn voor de elektromagnetische kracht. Zouden ze dat niet zijn, dan zouden ze fotonen kunnen uitzenden, absorberen of weerkaatsen en dan zouden we ze moeten kunnen zien. Ook de sterke kracht mag geen grip hebben op deze deeltjes; anders zouden ze zich merkbaar bemoeien met atoomkernen, die immers door deze kracht geregeerd worden.

Blijft over de zwakke kracht, waaraan donkeremateriedeeltjes in principe wél onderhevig zouden kunnen zijn. Of dat zo is, weten we niet; het kan net zo goed dat de deeltjes in kwestie alleen maar zwaartekracht produceren en via geen enkele van de overige krachten iets van zich laten merken. Is dat laatste het geval, dan zullen ze héél lastig te vinden zijn.

Eén mogelijke oplossing van het donkerematerieprobleem komt voort uit een idee dat ik in *De deeltjesdierentuin* al uitvoerig heb behandeld: supersymmetrie. Dat houdt in dat er voor elk deeltje een veel zwaarder ‘superdeeltje’ bestaat.* Nu wil het geval dat we nog

* Eigenlijk is het wat gecompliceerder. Sommige deeltjes hebben bijvoorbeeld twee superpartners. Daarnaast schrijft supersymmetrie maar liefst vijf higgs-

geen enkel supersymmetrisch deeltje hebben gezien. Sterker nog: hoe meer waarnemingen we doen, hoe meer het hele idee in het nauw komt. (Om de zoveel tijd is er zelfs een nieuwsbericht dat supersymmetrie zo goed als dood verklaart, maar dat is ook weer wat voorbarig.)

Om mezelf niet te herhalen, zal ik in dit boek niet verder ingaan op supersymmetrie. Maar ik voer het idee hier toch even op, omdat een van die mysterieuze superdeeltjes momenteel de populairste donkeremateriekandidaat is – en donkere materie is nu eenmaal een belangrijk, terugkerend onderwerp in dit boek. We hebben het dan over het lichtste neutralino (supersymmetrie voorspelt in totaal vier neutralino's, met verschillende massa's). Dit deeltje vol doet – als het bestaat – namelijk aan alle voorwaarden om donkere materie te kunnen zijn: het heeft een massa (en veroorzaakt dus zwaartekracht), maar de elektromagnetische en de sterke kracht hebben er geen grip op. Bovendien is het naar verwachting stabiel (het valt niet binnen de kortste keren uit elkaar in andere deeltjes) en zou het dus al miljarden jaren in groten getale kunnen rondwaren door ons heelal. Dat maakt het tot het vaakst genoemde deeltje in de categorie *wimps* of *weakly interacting massive particles*: deeltjes met een massa die alleen via de zwakke kracht interactie hebben met andere materie.

Ondanks de onzekere status van supersymmetrie zijn er nog steeds behoorlijk wat deeltjesfysici die het lichtste neutralino noemen als de meest waarschijnlijke oplossing van het donkerematerieprobleem. In de loop der jaren zijn er echter nog talloze andere deeltjes bedacht die ook donkere materie kunnen vormen, waaronder heel wat van de deeltjes die in de komende hoofdstukken centraal staan. Welke van die deeltjes echt bestaan, moet natuurlijk nog blijken. Ook weten we niet of zo'n deeltje vervolgens gelijk het héle donkeremateriepro-

deeltjes voor: drie zonder elektrische lading, één met een positieve lading, en één met een negatieve lading. Ook hebben het foton, de *W*- en *Z*-bosonen en deze higgsdeeltjes niet elk een eigen superpartner; hier staan vier neutrale 'neutralino's' (niet te verwarren met neutrino's) en twee geladen 'chargino's' tegenover.

bleem oplost, of slechts een deel ervan. Maar het lijkt al met al verstandig om niet al ons geld op het lichtste neutralino te zetten.

Tot zover de rondgang-met-een-rotvaart door de deeltjesdierentuin. Nu we het deel van de deeltjesfysica dat niet of nauwelijks ter discussie staat hebben opgefrist, kunnen we ons gaan begeven op onbekend gebied, waar we een glimp zullen opvangen van de deeltjes die we wellicht ooit in de toekomst, of helemaal nooit, zullen ontdekken. Met andere woorden: op safari!