

Donkere Materie (3): Onzichtbaar en ongrijpbaar

In het [vorige artikel](#) hebben we verschillende aanwijzingen behandeld die het onderzoek naar donkere materie ons tot nu toe heeft opgeleverd. De voornaamste techniek die voor dat onderzoek is gebruikt, is de lenswerking van de zwaartekracht: het afbuigen van licht door gekromde ruimte-tijd. Via deze methode zijn we erachter gekomen dat de missende massa zich op een andere locatie kan bevinden dan onze bekende lichtgevende materie. Deze waarneming is flink lastig te verklaren met alternatieve zwaartekrachttheorieën, en heeft veel (astro-)fysici ervan overtuigd dat donkere materie echt bestaat. (Al kun je als wetenschapper natuurlijk niets uitsluiten.)

Dit brengt echter een nieuw probleem met zich mee: als donkere materie echt bestaat, waar is het dan van gemaakt? Zoektochten (ook door middel van de lenswerking van zwaartekracht) naar compacte donkere objecten zoals zwarte gaten, neutronensterren en losgeslagen planeten, hebben te weinig opgeleverd om alle donkere materie te verklaren. Dit wijst erop dat de missende massa niet met onze standaardmaterie verklaard kan worden, wat leidt tot een verontrustende conclusie: donkere materie bestaat uit iets heel anders dan alle deeltjes die we nu kennen. De verklaring kan wel een onbekend elementair deeltje zijn met voldoende massa, dat helemaal niet of alleen zwak met andere deeltjes wisselwerkt. Dit hypothetische deeltje wordt door natuurkundigen het “zwak wisselwerkende massieve deeltje” (Weakly Interacting Massive Particle, oftewel: WIMP) genoemd.

Het wonder van de geboorte

Alle deeltjes die natuurkundigen kennen zijn opgenomen in het [standaardmodel](#): de theorie die beschijft welke deeltjes er bestaan en hoe ze met elkaar wisselwerken. Volgens de huidige theoriën zijn al deze deeltjes vlak na de oerknal ontstaan, toen het heelal nog veel

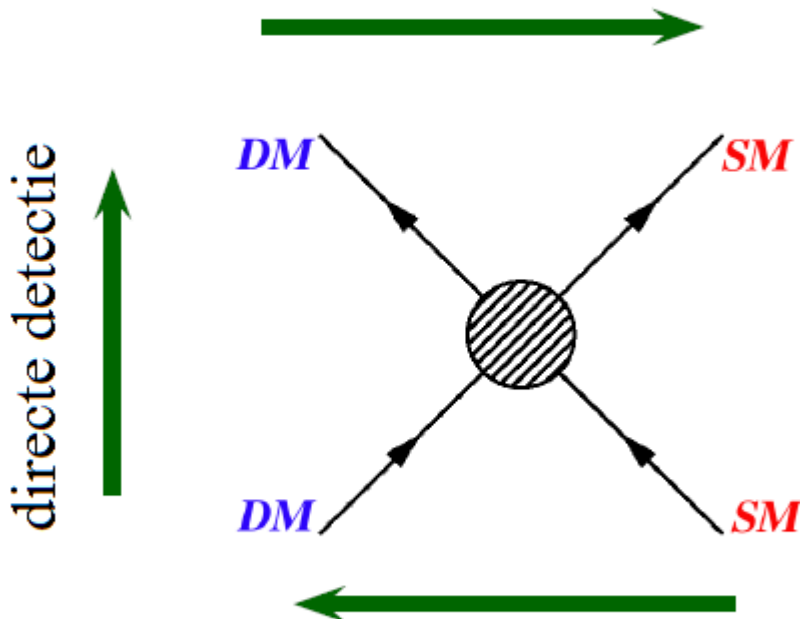
kleiner en heter was dan nu. De energie die in het vroege heelal aanwezig was heeft zich omgezet in de deeltjes die we vandaag in het heelal zien. Hoeveel deeltjes er van elke soort ontstaan zijn, oftewel de verhouding tussen de verschillende soorten, hangt af van twee factoren: de massa van het deeltje, en de kracht van zijn wisselwerking met andere deeltjes. Voor elk deeltje geldt namelijk: hoe hoger je massa, hoe meer energie je nodig hebt om te ontstaan. Bovendien geldt: hoe sterker je wisselwerking met andere deeltjes, hoe groter de kans dat je in zo'n ander deeltje verandert, of dat een ander deeltje in jouw soort verandert.

Dit roept de vraag op hoe en wanneer WIMPS zijn ontstaan, maar het lijkt waarschijnlijk dat deze op dezelfde manier tot stand zijn gekomen als de deeltjes uit het standaardmodel. Dit bracht natuurkundigen op een idee: stel dat WIMPS, net als standaarddeeltjes, ook in het vroege heelal konden ontstaan, en dat ze in elkaar omgezet konden worden. Wat zou de uiteindelijke verhouding tussen standaarddeeltjes en WIMPS zijn, afhankelijk van hun massa en de kracht van hun wisselwerking? Als logische waarde voor de kracht van hun wisselwerking kozen de fysici die van de zwakke kernkracht. Zoals de naam al zegt is die fundamentele kracht erg zwak, precies wat er voor de donkere materie nodig was. De massa die met deze kracht wordt geassocieerd, kon meteen als de massa van de WIMPs gebruikt worden. Wat bleek: de verhouding tussen normale deeltjes en WIMPS die tevoorschijn kwam uit deze berekening, is precies de verhouding tussen normale en donkere materie die wordt waargenomen in het heelal! Dit vonden fysici zo'n sterke aanwijzing, dat ze dit het "WIMP Wonder" noemden.

Een duistere drie-eenheid

Dit wonderlijke resultaat heeft natuur- en sterrenkundigen op het spoor gebracht van een nieuw soort donkere materie: een elementair deeltje dat door middel van de zwakke kernkracht wisselwerkt met de deeltjes uit het standaardmodel. Dat brengt mogelijkheden met zich mee: als donkere materie effect heeft op onze standaardmaterie, of er zelfs in kan veranderen, dan kunnen er verschillende experimenten worden opgesteld om deze gebeurtenissen waar te nemen. Omdat er drie verschillende manieren zijn waarop WIMPs en standaarddeeltjes met elkaar kunnen wisselwerken, zijn de experimenten die op zoek zijn naar deze kosmologische "heilige graal" in te delen in drie categorieën: indirecte detectie, productie, en directe detectie.

- indirecte detectie
- interactie in het vroege heelal



- productie in deeltjesversnellers
- interactie in het vroege heelal

Afbeelding 1. Detectiemethoden van donkere materie. Dit Feynmandiagram geeft de verschillende interacties weer die plaats zouden kunnen vinden tussen donkere materie (aangegeven met DM) en de normale materie van het standaardmodel (aangegeven met SM). De drie bekende methodes om donkere materie te vinden: indirecte detectie, productie, en directe detectie, hangen af van deze drie mogelijke interacties. Bron: [Max-Planck-Gesellschaft](#).

Deze drie methoden worden weergegeven in het zogenaamde Feynmandiagram van afbeelding 1, waarin de verschillende interacties tussen donkere materie (aangegeven met DM) en de materie van het standaardmodel (aangegeven met SM) worden getoond. Een Feynmandiagram is een manier om de interactie tussen deeltjes weer te geven. Elk deeltje dat meedoet aan de interactie wordt voorgesteld door een zwarte lijn met een klein pijltje. In het midden, waar alle lijnen bij elkaar komen, vindt de interactie plaats. Een Feynmandiagram kun je altijd in meerdere richtingen lezen, bijvoorbeeld van rechts naar links, van links naar rechts, of van beneden naar boven. De leesrichting (de grote groene pijlen in de afbeelding) interpreteren we als de kant die de reactie opgaat in de tijd. Voor elk normaal deeltje (zowel DM- of SM-deeltjes) wijst het kleine zwarte pijltje dezelfde kant op als

de tijdrichting. Staat een zwart pijltje in de omgekeerde richting van de tijdrichting, dan heb je te maken met een antideeltje (een anti-DM- of een anti-SM-deeltje). Antideeltjes zijn hetzelfde als normale deeltjes, maar dan met de tegenovergestelde lading: positieve lading wordt negatief, en negatieve lading wordt positief. Donkere materie heeft echter geen lading, en kan daardoor zijn eigen antideeltje zijn.

Nu kunnen we het diagram in afbeelding 1 van verschillende richtingen bekijken, waarbij de tijd in de richting loopt van één van de grote groene pijlen. Van beneden naar boven gezien staan alle kleine zwarte pijltjes mee met de richting van de tijd (de groene pijl links). Dit geeft aan dat alle deeltjes normale deeltjes zijn, en geen antideeltjes. Daarom blijven na de reactie alle deeltjes gewoon bestaan. Deeltjes en antideeltjes verdwijnen en verschijnen namelijk altijd in paren: tijdens een reactie kunnen een normaal deeltje en antideeltje elkaar opheffen, om weer een nieuw paar (deeltje en antideeltje) te maken. Dit is te zien als je het diagram in afbeelding 1 van links naar rechts leest (groene pijl boven). Dit is de reactie van twee DM-deeltjes: een normaal DM-deeltje (de onderste) en een anti-DM-deeltje (de bovenste). Deze veranderen in twee SM-deeltjes, ook een normaal deeltje (de bovenste) en een antideeltje (de onderste). Als je het diagram echter van rechts naar links leest, gaat de reactie precies andersom: een paar SM-deeltjes verandert nu in een paar DM-deeltjes. Omdat de richting van de tijd omgedraaid is, zijn de normale deeltjes nu anti-deeltjes geworden en andersom. Je zou een anti-deeltje dus kunnen beschouwen als een gewoon deeltje dat teruggaat in de tijd!

Vele wegen leiden naar Stockholm

Nu we de verschillende manieren kennen om het Feynmandiagram te lezen, kunnen we aan elk van deze manieren een experiment koppelen. De bovenste pijl, van links naar rechts, laat bijvoorbeeld zien hoe twee donkere materie-deeltjes elkaar opheffen (dit wordt annihilatie genoemd) en twee normale deeltjes produceren. Dit is de omzetting van donkere materie in normale materie die ook in het begin van het heelal heeft plaatsgevonden. Nu kunnen we, als dit vandaag nog steeds voorkomt, de normale materie die bij annihilatie van donkere materie vrijkomt, waarnemen met telescopen. Het zoeken van deze deeltjes, die in het heelal uit donkere materie zijn ontstaan, heet 'indirecte detectie'. De producten van de annihilatie van donkere materie kunnen onder andere bestaan uit protonen en elektronen, die tegelijkertijd worden geproduceerd met hun antideeltjes: antiprotonen en positronen. Omdat het universum minder rijk is aan antideeltjes wordt meestal naar deze producten gezocht om

achtergrondruis tegen te gaan. Als je antiprotonen of positronen tegenkomt, is de kans namelijk klein dat die op een andere manier zijn ontstaan.

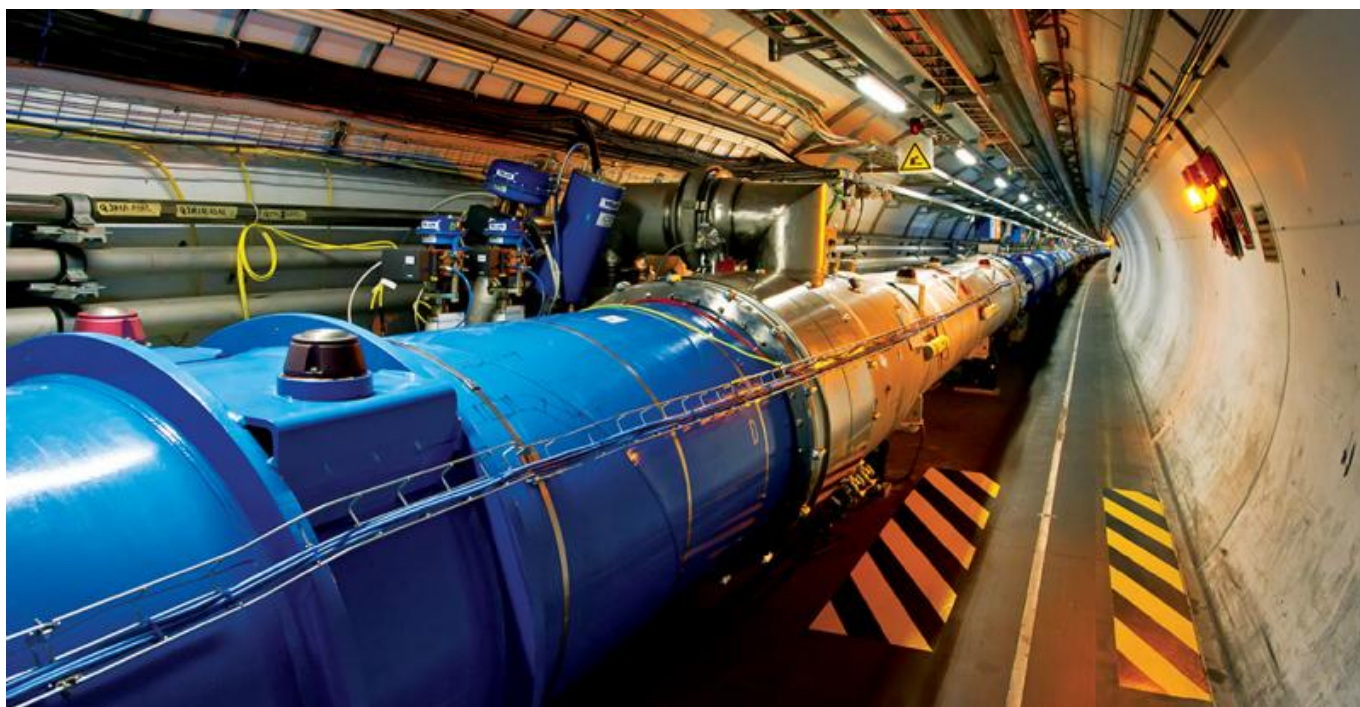


Afbeelding 2. De Fermi-ruimtetelescoop. De Fermi-ruimtetelescoop is een van de gamma-telescopen die astronomen gebruiken om fotonen te detecteren die mogelijk vrijkomen bij de annihilatie van donkere materie. De telescoop zweeft in een baan om de aarde, omdat de dampkring gammastraling tegenhoudt. Helaas is er tot nu toe nog geen overtuigende detectie gedaan. Bron: NASA.

Ook fotonen (lichtdeeltjes) zouden geproduceerd kunnen worden uit donkere materie. Dit zijn waarschijnlijk fotonen met zeer hoge energieën, gezien de relatief hoge massa van donkere materie. Als de massa van donkere materie volledig in lichtdeeltjes wordt omgezet, komt er hoogenergetische gammastraling vrij. Deze fotonen zouden kunnen worden gedetecteerd met gamma-telescopen, zoals bijvoorbeeld de Fermi ruimte-telescoop, te zien op afbeelding 2. Omdat gammastraling niet door de dampkring heen kan, zweeft deze telescoop in een

baan om de aarde. Met deze en andere telescopen die hoogenergetische fotonen of antideeltjes detecteren, zoeken astronomen al jaren naar een signaal dat mogelijk door donkere materie is geproduceerd. Soms wordt er een aanlokkelijk signaal gevonden, maar tot nu toe blijkt het steeds vals alarm, of is het gevonden bewijs niet sterk genoeg om zoiets bijzonders als een detectie van donkere materie te claimen.

De omgekeerde reactie, van standaarddeeltjes naar donkere materie, wordt weergegeven door de onderste pijl in afbeelding 1. Van rechts naar links, zien we hoe twee SM-deeltjes worden omgezet in twee DM-deeltjes, een reactie die ook in het vroege heelal heeft plaatsgevonden. Dit betekent dat donkere materie geproduceerd zou kunnen worden in deeltjesversnellers, wat wordt geprobeerd in de Large Hadron Collider (LHC) in Genève (zie afbeelding 3). In deze ring, die met een omtrek van 27 kilometer de grootste machine ter wereld is, worden namelijk de omstandigheden uit het jonge hete heelal nagebootst, toen deeltjes nog continu met hoge snelheden op elkaar botsten. Door protonen tot hoge energieën te laten versnellen en met elkaar te laten botsen, kunnen uit hun bewegingsenergie nieuwe deeltjes (waaronder donkere materie) ontstaan. Echter, zelfs als twee botsende protonen zich deels zouden omzetten in DM-deeltjes, zou de detector ze niet kunnen detecteren. De enige manier om te achterhalen of er donkere materie is gecreëerd, is door alle SM-deeltjes te traceren en het totaal te controleren op grote hoeveelheden missende energie. Als er minder energie zit in de deeltjes die tijdens de botsing zijn ontstaan dan er eerst in de protonen zat, dan kan het zijn dat er een gedeelte is ontsnapt in de vorm van donkere materie-deeltjes.



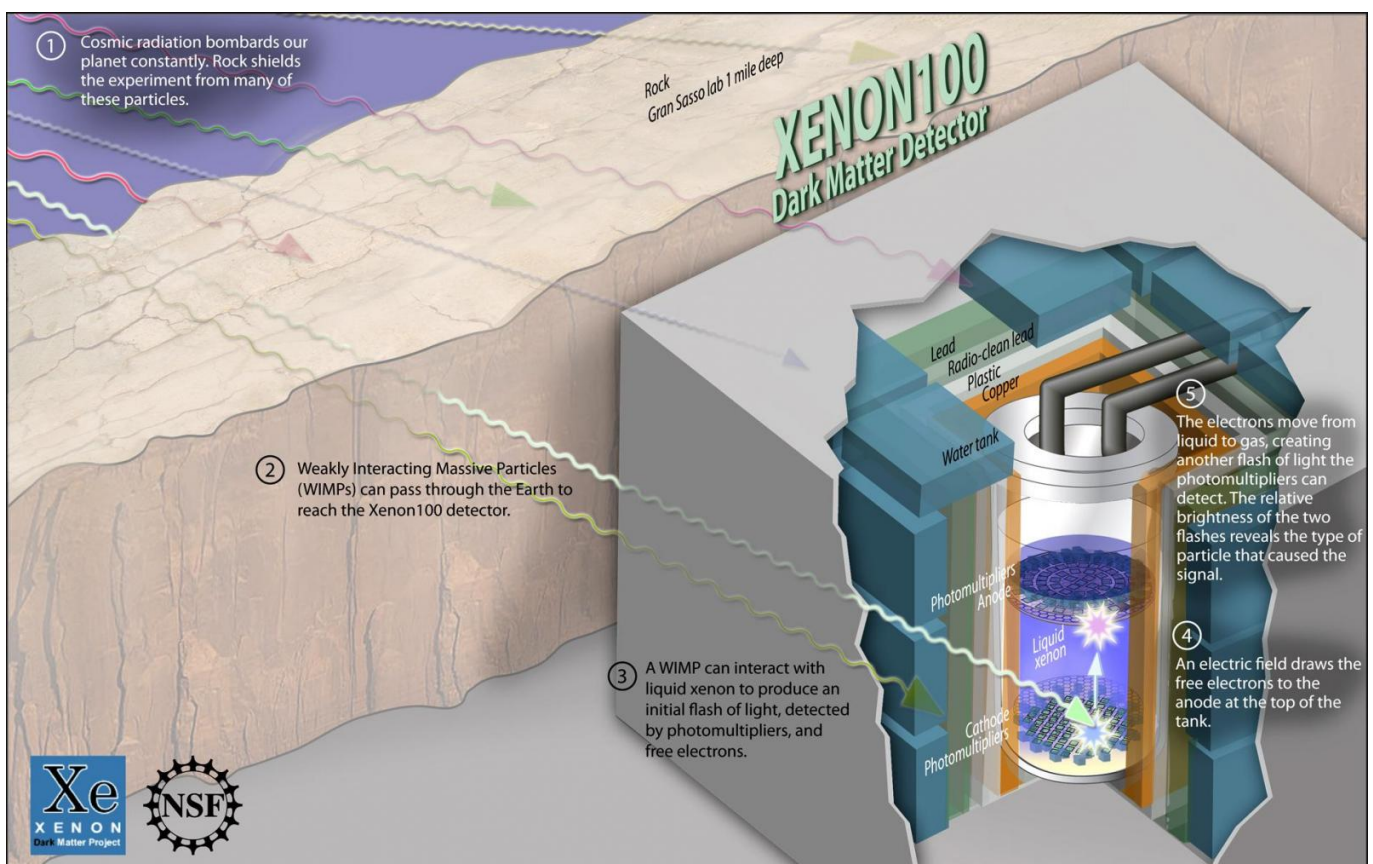
Afbeelding 3. De Large Hadron Collider.In de Large Hadron Collider wordt geprobeerd om donkere materie te creëren, door protonen met hoge snelheid op elkaar te laten botsen. De donkere materie zelf is helaas niet te detecteren, maar als de deeltjes die uit de botsing voortkomen minder energie hebben dan de protonen aan het begin, dan weten we dat er iets vreemds aan de hand is. Bron: CERN.

Wachten op een reactie

Deze twee experimenten zijn echter nog niet genoeg om de aard van donkere materie te achterhalen: er zal nog steeds een directe detectie van donkere materie moeten plaatsvinden. “Directe detectie” wordt weergegeven door de pijl links in afbeelding 1, van beneden naar boven. Hierbij botst een DM-deeltje met een atoomkern die bestaat uit SM-deeltjes, waardoor dit atoom een stootje krijgt. De energie van dit stootje wordt omgezet in fotonen. Het meten van deze zeldzame gebeurtenis wordt geprobeerd door middel van gigantische tanks gevuld met vloeibaar edelgas, waar foton-detectoren in geplaatst zijn.

Zo is er bijvoorbeeld het XENON-experiment, waarbij het Nederlandse Nationale Instituut voor Kern- en Hoge Energiefysica (Nikhef) betrokken is (zie afbeelding 4). Deze detector staat in de Gran Sasso-mijn in Italië, meer dan een kilometer onder de grond. Dit houdt standaarddeeltjes en kosmische straling tegen, maar donkere materie kan overal doorheen. De tank is gevuld met vloeibaar xenon, omdat dit edelgas bijna niet met standaarddeeltjes reageert. In 2006 begon het XENON-experiment onder de naam XENON10. De tank was

namelijk gevuld met meer dan tien kilogram vloeibare xenon. Twee jaar later werd dit proefmodel vervangen door zijn grote broer: XENON100. Zoals de naam zegt bevatte deze meer dan honderd kilo xenon. Helaas is gedurende de hele looptijd van dit experiment geen overtuigende detectie gedaan. In 2015 is de nieuwste versie van dit experiment geïnstalleerd: XENON1T. De T staat voor de drieënhalve ton (3500 kg) xenon die in deze tank is opgeslagen. Als WIMPs bestaan is de kans op een detectie nog nooit zo groot geweest. Op dit moment, maart 2016, is het precies tien jaar geleden dat de eerste detector van het XENON-experiment gestart is, en nog steeds is het wachten op die ene reactie van xenon met donkere materie.



Afbeelding 4. De XENON-detector.In de Gran Sasso-mijn in Italië, meer dan een kilometer onder de grond, wachten natuurkundigen al meer dan tien jaar op een reactie van donkere materie met een xenon-atoom in hun detector. In een grote tank, gevuld met vloeibaar xenon en foton-detectors, moet een WIMP botsen met een xenon-atoom, om zo een foton vrij te maken dat gedetecteerd kan worden. Het grootste experiment tot nu toe, XENON1T, is net van start gegaan. Bron: The XENON Dark Matter Project.

Kortom, aan elk van deze drie methoden wordt al jaren keihard gewerkt door wetenschappers over de hele wereld, en elk van hen zou het liefst de eerste zijn om een

detectie te claimen en inzicht te scheppen in de aard van de missende massa. Het project of de persoon die dat lukt staat waarschijnlijk een Nobelprijs te wachten, maar voorlopig wacht de wereld nog op een oplossing van dit duistere mysterie.

Het volgende artikel in dit dossier verschijnt op vrijdag 29 april.

Bibliografie:

- Introduction to Cosmology; Barbara Ryden; Pearson Education Inc. 2003
- Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints; Gianfranco Bertone, Dan Hooper, Joseph Silk (arxiv.org/abs/hep-ph/0404175)

Links:

- The Fermi gamma-ray telescope (<http://fermi.gsfc.nasa.gov>)
- The Large Hadron Collider (<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>)
- The XENON experiment (<http://www.xenon1t.org>)