De zoektocht naar donkere materie (1)

Hoe zoek je naar iets dat je niet kunt zien? Michiel Rollier zocht uit hoe wetenschappers met het XENON-experiment op zoek zijn naar donkere materie. Vandaag deel 1 van dit tweeluik.

Afbeelding 1. Donkere materie waarnemen.Wetenschappers werken aan de XENON-detector. Foto: Enrico Sacchetti.

Twee jaar geleden werd op deze website al een vierdelig dossier gewijd aan een interessant concept binnen de fundamentele natuurkunde dat wetenschappers “donkere materie” hebben genoemd. In de vier delen van die serie besprak Margot Brouwer op een heldere manier waarom de natuurkunde überhaupt zo’n ongrijpbare hypothese nodig heeft, wat de implicaties ervan zijn, en via welke kanalen de wetenschappelijke gemeenschap donkere

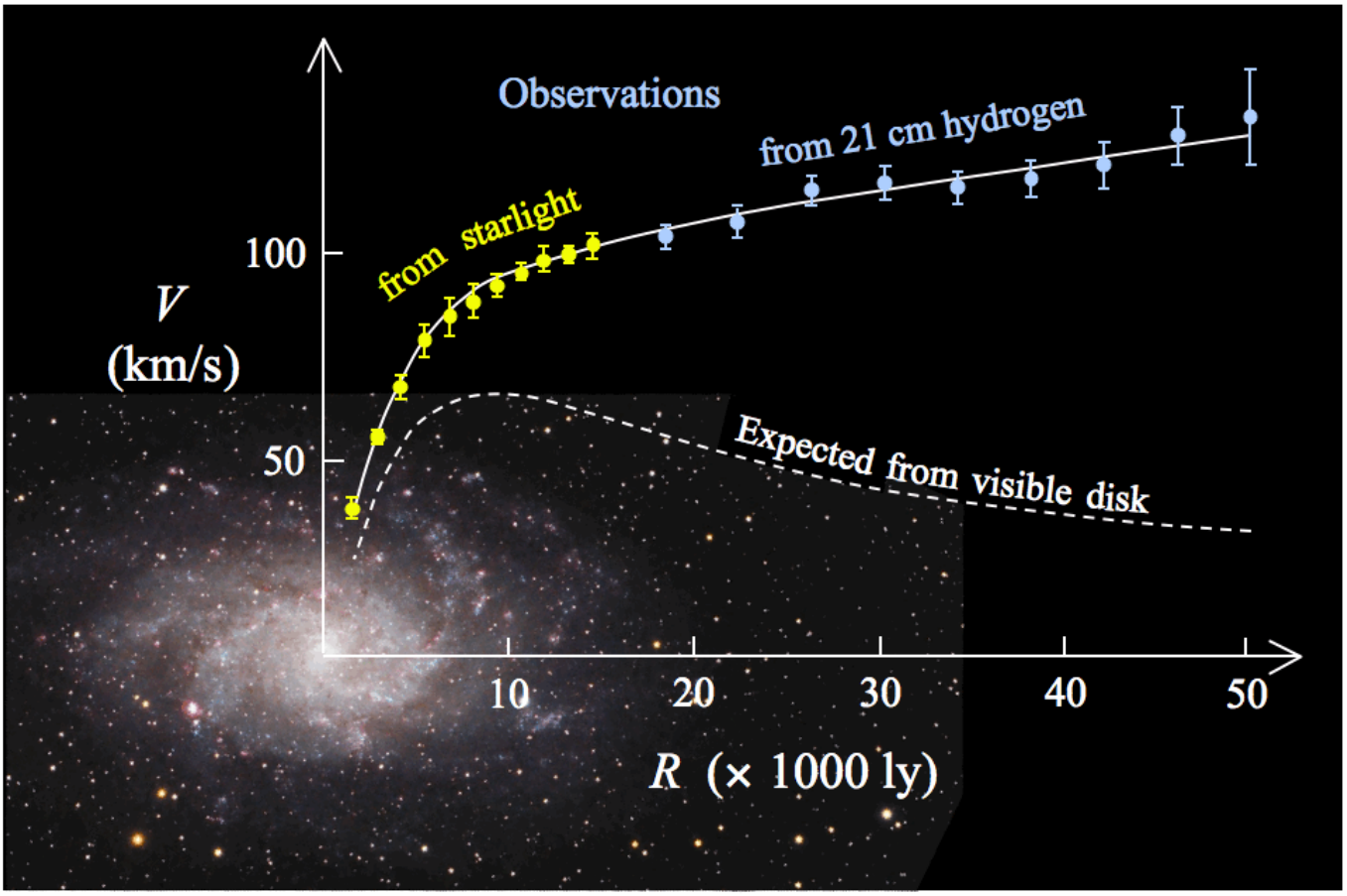
materie in het vizier tracht te krijgen.

Het mysterie rond deze beruchte substantie spreekt tot de verbeelding van iedereen die de kosmische wetten tot op het bot wil doorgronden, maar blijft ook twee jaar later onderzoekers nog steeds tot wanhoop drijven. In dit artikel wordt het verhaal rond donkere materie kort samengevat, en hebben we het vervolgens over een directe detectiemethode van de grootste kanshebber binnen de donkeremateriehypothese, de zogenaamde WIMP's. Het volgend luik van dit tweedelig stuk verschijnt over enkele weken. Daarin interview ik professor Patrick Decowski in verband met XENON, het indrukwekkende experiment waarmee hij hoopt WIMP's op te sporen.

En toch bewegen ze

In de loop van de twintigste eeuw zijn onze mogelijkheden om de kosmos te begluren in een hoog tempo talrijker en scherper geworden. Niet alleen verduidelijkte dit ons beeld van het universum, het bracht ook veel nieuwe en aartsmoeilijke problemen met zich mee.

Ons verhaal begint klassiek bij de historische waarneming van Vera Rubin (1928-2016). Deze uitzonderlijke Amerikaanse wetenschapster hield een catalogus bij van de snelheden waarmee sterren rond het centrum van hun melkwegstelsel cirkelden. Zo'n waarneming wil men natuurlijk aan een voorspelling koppelen, een daarvoor hebben we wat newtoniaanse mechanica nodig (zie deel 1 van het vierdelig donkeremateriedossier). De snelheid waarmee sterren (of andere ruimteobjecten) zich onder invloed van de zwaartekracht rond een centrum bewegen, hangt af van de totale massa van de astronomische objecten binnen een denkbeeldige bol. Deze bol heeft als middelpunt het centrum van het melkwegstelsel, en als straal de afstand tussen dat middelpunt en de positie van de cirkelende ster.



Afbeelding 2. Snelheden van sterren.Een voorbeeld van de galactische snelheden van sterren als functie van hun afstand tot het centrum (bovenste curve). De onderste curve duidt aan welke snelheden we verwachten op basis van bekende zwaartekrachttheorie en de waargenomen massa. Dat er een conflict is, staat buiten kijf. Afbeelding: Stefania de Luca.

Wetenschappers zijn best handig in het inschatten van de hoeveelheid en verdeling van massa in een melkwegstelsel, omdat ze het licht dat van die massa afkomstig is netjes kunnen observeren. Uit die verdeling van massa kunnen ze dan weer berekenen wat de snelheid zou moeten zijn van sterren als functie van hun afstand tot het galactisch centrum. Het probleem is nu dat die berekening helemaal niet overeenkomt met de snelheden die Rubin gemeten had! Hoe verder sterren verwijderd zijn van het middelpunt van hun melkwegstelsel, hoe trager ze volgens het klassieke model zouden moeten bewegen. De waarnemingen laten daarentegen zien dat sterren niet trager gaan bewegen, maar een bijna constante snelheid behouden. Dit conflict tussen theorie en waarneming was werkelijk een diep dilemma; een vraagstuk van astronomische proportie.

Zwak en zwaar

Na heel erg streng naar de data en de manier van observeren gekeken te hebben, was de sterrenkundige gemeenschap in een hoek gedreven. Dit probleem moest verklaard worden, gesteund door een samenhangende theorie. Twee verschillende denkpistes werden geopend. Een eerste mogelijkheid is dat de zwaartekracht op galactische schaal niet werkt zoals Newton en later Einstein het ons geleerd hebben, en dat de theorie daarvan aangepast moet worden. Op die manier zou de waargenomen massa wél de stersnelheden kunnen verklaren. Onder meer Erik Verlinde is voorvechter van dit idee.

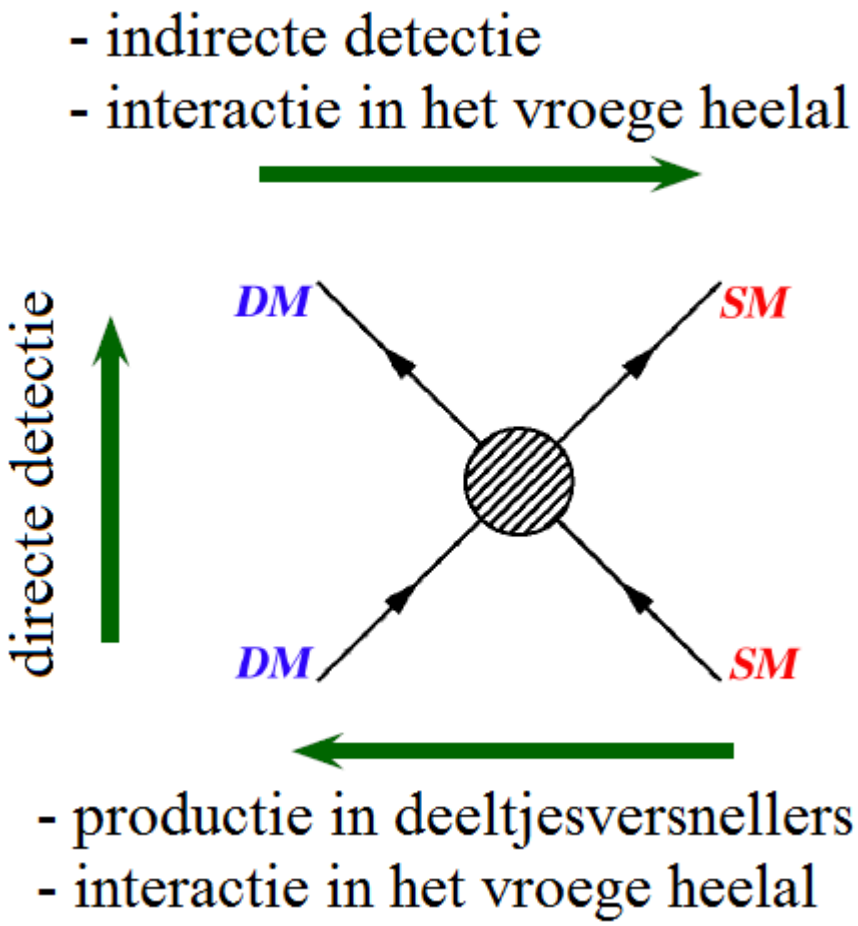
Een tweede mogelijkheid is dat onze wetten van de zwaartekracht wel correct zijn, maar dat er in de sterrenstelsels veel meer massa aanwezig is dan we konden waarnemen. Precies omdat die massa volgens deze laatste verklaring wel bestaat, maar niet zichtbaar (‘donker’) is, werd die ‘donkere materie’ gedoopt[1]. Het gaat overigens niet om twee-en-een-halve pond donkere materie: wel tachtig procent van alle materie in de kosmos zou donker moeten zijn!

Om redenen die in deel twee van het donkerematerieдossier vermeld zijn, is het merendeel van de natuurkundigen op dit moment overtuigd dat de sleutel tot het antwoord te vinden is bij de zogenaamde WIMP’s. Deze zwak wisselwerkende massieve deeltjes (WIMP staat voor *weakly interacting massive particle*) zijn precies wat de naam doet vermoeden. Het zijn deeltjes die heel zwak reageren met hun omgeving en vermoedelijk een grote massa hebben. Dat ze *zwak* reageren, is de aangenomen reden voor het feit dat we ze niet kunnen waarnemen. We nemen immers alleen objecten waar die een invloed op ons uitoefenen – uit het oog is uit het hart. Dat ze *massief* moeten zijn, is precies heel het idee achter de reden dat we donkere materie nodig hebben: WIMP’s moeten immers verantwoordelijk zijn voor tachtig procent van de gravitationele aantrekkingskracht op de sterren.

Waar is WIMP’y?

Allemaal goed en wel, maar *extraordinary claims require extraordinary evidence*. Hoewel voor het idee van WIMP’s wel het een en ander te zeggen is binnen de theoretische natuurkunde (google bijvoorbeeld “WIMP miracle”), kan een hypothese alleen gepromoveerd worden tot verklarend model als er experimenteel bewijs voor te vinden is. Van de drie wegen die de natuurkunde daarvoor heeft ingeslagen (zie deel drie van het

donkerematerieedossier), zou de zogenaamde *directe* methode het meest overtuigend bewijs geven.



Afbeelding 3. Manieren om donkere materie te meten.Een schematisch Feynmandiagram voor de drie mogelijke wijzen waarop een WIMP (DM) met een deeltje van het Standaard Model (SM) in interactie kan treden. Het diagram kan in drie richtingen gelezen worden (groene pijlen): van links naar rechts botst een DM-deeltje met een antideeltje en vormt een SM- deeltje en zijn antideeltje. Van rechts naar links gebeurt precies het omgekeerde. Directe detectie concentreert zich op de botsing van een WIMP en een SM-deeltje; je leest het diagram dan dus van onder naar boven (of van boven naar onder). Bron: Max-Planck-Gesellschaft.

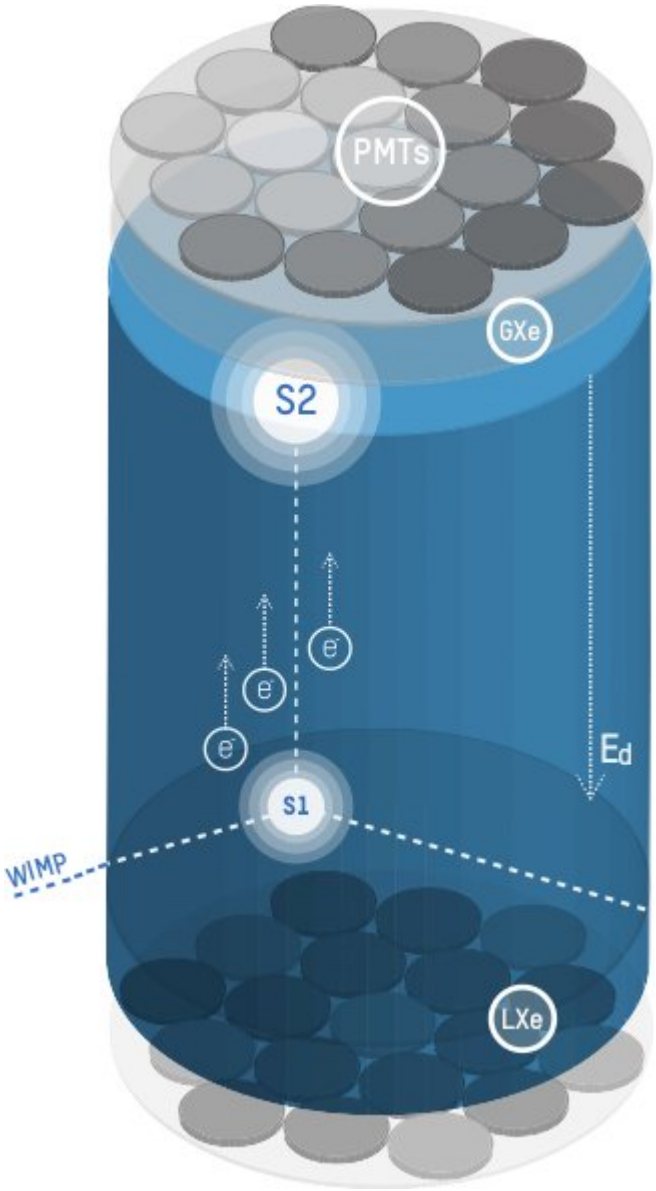
De methode van directe detectie steunt op de interactie van een WIMP met een deeltje van gewone materie (wat we een *standaardmodeldeeltje* noemen). Het Feynmandiagram dat de mogelijke interacties samenvat (zie afbeelding 3), moet je in dat geval dus van onder naar boven lezen. Intuïtief verwoord: er wordt aangenomen dat een WIMP in botsing komt met een bekend deeltje, waarna beide weer min of meer ongestoord hun bestaan voortzetten. Hoe zo'n interactie er op het niveau van de quantumveldentheorie uitziet, is een vraag die op dit

moment nog maar moeilijk op experimenteel niveau in beschouwing genomen kan worden, maar *dat* een WIMP heel af en toe via de zwakke kernkracht met een deeltje van het standaardmodel moet reageren, is de voorwaarde om ze ooit op deze manier te vinden. De volgende vraag is dan hoe zo'n botsing in de praktijk gedetecteerd wordt; dat is waar (onder meer) het XENON-experiment het podium betreedt.

Een verlichtende ontmoeting

Een grote tank met een grote hoeveelheid vloeibaar edelgas. Dat is de essentie van de proef die verlichting moet brengen in het debat rond donkere materie; het experiment in Gran Sasso, Italië, dat sinds het begin van de 21ste eeuw bekend staat als XENON. De tank is voor het merendeel gevuld met vloeibaar xenon, en voor een deel (in de bovenste laag) met xenon in gasvormige toestand. Het xenonvat, dat men een tijdsprojectiekamer (TPC) noemt, is in de nieuwste versie van het experiment bijna een kubieke meter groot. Als je weet dat xenon ruwweg een euro per gram kost, en de massadichtheid van vloeibare xenon bijna 3 gram per kubieke centimeter bedraagt, kom je algauw op een mooi kostenplaatje uit!

Interessanter dan de financiële kant is evenwel het principe achter de werking van de TPC. Bovenaan (en onderaan) de tank wordt een rooster van 128 fotomultiplicatoren (PMT's) aangelegd: instrumenten die zo gevoelig zijn voor licht, dat ze zelfs een enkel foton kunnen detecteren. Over heel de tank wordt een elektrisch veld aangelegd, zodat negatief geladen deeltjes naar boven (richting het gasvormig xenon) getrokken worden. Het enige wat dan nog ontbreekt, is een reactie in het volume; een botsing die een effect creëert dat de PMT's kunnen opvangen. Een dergelijke botsing is er (hopelijk) een tussen een WIMP en een xenonatoom. Ten eerste komt daarbij een ultraviolet foton vrij, geproduceerd bij een zogenaamd scintillatieproces. Dit foton wordt opgevangen in de PMT's en wordt het S1-signaal genoemd. Deze benaming doet vermoeden dat er nóg een signaal komt, en dat klopt: er komt immers ook een elektron vrij als gevolg van de WIMP-xenonbotsing. Dit elektron wordt onder invloed van het aangelegde elektrisch veld naar boven gedreven tot in het gasvormige xenon. Daar produceert het op zijn beurt, via een proces dat elektroluminescentie heet, een foton dat door de PMT's kan worden opgevangen. Dit signaal – je raadt het al – wordt het S2-signaal genoemd.



Afbeelding 4. Het XENON-experiment.Schematische voorstelling van de tijdsprojectiekamer (TPC). Het merendeel van de tank bevat vloeibaar xenon (LXe). Losgeslagen elektronen worden door het elektrisch veld (E_d) naar boven gedreven, tot bij het gasvormig xenon (GXe). Fotononen worden gedetecteerd in de fotomultiplicatoren (PMTs) die zich langs beide uiteinden van de tank bevinden. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker Gaudiman.

De grootste uitdaging voor de medewerkers bij XENON (en alle donkerematerie-experimenten) is om de apparaten zo gevoelig mogelijk te maken voor de enorm zeldzame WIMP-interacties, en de achtergrondruis zo veel mogelijk van het informatieve signaal te scheiden. Helaas zijn er immers een heleboel ‘normale’ reacties (zonder donkere materie) in het xenonvat die ook kunnen worden gedetecteerd door de fotomultiplicatoren. Gelukkig

onderscheidt het profiel van die onbruikbare detecties zich van wat we verwachten waar te nemen in het geval van WIMP-botsingen. In sommige gevallen is dat door de afwezigheid van het S2-signaal, in andere gevallen door een analyse van het tijdsverschil tussen S1 en S2, of de energie van het gedetecteerde foton. Zelfs dan nog is het vinden van die ene interessante reactie zoeken naar een naald in een hooiberg, maar dan met een blinddoek om en de handen op de rug gebonden. Daarom is het ook juist zo'n uitdaging!

Je faalt alleen als je stopt met proberen

De zoektocht naar de missende massa blijkt een van de zwaarste wetenschappelijke opgaven in de hedendaagse natuurkunde te zijn geworden. Veel onderzoekers zijn het er nu wel over eens dat de kans om donkere materie te identificeren het grootst is binnen de WIMP-hypothese, en niet met andere exotische theorieën als primordiale zwarte gaten of gemodificeerde newtoniaanse dynamica. Toch heeft geen enkel experiment al een positief resultaat kunnen leveren. In het tweede luik van dit artikel vragen we ons af waarom, en interview ik daarom Patrick Decowski, medewerker bij Nikhef en XENON. Ik laat hem vertellen over zijn eigen speurtocht naar donkere materie, over de resultaten die XENON reeds geboekt heeft, en over de toekomst van dit spannende gebied.

[1]*Noot van de redactie: in de oorspronkelijke versie van dit artikel stond vermeld dat de term 'donkere materie' in de jaren '30 bedacht zou zijn door astronoom Fritz Zwicky. Hoewel dit vaak gehoord wordt, en Zwicky natuurlijk wel veel onderzoek naar donkere materie heeft gedaan, was de term al eerder in gebruik: ook onderzoekers als Oort, Kapteyn en Jeans gebruikten de term al, en zelfs Henri Poincaré sprak in 1906 al over 'dark matter'. Wie meer wil weten over de geschiedenis van het onderzoek naar donkere materie verwijzen we graag naar het uitgebreide artikel van Gianfranco Bertone en Dan Hooper over dit onderwerp. Zie daarnaast ook dit en dit artikel. Met dank aan Tristan du Pree, die ons op de bovenstaande onzorgvuldigheid wees.*