Zoeken naar lichte donkere materie

De speurtocht naar de donkere materie die het heelal lijkt te vullen, maar die we alleen maar kunnen ‘zien’ door de zwaartekracht die het uitoefent, gaat onverminderd voort. Joran Angevaare bespreekt hoe onderzoekers proberen de reikwijdte van de experimenten te vergroten door slim gebruik te maken van het zogeheten Migdal-effect.



Afbeelding 1. De Melkweg.We zien enorm veel sterren aan de hemel – maar is er meer materie dan dat? Foto: Sean Maxwell.

Als je op een heldere avond naar de sterren kijkt, kan het best een intimiderende gedachte zijn als je je realiseert hoe veel sterren er zijn. Die gedachte wordt nog eens versterkt als het zo helder is dat je bijvoorbeeld de Melkweg kan zien, en als je vervolgens bedenkt dat

telescopen nog zo ongelooflijk veel verder kunnen kijken. Hoe hard je het echter ook probeert, zelfs als je de allerkrachtigste telescoop ooit zou bouwen, die helemaal kan terugkijken tot de geboorte van het universum – zo'n 13.6 miljard lichtjaar ver – zou je hooguit een zevende van de totale massa van het heelal kunnen zien. De andere grofweg 85% van de massa is namelijk onzichtbaar. Deze mysterieuze, onzichtbare massa wordt ook wel *donkere materie* genoemd. Maar liefst 6/7^{e} van de massa van het universum zou dus moeten bestaan uit deze 'donkere materie' – zie bijvoorbeeld ook dit, dit of dit eerdere artikel op deze site.

Als we naar het universum kijken, zien we vooral op grote schaal de effecten van deze onbekende vorm van materie. Op aarde hebben we donkere materie echter nog nooit direct kunnen meten, terwijl er toch veel aanwijzingen zijn dat er ook hier donkere materie zou moeten zijn. Het is natuurlijk ook erg moeilijk om iets te detecteren als je het niet kan zien. Er zijn echter wel veel experimenten bezig om donkere materie te vinden! Van versnellerexperimenten bij de Large Hadron Collider op het CERN, zoals Atlas en CMS, tot speciale donkerematerie-experimenten zoals XENON1T.

Er is nog nooit donkere materie direct gemeten, en daarmee is het nog niet duidelijk hoe donkere materie er precies uit zal zien. Vandaar dat er verschillende modellen bestaan die de juiste beschrijving zouden kunnen geven. Met XENON1T wordt vooral gezocht naar donkere materie in de vorm van zwak wisselwerkende massieve deeltjes, oftewel WIMPs (vanwege de Engelse naam Weakly interacting Massive Particles), zoals uitgebreider beschreven in een eerder artikel. Nu een detectie van WIMPs uitblijft, rijst bij veel natuurkundigen echter de vraag of we op de juiste manier zoeken naar donkere materie. Voor een ander model zou men immers een ander signaal voorspellen waarnaar gezocht wordt. Hoewel het WIMP-model theoretisch goed gemotiveerd is, zijn wetenschappers ook druk bezig met het zoeken naar andere mogelijke modellen voor wat donkere materie zou kunnen zijn. Zo zijn er de laatste jaren veel modellen ontwikkeld waarin de massa van een donkerematerieedeeltje helemaal niet zo groot is maar juist (relatief) klein vergeleken met de massa van een WIMP. Het zou zomaar kunnen dat donkere materie het best wordt beschreven door zo'n model van lichte donkere materie (LDM).

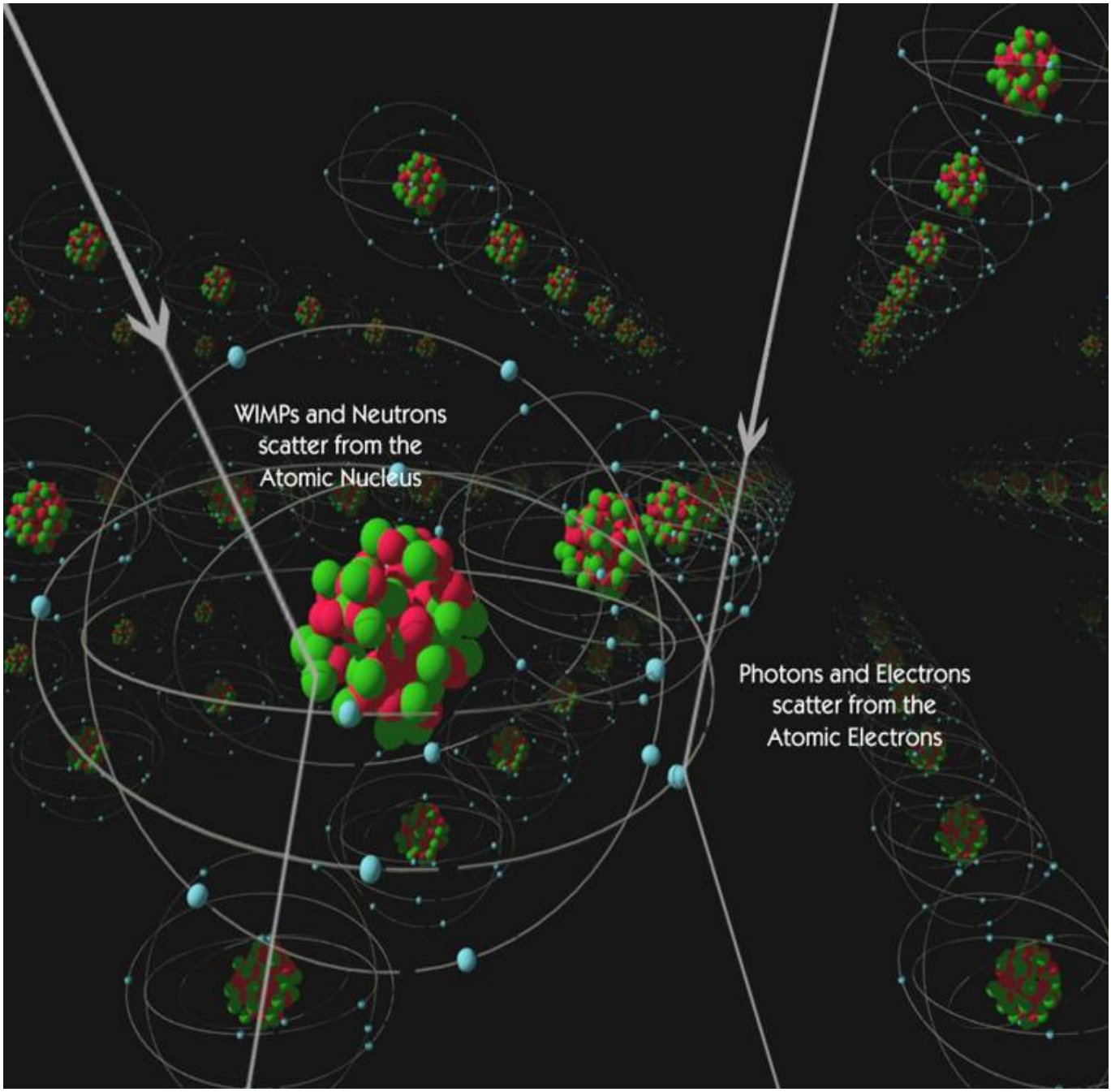
Ik zal in dit artikel uitleggen hoe men met XENON1T probeert donkere materie te meten die wordt beschreven door het WIMP-model of juist door een model van lichte donkere materie.

Er is echter een probleem als we met XENON1T proberen deze lichte vorm van donkere materie te meten. Voordat we kunnen begrijpen wat dat probleem precies is, moeten we eerst bekijken hoe we normaalgesproken de (zware) WIMPs proberen te meten.

Hoe detecteren we WIMPs?

Het detectiemechanisme van XENON1T is al kort uitgelegd in dit artikel. We gebruiken een heel groot[1] vat, voornamelijk gevuld met vloeibaar xenon, een zwaar edelgas. Dit vat staat opgesteld in een tunnel in het Gran Sasso-massief in Italië, zo'n twee uur rijden van Rome. Doordat XENON1T in deze tunnel staat, wordt het experiment door de berg afgeschermd van kosmische straling en andere deeltjes die het meten van donkere materie zouden kunnen verstoren. WIMPs zouden echter zo zelden botsen dat ze zonder problemen door de berg zouden dringen en in de detector een botsing met het xenon kunnen maken die te detecteren is.

Een botsing van een WIMP met een xenonatoom zou bovendien anders verlopen dan een botsing van 'normale' materie met zo'n atoom. Dit is schematisch weergegeven in afbeelding 1. Bij een botsing van normale materie zullen deeltjes botsen met de elektronen die om de xenonatoomkern bewegen[2]. Zo botsen elektronen, lichtdeeltjes (fotonen) en andere atomen dus niet met de xenonatoomkern zelf. Het WIMP-deeltje daarentegen kan doordringen tot de atoomkern van xenon. Van dit verschil maken we gebruik in onze zoektocht naar WIMPs. We kunnen namelijk onderscheid maken tussen botsingen van een deeltje met elektronen (bijvoorbeeld na een radioactief verval in de detector) en een botsing tussen een deeltje en de atoomkern (misschien wel een WIMP?). Dit komt voornamelijk door het verschil in hoe een elektron en een atoomkern energie verliezen na zo'n botsing. Om precies te zijn, voor wie het vorige artikel nog vers in het geheugen heeft: atoomkernen zorgen na een botsing voor een relatief klein 'S2-signaal' vergeleken met een gebotst elektron. Door heel nauwkeurig te kijken of er een botsing met een atoomkern is geweest, kunnen we iets zeggen over de waarschijnlijkheid dat we WIMP-botsingen hebben gezien.



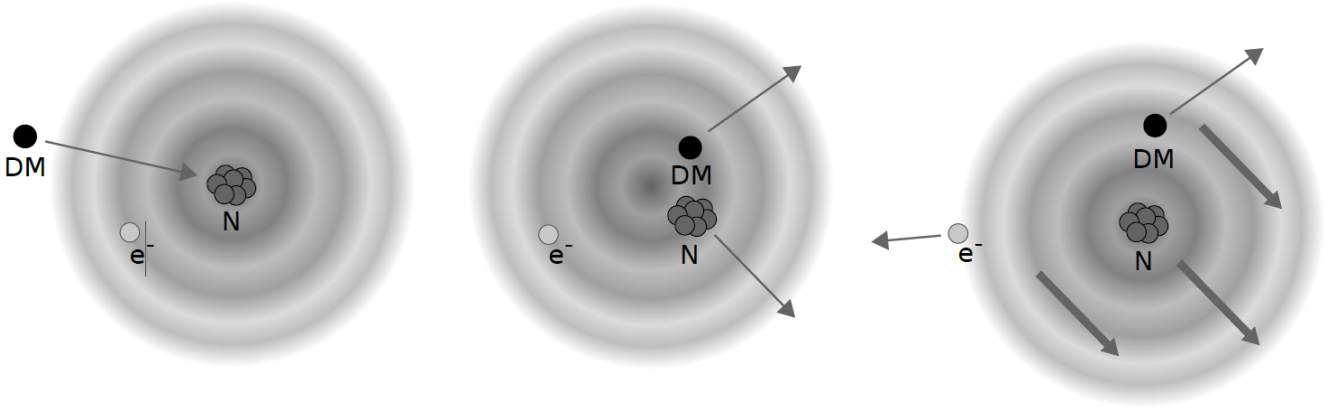
Afbeelding 2. Botsingen met xenon.Een *artist impression* van mogelijke interacties met een xenonatoom. Fotonen (lichtdeeltjes) en elektronen botsen ('scatter') met de atomaire elektronen van xenon zoals met de pijlen rechts is aangegeven. Daarentegen kan donkere materie (bijvoorbeeld WIMPs of lichte donkere materie) botsen met de atoomkern van xenon zelf (zoals links aangegeven). Doordat deze botsingen verschillen, kunnen we de twee scenario's (linker pijlen of rechter pijlen) van elkaar onderscheiden. Afbeelding van het CDMS experiment.

En lichte donkere materie?

Als we op dezelfde manier naar lichte donkere materie zoeken, stuiten we bij heel kleine massa's op het probleem. Wanneer het lichte donkerematerieedeeltje tegen een (zwaar) xenonatoom aanbotst, wordt er maar weinig energie overgedragen, net zoals je met een pingpongbal lastig een basketbal in beweging krijgt. Wat er op dat moment gebeurt, is dat de energie die wordt overgedragen aan de xenonatoomkern vrij snel wordt omgezet in warmte – denk aan de basketbal die door de wrijving met de vloer niet van zijn plaats komt. Deze warmte kunnen we echter niet meten; we weten dus niet dat er een botsing is geweest tussen een donkerematerieedeeltje en een xenonatoomkern! Vandaar dat – zoals we straks zullen zien – bij afbeelding 5 de limiet (zwarte lijn) voor massa's[3] lager dan een paar GeV/c^2 'door het plafond schiet'. Bij donkerematerimassa's lichter dan ongeveer 5 GeV/c^2 zal de botsing tussen de donkere materie en de atoomkern niet meer direct te meten zijn. Hoe dan wel?

Het Migdal-effect

De oplossing zou wel eens kunnen liggen bij het Migdal-effect, vernoemd naar de Russische wetenschapper Arkady Migdal die al tientallen jaren geleden in de USSR een theorie ontwikkelde die kan helpen bij de ontdekking van lichte donkere materie. Afgelopen jaren zijn Migdals ideeën "herontdekt" en toegepast op de zoektocht naar donkere materie. Afbeelding 3 laat zien hoe het Migdal-effect eruit zou zien voor een botsing van donkere materie (DM) met een atoomkern (N) omgeven door een wolk van elektronen (e^-). Wanneer een donkerematerieedeeltje botst met een atoomkern zou deze kern een klein zetje krijgen ten opzichte van de elektronen die om de atoomkern heen draaien. Hierdoor is de atoomkern voor een korte tijd verplaatst ten opzichte van de elektronen. Wanneer de elektronen vervolgens weer "aansluiten" bij de atoomkern, kan een van de elektronen worden uitgezonden (ionisatie) of naar een aangeslagen toestand verplaatsen (excitatie). Wanneer het atoom vervolgens weer terugvalt naar de grondtoestand leidt dit tot een signaal van heel specifieke energie.



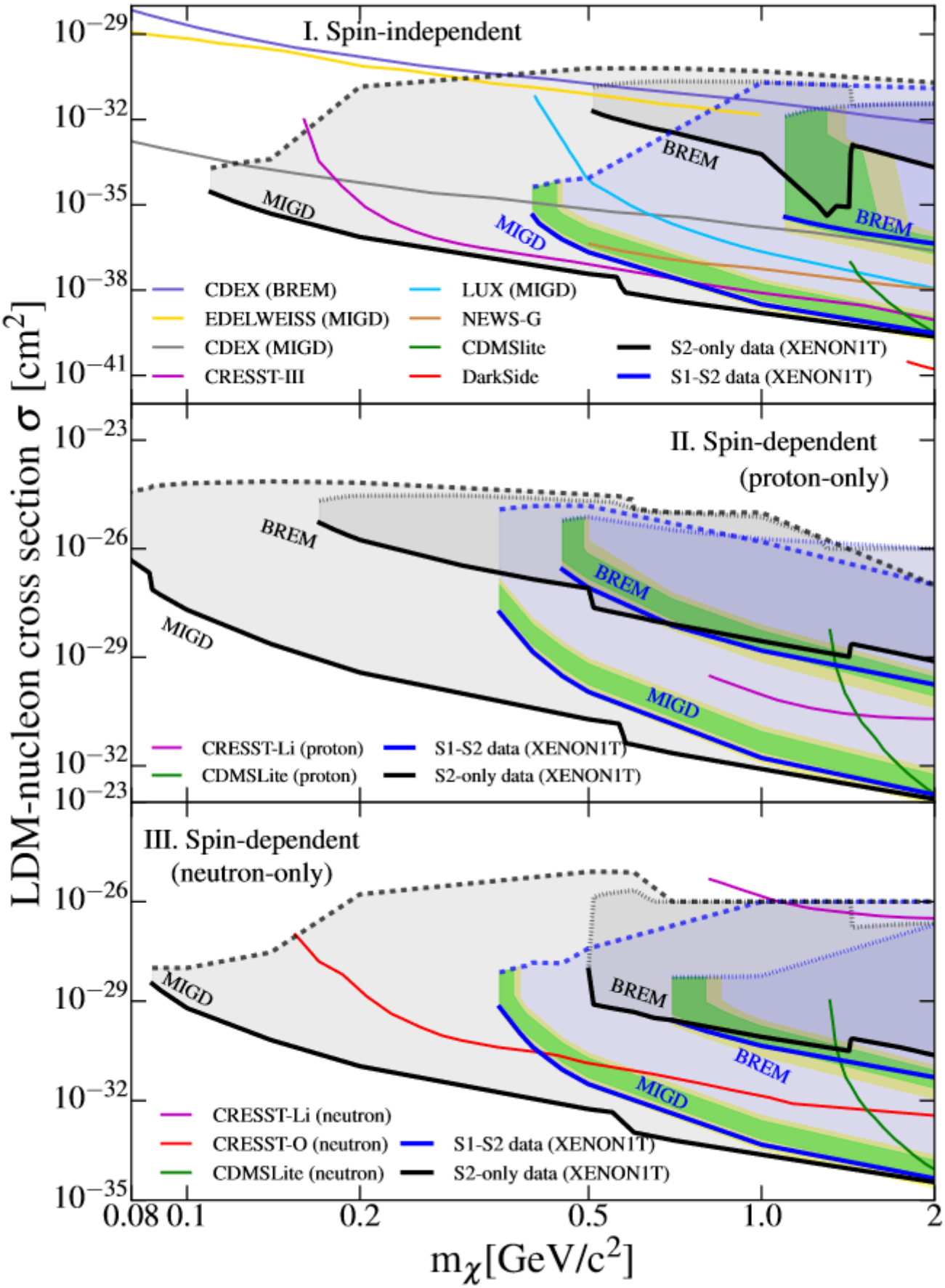
Afbeelding 3. Het Migdal-effect.Schematische weergave van het Migdal-effect. De stappen in de botsing worden weergegeven van links naar rechts. Links: een donkermateriedeeltje (DM) passeert de elektronen (e^-) die om de xenonatoomkern draaien en botst met die atoomkern (N). Midden: na deze botsing is de atoomkern verplaatst ten opzichte van de elektronen. Rechts: als vervolgens de elektronen weer "aansluiten" bij de atoomkern kan een van de elektronen worden uitgezonden (ionisatie) of naar een aangeslagen toestand verplaatsen (excitatie). Wanneer het atoom weer terugvalt naar de grondtoestand leidt dit tot een signaal van heel specifieke energie. Afbeelding uit arXiv:1711.09906.

Hoewel de botsing van de donkere materie plaatsvindt met de atoomkern, wordt via het Migdal-effect de energie dus uitgezonden door het energieverlies van een elektron! Voor het meten van de energie van een elektron is de drempel veel lager, omdat een elektron veel minder snel energie in de vorm van warmte zal verliezen dan een atoomkern. Zo is XENON1T alsnog in staat om modellen van donkere materie met lage massa's te testen.

Is donkere materie nu wel ontdekt?

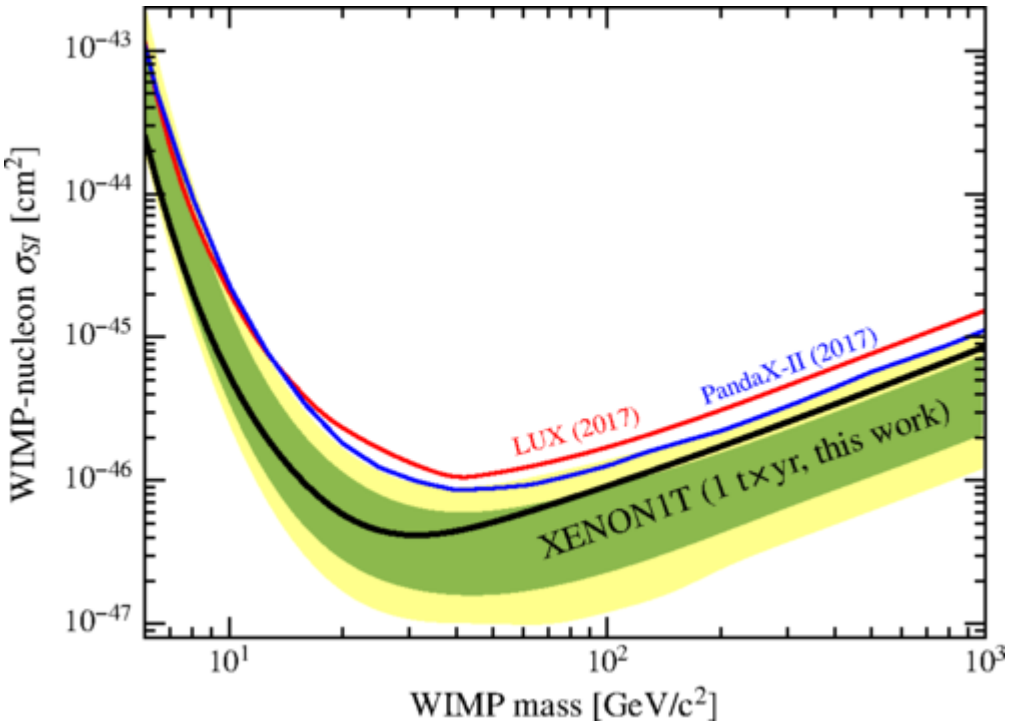
Helaas is donkere materie (nog) niet gevonden via het Migdal-effect. Hiermee ontstaat echter wel een nieuwe mogelijkheid om dat in de toekomst wel te doen. Waar XENON1T naar WIMPs met massa's tussen ongeveer 5 GeV/c^2 en 1000 GeV/c^2 zoekt, kunnen we door het Migdal-effect modellen van deeltjes met veel lichtere massa's tussen de 0,1 GeV/c^2 en 2 GeV/c^2 testen met de data van XENON1T, maar liefst twee ordes van grootte lager dan voor WIMP-modellen! Omdat er zoals gezegd nog geen metingen zijn die erop duiden dat we met XENON1T een signaal hebben gevonden, kunnen we natuurlijk nog geen ontdekking claimen. Wel kunnen we aan de hand van deze metingen laten zien welke donkeremateriemodellen

we al kunnen uitsluiten omdat we – als die juist zouden zijn – al iets gemeten zouden moeten hebben. In afbeelding 4 zien we van welke massa's en werkzame doorsnedes[4] we nu weten dat zulke donkere materie is uitgesloten.


I. Spin-independent
II. Spin-dependent
(proton-only)
III. Spin-dependent
(neutron-only)
LDM-nucleon cross section σ [cm²]
m_χ[GeV/c²]
CDEX (BREM)
EDELWEISS (MIGD)
CDEX (MIGD)
CRESST-III
LUX (MIGD)
NEWS-G
CDMSlite
DarkSide
S2-only data (XENON1T)
S1-S2 data (XENON1T)
CRESST-Li (proton)
CDMSLite (proton)
CRESST-Li (neutron)
CRESST-O (neutron)
CDMSLite (neutron)
BREM
MIGD

Afbeelding 4. Uitgesloten modellen.Limieten voor lichte donkere materie (LDM) onderzocht via het Migdal-effect ('MIGD') en Bremsstrahlung ('BREM') voor verschillende soorten interactie tussen donkere en gewone materie (panelen I-III). Zolang we geen metingen hebben die wijzen op het bestaan van donkere materie, zijn de resultaten van XENON1T erop gericht om te laten zien wat voor soort modellen van donkere materie zijn uitgesloten door onze resultaten. Als we kijken naar paneel I zijn bijvoorbeeld de massa's en werkzame doorsnedes (σ) die liggen tussen de zwarte lijn ('S2-only') en de zwarte stippellijn uitgesloten. Hetzelfde geldt voor de blauwe (stippel)lijnen, die ook volgen uit onze resultaten na een totaal ander soort analyse ('S1-S2'). Verder zijn er meerdere gekleurde lijnen gebruikt om de resultaten van andere experimenten aan te geven. Alles wat zich boven een van deze lijnen bevindt, is uitgesloten door het experiment dat bij die lijn hoort. De verschillende panelen (I-III) geven aan wat voor soort interactie er tussen de donkere materie en de xenonatoomkern is aangenomen. Hierbij is de interactie in paneel I spin-onafhankelijk (SI), en is in panelen II en III de interactie spin-afhankelijk (SD) voor de gevallen waarin de donkere materie een interactie aangaat met alleen de protonen (paneel II) of alleen de neutronen (paneel III) van de xenonatoomkern. Afbeelding uit arXiv:1907.12771.

Hierbij valt overigens op te merken dat we hier niet alleen geheel andere massa's aan het uitsluiten zijn dan in de zoektocht naar WIMPS – zie afbeelding 5 hieronder – maar ook geheel andere werkzame doorsnedes. Als je die afbeelding namelijk met afbeelding 4 hierboven vergelijkt, valt het op dat er minstens een schaalfactor van een miljoen tussen de verticale assen zit. Dit komt omdat het Migdal-effect een relatief zeldzaam proces is: niet alle botsingen van donkere materie met een xenonatoomkern zouden een meetbaar Migdal-signaal veroorzaken. Hierdoor kunnen we kleinere werkzame doorsnedes (dus een lage kans op een botsing) niet uitsluiten voor lichte donkerematerie massa's. Zo is het bijvoorbeeld nog best mogelijk dat donkere materie een massa heeft van 0,2 GeV/c^2 en een werkzame doorsnede van 10^{-41} cm^2 – de linker benedenhoek van elke van de panelen in afbeelding 4.



Afbeelding 5: Uitgesloten WIMP-modellen.Limieten voor WIMPs. Hierbij is een spin-onafhankelijke (SI) interactie tussen de donkere materie en de xenonatoomkern aangenomen. Net als in afbeelding 3 zijn alle donkeremateriemodellen boven de zwarte lijn door XENON1T uitgesloten en geven de blauwe en rode lijn limieten van andere experimenten weer. Bij lage massa's worden er alleen grote werkzame doorsnedes uitgesloten. Dit komt doordat er – zoals uitgelegd in het begin van dit artikel – een drempel bestaat voor het direct meten van botsingen van WIMPs met de atoomkern van xenon. Deze (bewerkte) afbeelding komt oorspronkelijk uit PhysRevLett.121.111302.

Bovendien laat afbeelding 4 iets zien wat meestal niet wordt getoond bij dergelijke limieten, namelijk een bovengrens (de stippellijnen in afbeelding 4). Normaal gesproken gaat het in plots als deze om zulke kleine werkzame doorsnedes dat zulke donkere materie ongehinderd door de berg heengaat waarin het experiment is opgesteld. Bij het Migdal-effect gaat het echter over zo veel ordes grotere werkzame doorsnedes dat op een bepaald moment alle donkere materie al gestopt wordt door de berg voordat de materie de detector kan bereiken. Als donkere materie een zo grote werkzame doorsnede heeft, kan XENON1T het dus niet vinden, juist doordat XENON1T geplaatst is in de berg om ons af te schermen van andere deeltjes uit het universum! Er zijn wel al andere experimenten (zoals weergegeven door de gekleurde lijnen in afbeelding 4) die gevoelig zijn voor zulke grote werkzame doorsnedes bij zulke lage donkeremateriemassa's.

Hoewel we ook via het Migdal-effect nog geen donkere materie hebben gevonden, opent het dus wel de mogelijkheid om totaal andere modellen van zulke materie te testen. Vooral als donkere materie een kleine massa heeft zouden we het dus, dankzij het Migdal-effect, in de toekomst misschien kunnen meten. We zullen zien wat de natuur voor ons in petto heeft!

---

[1] De “1T” in XENON1T staat voor 1 ton aan vloeibare xenon in het centrum van dit vat dat we gebruiken om te kijken naar (mogelijke) donkerematerie-interacties.

[2] Er is hierop een uitzondering. Neutronen zijn namelijk niet geladen en zouden ook met de xenonatoomkern kunnen botsen. Dit is dan ook een belangrijke storende achtergrond voor XENON1T. Gelukkig komen losvliegende neutronen bijna niet voor in de detector.

[3] In de deeltjesfysica wordt massa meestal gemeten door een energie (hier in giga-elektronvolt) te delen door het kwadraat van de lichtsnelheid – precies volgens Einsteins beroemde formule $E=mc^2$.

[4] De werkzame doorsnede is een maat voor hoe groot de waarschijnlijkheid is dat een deeltje een bepaalde interactie (botsing) aangaat. Het is te vergelijken met de grote van een paraplu: hoe groter het oppervlak, hoe groter de kans is dat je regen opvangt. De werkzame doorsnede wordt dan ook gemeten als oppervlakte in .