Universiteit
Leiden
The Netherlands

Constraining Properties of Dark Matter particles Using Astrophysical Data

Iakubovskyi, D.

Citation

Iakubovskyi, D. (2013, February 13). *Constraining Properties of Dark Matter particles Using Astrophysical Data*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/20523

Version:	Not Applicable (or Unknown)
License:	Leiden University Non-exclusive license
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/20523

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

The handle http://hdl.handle.net/1887/20523 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Iakubovskyi, Dmytro
Title: Constraining properties of dark matter particles using astrophysical data
Issue Date: 2013-02-13

Samenvatting

De aard van donkere materie is een van de meest intrigerende vragen van de moderne natuurkunde. Deze materie speelt niet alleen een cruciale rol in ons begrip van de oorsprong en de evolutie van het heelal, maar het begrip hiervan zal ook een uitgesproken invloed hebben op de ontwikkeling van de deeltjesfysica. In feite bevat het Standaard Model van de elementaire deeltjes geen geschikte kandidaat voor donkere materie. Door de parameterruimte van donkere-materie deeltjes via onderzoek af te bakenen kan men onderscheid maken tussen de verschillende mogelijke uitbreidingen van het Standaard Model om zo meer te leren over de fundamentele eigenschappen van materie.

Experimenteel gezien is er weinig bekend over de eigenschappen van donkere-materie deeltjes, zoals hun massa, de sterkte van hun interacties, en het oorspronkelijke spectrum van hun snelheden. Als men bijvoorbeeld uitgaat van een specifieke interactie sterkte en een bepaald interactie type, dan is het mogelijk om de productiesnelheid te bepalen van donkere-materie deeltjes in het vroege heelal en daarmee ook hun massa. In plaats daarvan analyseren wij in dit proefschrift model-onafhankelijke grenzen aan de mogelijke massa van donkere-materie deeltjes die afgeleid worden uit astrofysische waarnemingen. Daarnaast wordt vaak verondersteld dat donkere-materie deeltjes absoluut stabiel zijn. Hun stabiliteit wordt beschermd door een symmetrie die vaak specifiek voor dit doel is ingesteld. Deze aanname wordt in dit proefschrift niet gemaakt en *we voeren een systematisch model-onafhankelijke programma uit om de beperkingen aan de mogelijke levensduur en vervalsnelheid van donkere materie deeltjes te bepalen*. Dit wordt gedaan door te zoeken naar de karakteristieke signalen van verval van donkere materie deeltjes. De verkregen resultaten worden vervolgens toegepast op een goed gemotiveerd model van deeltjesfysica: een minimale uitbrei-

ding van het Standaard Model met drie rechtshandige neutrino's. Dit model biedt een toetsbare verklaring van zowel donkere materie als de materie-antimaterie asymmetrie in het waargenomen Universum, en van de gemeten massa's van neutrino's. De beschikbare ruimte die de parameters in dit model kunnen bestrijken – en die aan alle zijden begrensd is – wordt gebruikt als referentie voor onze model-onafhankelijke zoektocht.

Het proefschrift is als volgt opgebouwd:

I. *Bepaling van de ondergrens van de massa van donkere-materie deeltjes* en het energie bereik van mogelijke zoektochten. Als donkere materie bestaat uit fermionen, kan zijn faseruimte dichtheid niet groter zijn dan die van een ontaard Fermi gas. (Deze beperking kan verder worden aangescherpt door toepassing van de stelling van Liouville). We hebben de bestaande theoretische benaderingen herzien en een nieuwe methode ontwikkeld die het mogelijk maakt om sterke maar robuuste grenzen af te leiden voor de massa van donkere-materie deeltjes. Door de experimentele gegevens te analyseren van objecten met de grootste donkere-materie faseruimtedichtheid – bolvormige dwergsterrenstelsels – wordt aangetoond dat de massa van het donkere materie fermion groter moet zijn dan ~ 0.4 keV, en daarmee ook dat het vervalsignaal van de donkere materie moet worden gezocht in het Röntgen /γ-ray energie bereik. Omdat de vervalsnelheid snel toeneemt met de massa van het deeltje, geniet het Röntgen bereik de voorkeur bij de zoektocht naar vervallende fermionische donkere materie.

II. *Studie naar donkere materie kolomdichtheid in verschillende soorten donkere materie halo's.* Door het analyseren van de verdeling van donkere materie in enkele honderden objecten van verschillende schaal (dwerg-, spiraal-, en elliptische sterrenstelsels, groepen van sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels) die gedomineerd worden door donkere materie, wordt aangetoond dat het verwachte signaal van het verval van donkere materie langzaam toeneemt met de massa van het object. Wij tonen aan dat de gemiddelde centrale donkere-materie kolomdichtheid, welke het verwachte signaal definieert, een universele schalingsrelatie volgt als functie van de totale massa van de halo. De helling van deze afhankelijkheid verschilt tussen geïsoleerde halo's en sub-halo's. Op de beschikbare schalen vallen zowel de schalingsrelaties als de spreiding rond deze relaties heel precies samen met de voorspellingen gedaan door "N-body" simulaties die gebaseerd zijn op het koude donkere materie model.

III. *Identificatie van de beste observationele studie objecten.* Ondanks het feit dat clusters van sterrenstelsels het sterkste donkere-materie vervalsignaal zouden leveren, wordt dit voordeel ten opzichte van kleinere objecten teniet gedaan door hun zeer sterke Röntgen straling. Dit maakt de verwachte signaal-ruisverhouding voor clusters niet optimaal. De beste studie objecten zijn dus dwerg en spiraalstelsels. Het verwachte vervalsignaal van deze objecten varieert maar een halve orde van grootte. Daarom (i) heeft men vrijheid bij het kiezen van de waar te nemen stelsels om ingewikkelde astrofysische achtergronden te vermijden; (ii) is het mogelijk om, indien een spectraallijn als kandidaat voor een vervalsignaal wordt gevonden, de intensiteit hiervan te vergelijken tussen verschillende objecten met een vergelijkbaar verwacht signaal. Dit maakt het mogelijk om *eenduidig* onderscheid te maken tussen het vervalsignaal van donkere materie en het signaal van mogelijke astrofysische of instrumentale achtergronden. Deze werkwijze wordt geïllustreerd met het controleren van een recente claim dat een spectraallijn in een *Chandra* waarneming van een van de satellieten van de Melkweg zou kunnen worden geïnterpreteerd als een vervalsignaal van donkere materie. Ons werk toont aan dat een dergelijke interpretatie met een hoge mate van waarschijnlijkheid kan worden uitgesloten op basis van oude waarnemingen van het Andromeda sterrenstelsel en de Fornax/Sculptor bolvormige dwergsterrenstelsels.

IV. *Gecombineerde analyse van een groot aantal Röntgen waarnemingen.*

We hebben de spectra geanalyseerd van een aantal nabijgelegen objecten die zijn waargenomen door de *XMM-Newton* telescoop; door de ontwikkelde methodologie toe te passen, hebben we de sterkst begrenzingen kunnen vast leggen voor donkere-materie deeltjes met een massa van de orde van grootte van 1 keV. Om de begrenzingen nog scherper te definieren en om de regimes van deeltjesfysica modellen die vanuit een theoretisch perspectief interessant zijn, te onderzoeken, zijn waarnemingen met een lange integratietijd vereist van objecten die gedomineerd worden door donkere materie. Omdat deze aanpak duur is, hebben we een gecombineerde analyse uitgevoerd op een zeer grote dataset van archiefmateriaal van waarnemingen van sterrenstelsels door *XMM-Newton*. De extreem grote gecombineerde integratietijd van deze dataset (twee ordes van grootte langer dan van een typische enkele waarneming) vereist een zeer goede beheersing van systematische fouten en de instrumentele achtergronden, en laat het niet toe om standaard

data-analyse technieken te gebruiken. Ten einde deze problemen het hoofd te bieden, is een nieuwe datareductie methode ontwikkeld. Hiermee werden verschillende nieuwe smalle spectraallijnen als kandidaten gevonden in het 2.5–11 keV bereik. Na een zorgvuldige analyse zijn al deze kandidaten geclassificeerd als zwakke instrumentale lijnen die niet eerder zijn waargenomen. Tenslotte leiden we nieuwe grenzen af voor de vervallende donkere materie parameters. Deze grenzen laten echter nog een groot deel van de parameterruimte van de interessante deeltjesfysica modellen onaangeroerd.

V. Om de gevoeligheid voor de spectraallijn van vervallende donkere materie te verbeteren en om de gehele beschikbare parameter ruimte voor minimale modellen van vervallende donkere materie af te tasten, dient de energieresolutie van een Röntgen telescoop vergelijkbaar te zijn met de intrinsieke breedte van de spectraallijn van de vervallende donkere materie. Dit betekent dat een verbetering van ten minste een orde van grootte ten opzichte van de bestaande Röntgen missies noodzakelijk is. Wij bespreken de mogelijkheid om gebruik te maken van microcalorimeters met een gezichtsveld van $\sim$ 10 graden en de vooruitzichten van toekomstige geplande en voorgestelde missies.