



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Hunting dark matter with X-rays

Franse, J.

Citation

Franse, J. (2016, December 20). *Hunting dark matter with X-rays. Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/45082>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/45082>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/45082> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Franse, J.

Title: Hunting dark matter with X-rays

Issue Date: 2016-12-20

7 | NEDERLANDSE SAMENVATTING

7.1 Introductie

Het concept Donkere Materie bestaat al sinds de jaren '30, toen Fritz Zwicky de naam voor het eerst bezigde bij wijze van beschrijving voor ontbrekende massa. Uit zijn observaties van het cluster van sterrenstelsels Coma bleek dat de snelheden van de individuele stelsels niet verklaard konden worden met de hoeveelheid zichtbare normale materie. De algemene acceptatie van het fenomeen heeft lang geduurd, maar het werkt van Vera Rubin en anderen heeft in de jaren '80 de argumenten van Zwicky kracht bijgezet door hetzelfde effect aan te tonen in de rotatiecurves van spiraalstelsels. Tegenwoordig is de Donkere Materie een essentieel onderdeel van het standaard model van de kosmologie. Dit model is in staat om de evolutie en de inhoud van het universum succesvol te beschrijven aan de hand van slechts een gering aantal ingrediënten. Naast de bekende materie en de Donkere Materie, bevat het Universum ook Donkere Energie die ervoor zorgt dat het universum (versneld) uitdijt. Over de ware natuur of oorsprong van deze component tast men tot op heden nog in het complete duister. Daarnaast bevat het standaardmodel een beschrijving van de eerste momenten in het bestaan van het heelal, de begincondities. Al deze ingrediënten zijn afgeleid uit het geheel van waarnemingen en vertegenwoordigen niet alleen een goede beschrijving van het heelal, maar ook het enige zelf-consistente model dat op het moment bestaat. Dat alles wil niet zeggen dat het standaard model van de kosmologie niet zijn eigen mysteries heeft. De gewone materie maakt slechts 5% van de inhoud van het Universum uit. De rest komt voor de rekening van de Donkere Energie (70%) en de Donkere Materie (25%). Van geen van beide donkere componenten is bekend wat de ware natuur is. Dit proefschrift gaat over de vraag waar de Donkere Materie uit bestaat.

Er zijn veel verschillende onafhankelijke metingen te verrichten die allemaal aangeven dat er een grote hoeveelheid massa ontbreekt in het heelal in het algemeen en in verschillende individuele objecten. Niet alleen dat, maar elk van deze experimenten wijst op eenzelfde hoeveelheid Donkere Materie. De bewijzen voor het bestaan van Donkere Materie bevatten tegelijkertijd ook aanwijzingen over de eigenschappen van de Donkere Materie. Een van de meest directe en sterkste argumenten is te vinden in waarnemingen van de kosmische microgolf achtergrond straling (ook wel afgekort tot CMB in het En-

gels). Dit is de straling die is vrijgekomen op het moment dat het heelal doorzichtig werd voor licht, en is dus het oudst mogelijke signaal dat te observeren is. Deze straling komt uit elke richting en is zeer gelijkmatig verspreid over de hemel. Desalniettemin bevat het kleine temperatuur variaties. Uit de statistische verdeling van deze fluctuaties - hoeveel, hoe sterk en hoe groot - valt af te leiden hoe het plasma ten tijde van de uitzending van deze straling zich gedroeg. Dit plasma oscilleerde namelijk onder invloed van zijn eigen zwaartekracht en de interne druk. De eerder genoemde statistieken zijn echter niet consistent als het plasma alleen zijn eigen zwaartekracht voelt. Er is een extra component nodig die wel aantrekkingskracht heeft via de zwaartekracht maar die geen interne druk opwekt, maar materie met zulke eigenschappen is onbekend.

Deze achtergrondstraling is dus sterk bewijs voor het bestaan van materie die zich niet zo gedraagt als alle normale materie die bekend is. Evenzo zijn er andere experimenten die op dezelfde conclusie uitkomen. Daaruit is af te leiden dat de Donkere Materie een aantal kenmerken moet hebben. Het belangrijkste kenmerk is derhalve dat het 'donker' is, dat wil zeggen dat de Donkere Materie geen interacties heeft met gewone materie of met licht en andere straling. Dit is in essentie de *raison d'être* van de term, namelijk dat Donkere Materie een vorm van massa moet zijn die inert is ten opzichte van alle andere materie en die de eigen aanwezigheid slechts verraadt via de zwaartekracht. De Donkere Materie moet ook weinig interactie vertonen met zichzelf. Dat wil zeggen dat het geen interne druk en geen onderlinge botsingen ervaart. Als dat wel het geval zou zijn, zou deze materie, ook al is het 'donker', niet de waarnemingen van onder andere de microgolf achtergrondstraling verklaren. Aangetekend moet worden dat een totale afwezigheid van (zelf-)interacties niet strikt noodzakelijk is, alswel dat deze zo zwak zijn dat zij niet waarneembaar zijn met de huidige technieken. Tenslotte zijn er restricties wat betreft de massa van het Donkere Materie deeltje. Deze mag niet te licht zijn omdat de formatie van de grote structuren in het Universum (zoals sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels) dan niet meer gereproduceerd kan worden omdat de deeltjes dan te grote snelheden hebben.

Het is waarschijnlijk dat de Donkere Materie bestaat uit nieuwe, vooralsnog onbekende, fundamentele deeltjes. Het Standaard Model van de elementaire deeltjes is weliswaar erg succesvol, toch zijn er nog een aantal fenomenen die het niet kan verklaren. Het is namelijk mogelijk om een groot scala van theoretische deeltjes toe te voegen zonder de huidige werking van het standaard model aan te tasten. Zo zijn er ook veel mogelijkheden om een theoretisch deeltje toe te voegen dat de eigenschappen heeft van de Donkere Materie. Een van de meest populaire deeltjes is de zogenaamde WIMP, wat in het Engels staat voor 'zwak-wisselwerkend massief deeltje'. De populariteit komt voort uit de eigenschap van dit soort deeltje dat als de sterkte van de interactie van dit deeltje zich bevindt op de schaal van de Zwakke Kernkracht, dat dan de juiste hoeveelheid Donkere Materie wordt gevormd in het vroege heelal zolang het deeltje maar ongeveer een massa heeft van tussen de 1 en 1000 protonen. Een dergelijk deeltje zou echter snel uit elkaar vallen, waardoor het niet meer de rol van kosmologische Donkere Materie zou kunnen vervullen. Daarom worden deze deeltjes stabiel gehouden door een nieuwe symmetrie(lading). Het is echter wel mogelijk voor kosmologische Donkere Materie om instabiel te zijn zolang de vervaltijd maar lang genoeg is; veel langer dan de leeftijd van het universum. In dat geval moet de sterkte van de interactie veel zwakker zijn, en dan mag de massa van het deeltje ook lager zijn, tussen ongeveer de massa van een electron en een duizendste daarvan. Dit

soort deeltjes wordt ook wel aangeduid als ‘super-WIMP’, en is nog steeds zwaar genoeg om te voldoen aan alle Donkere Materie vereisten.

Bij het verval van een super-WIMP komt er een Röntgen foton vrij (omdat de massa van de deeltje van de orde van keV is). Omdat deze deeltjes zo licht zijn (slechts een fractie van de massa van een electron), zouden er gigantische hoeveelheden van nodig zijn om alle Donkere Materie te verklaren. Ondanks dat de vervaltijd van een individueel deeltje veel langer is dan de leeftijd van het heelal, is het te verwachten dat als er extreem veel deeltjes zijn er echter wel vaak genoeg een deeltje vervalt om dit process waar te nemen op een menselijke tijdschaal. Er bestaat geen *a priori* argument dat het meer of minder waarschijnlijk maakt dat een bepaald hypotetisch deeltje de Donkere Materie is. Daarom is het van belang dat veel verschillende mogelijke scenario's worden onderzocht. Dit proefschrift gaat over de zoektocht naar het verval signaal van mogelijke super-WIMP Donkere Materie.

De super-WIMP categorie bevat veel verschillende mogelijke deeltjes. In dit proefschrift wordt vaak melding gemaakt van een specifieke kandidaat, het steriele neutrino. Dit is een uitbreiding van het standaard model met een variant van het normale (actieve) neutrino dat geen enkele interactie heeft met alle andere deeltjes, behalve via zeldzame oscillaties met de actieve neutrinos. Deze deeltjes zijn niet alleen interessant omdat ze Donkere Materie zouden kunnen zijn, maar ze zouden ook helpen om een aantal andere vraagstukken te beantwoorden, namelijk waarom gewone neutrinos massa hebben en oscilleren, en waarom het universum uit materie bestaat en niet uit anti-materie. Het steriele neutrino wordt in dit proefschrift vaak gebruikt als referentie model voor vervallende Donkere Materie, maar al het werk is even zo goed toepasbaar op andere vervallende Donkere Materie.

7.2 Hoofdstuk 2 - Ontdekking van Kandidaat Donkere Materie Signaal op 3.5 keV

Het verwachte signaal van het verval van Donkere Materie is een lijn in het Röntgen spectrum van objecten die veel Donkere Materie bevatten. De sterkte van het signaal hangt af van de vervaltijd van de Donkere Materie, de hoeveelheid Donkere Materie die binnen het gezichtsveld van de telescoop valt en de afstand tot het object. Ondanks dat het signaal van een object dat verder weg staat zwakker is, zijn vergelijkbare signalen te verwachten als het verderweg gelegen object groter is. Daardoor zijn zowel sterrenstelsels als clusters van sterrenstelsels goede doelen om te zoeken naar Donkere Materie. In dit eerste hoofdstuk is gezocht naar een verval signaal in het sterrenstelsel Andromeda (M31) en het Perseus cluster. Dit zijn de objecten waarvan een relatief sterk signaal te verwachten is, gebaseerd op de grootte en hoe ver weg ze staan. De spectra van deze objecten zijn uitvoerig bestudeerd en gemodelleerd. Vooral het Perseus cluster zendt veel Röntgen straling uit die is veroorzaakt door de grote hoeveelheid extreem heet plasma. Al deze reguliere Röntgen emissie is zo goed mogelijk gemodelleerd, maar in beide objecten blijft een spectrale lijn over op 3.5 keV die niet geassocieerd kan worden met een astrofysisch process.

Kan dit signaal het verval van Donkere Materie zijn? Om antwoord te geven op die vraag moet eerst aannemelijk gemaakt worden dat het hier niet gaat om een systematisch

of instrumenteel effect, of om reeds bekende emissie processen. Het gaat waarschijnlijk niet om een instrumenteel artefact vanwege de volgende drie voornaamste redenen. Ten eerste is er geen lijn te bekennen op 3.5 keV in zeer lange observaties van relatief ‘lege’ stukken hemel. Een instrumenteel effect zou een significant signaal moeten hebben geproduceerd in deze waarnemingen. Ten tweede staat het Perseus cluster verder weg dan M31, waardoor het licht van Perseus roodverschoven is zodat een signaal dat uitgezonden is op, bijvoorbeeld, 3.5 keV gedetecteerd wordt met een lagere energie. In het geval van Perseus is het signaal inderdaad verschoven, en komt na correctie voor deze verschuiving de energie van het signaal op dezelfde waarde als dat voor M31. Een instrumenteel effect zou niet verschuiven. Ongeveer een week voor de openbaarmaking van de studie in dit hoofdstuk is een ander artikel gepubliceerd die in andere data hetzelfde signaal heeft ontdekt (Bulbul et al., 2014). Deze data bestaat uit een ‘opstapeling’ van observaties van veel verschillende objecten. Deze objecten stonden allemaal op een andere afstand, en de opstapeling wordt uitgevoerd nadat voor de roodverschuiving is gecorrigeerd. Met andere woorden, een signaal dat daadwerkelijk uitgezonden wordt door deze objecten blijft zichtbaar in deze opstapeling, terwijl een instrumenteel effect uitgesmeerd zou worden. Tenslotte is dit signaal gedetecteerd met meerdere instrumenten, zowel in de studie beschreven in dit hoofdstuk, als in de studie door Bulbul.

Dat het niet gaat om een regulier astrofysisch signaal is aannemelijk te maken door te kijken naar andere aanwezige spectraal lijnen. In heet plasma worden hele specifieke transitie geëxciteerd die zorgen voor het uitzenden van emissielijnen. Elk ion heeft zijn eigen karakteristieke set van emissielijnen op bepaalde energieën. Hoe sterk elk van deze lijnen is, hangt af van de temperatuur van het plasma en de hoeveelheid ionen die aanwezig zijn. Het signaal op 3.5 keV bevindt zich in het spectrum dichtbij mogelijke Argon en Kalium lijnen - te dichtbij voor het instrument om het verschil duidelijk te kunnen waarnemen. Door de sterkte van de 3.5 keV lijn te vergelijken met andere lijnen (idealerweise andere lijnen van Argon of Kalium), kan er bepaald worden of het waarschijnlijk is dat de 3.5 keV lijn verklaard kan worden door Argon of Kalium emissie. In het geval van M31 is de 3.5 keV lijn de sterkste lijn in het spectrum. Dit zou zeer onwaarschijnlijk zijn als het om Argon of Kalium gaat, in dat geval zouden er ook andere sterkere lijnen aanwezig moeten zijn. In de opstapeling van clusters in de Bulbul studie gaat een soortgelijk argument op, namelijk dat er van de orde 10 tot 20 keer zoveel Argon of Kalium aanwezig moet zijn dan dat normaal gesproken aannemelijk is, om te verklaren waarom de Argon of Kalium lijn in de buurt van 3.5 keV zo sterk zou zijn als waargenomen.

Als het signaal geen instrumentele oorsprong heeft, noch een reguliere emissielijn is, staat nog niet vast dat het een signaal van vervallende Donkere Materie betreft, bij gebrek aan andere verklaringen. Om iets te kunnen zeggen over de Donkere Materie interpretatie, moet de sterkte van de lijn vergeleken worden met wat er verwacht wordt van het verval van Donkere Materie. De verwachte sterkte schaalte recht evenredig met de hoeveelheid Donkere Materie in het gezichtsveld van de telescoop, en omgekeerd evenredig met de afstand tot het object in het kwadraat. Het is dan mogelijk om de waarnemingen van de verschillende objecten met elkaar te vergelijken, of om de verdeling van het signaal binnen een object te bestuderen. De Donkere Materie dichtheid binnen een (cluster van) sterrenstelsel(s) neemt namelijk op karakteristieke wijze af richting de buitenkant (veel langzamer dan bijvoorbeeld de sterkte van reguliere emissielijnen). Alhoewel de foutmarges op zowel de gemeten sterkte van de 3.5 keV lijn en de hoeveelheid Donkere

Materie in de objecten vrij groot zijn, zijn de waarnemingen van de lijn in M31 en in Perseus consistent met de interpretatie dat de lijn veroorzaakt wordt door het verval van Donkere Materie.

In het tweede deel van Hoofdstuk 2 wordt een belangrijke test uitgevoerd. Bepaald hebbende dat de 3.5 keV een kandidaat signaal is voor het verval van Donkere Materie, zou men verwachten dat er ook een zeer sterk signaal waar te nemen moet zijn vanuit het centrum van de Melkweg, omdat daar een vrij grote hoeveelheid Donkere Materie is te vinden, en voornamelijk omdat het zeer dichtbij staat vergeleken met alle andere mogelijke bronnen. Het centrum van de Melkweg is echter een zeer complex systeem wat betreft de Röntgen emissie, wat het modelleren van het spectrum zeer uitdagend maakt. In de observaties is weldegelijk een sterke lijn op 3.5 keV waargenomen. In dit specifieke geval is het niet uit te sluiten dat het om een reguliere emissie lijn gaat, alhoewel het ook niet noodzakelijkerwijs om reguliere emissie hoeft te gaan. Het belang van deze observaties is dat als er geen 3.5 keV signaal gevonden was, de interpretatie van de 3.5 keV lijn als het verval van Donkere Materie onmiddellijk gefalsificeerd zou zijn.

7.3 Hoofdstuk 3 - Het 3.5 keV Signaal in het Draco Dwergstelsel

Alle studies naar de oorsprong van het 3.5 keV signaal maken gebruik van archief data. Er is echter weinig data beschikbaar van dwergsterrenstelsel, objecten die erg geschikt zouden zijn om de 3.5 keV lijn te onderzoeken. Deze stelsels zijn kleine satelliet stelsels van de Melkweg, die relatief veel Donkere Materie bevatten en maar weinig heet gas. Daarnaast staan ze relatief dichtbij. Het verwachte signaal is niet heel sterk, maar wel waarneembaar bij genoeg observatie tijd. Het voordeel is dat er geen enkele reguliere astrofysische emissie verwacht wordt. Detectie van een 3.5 keV lijn vanuit een dwergstelsel zou dus een sterk argument kunnen zijn voor de vervallende Donkere Materie interpretatie.

Omdat er niet genoeg archief data beschikbaar is om een lijn van de verwachte sterkte te kunnen detecteren, zijn nieuwe waarnemingen uitgevoerd van het Draco dwergstelsel. Dit hoofdstuk beschrijft deze data en de resultaten van het modeleren van het spectrum. Helaas is er geen definitieve conclusie te trekken over de 3.5 keV lijn. In het spectrum van Draco in het ene instrument is slechts een zwak (niet erg significant) signaal gevonden, en in het andere instrument blijft detectie uit. Het verschil tussen de detectoren valt te verklaren door de verschillende gevoeligheid van de instrumenten. Ook vergeleken met de hoeveelheid Donkere Materie die verwacht wordt aanwezig te zijn in Draco, is deze non-detectie statistisch consistent met de andere 3.5 keV observaties. Samengevat is de hint van een 3.5 keV signaal in Draco niet sterk genoeg om te kunnen stellen dat het signaal er zeker is en dus een argument voor de Donkere Materie interpretatie vormt, noch is het signaal te zwak om te kunnen stellen dat de Donkere Materie interpretatie uitgesloten is.

7.4 Hoofdstuk 4 - Het 3.5 keV Signaal in het Perseus cluster

Het Perseus cluster van sterrenstelsels is in de context van het 3.5 keV signaal al eerder onderzocht met verschillende telescopen in zowel het centrum als de buitenkanten van het cluster. Enkele van deze studies laten tegenstrijdige resultaten zien, en in het algemeen lijkt het Perseus cluster een wat te sterk 3.5 keV signaal te hebben in vergelijking met andere objecten. In dit Hoofdstuk worden de bestaande resultaten van Perseus met elkaar vergeleken, en wordt de data genomen met de *Suzaku* telescoop opnieuw uitgebreid onderzocht om zo de heersende tegenstrijdigheden in de literatuur te beslechten. Daarnaast wordt de voorheen niet-onderzochte data van de minder centrale delen van Perseus onderzocht om het gedrag van de 3.5 keV lijn als functie van afstand tot het centrum te bepalen.

In het centrum van Perseus is een zeer sterke 3.5 keV lijn aanwezig. Het is, net als bij de vorige onderzoeken, onwaarschijnlijk dat deze lijn wordt veroorzaakt door reguliere emissie. De emissie in het centrum is significant genoeg om het onder te verdelen in drie concentrische ringen. Buiten het centrum wordt geen 3.5 keV lijn gedetecteerd, maar het is wel mogelijk om limieten te bepalen met betrekking op de sterkte van de lijn als functie van de afstand tot het centrum. De detecties en de limieten op verschillende afstanden van het centrum van het cluster kunnen worden vergeleken met de verdeling van Donkere Materie in het cluster. Hiervoor worden de resultaten van verschillende onderzoeken uit de literatuur gebruikt naar deze verdeling. Binnen de foutmarges op zowel de sterkte van de lijn als op de verdeling van de Donkere Materie, is de oorsprong van de 3.5 keV lijn in Perseus consistent met het verval van Donkere Materie.

Gebaseerd op dezelfde literatuur resultaten voor de verdeling van de Donkere Materie binnen het cluster, worden de resultaten uit dit Hoofdstuk vergeleken met andere metingen van de 3.5 keV lijn in Perseus. Ook hier zijn de meeste waarnemingen consistent met vervallende Donkere Materie als oorsprong van het 3.5 keV signaal. Van de onderzoeken die tegenstrijdig waren is vastgesteld dat de betreffende analyse niet afdoende was.

Vergeleken met andere objecten is de 3.5 keV lijn in Perseus inderdaad helderder dan verwacht zou worden op basis van de gebruikelijke methode om de totale massa van het Perseus cluster te bepalen. Het is echter mogelijk om de resultaten met betrekking tot Perseus overeenstemming te laten bereiken met andere resultaten, als de massa van Perseus groter is, zoals door sommige andere methodes geïmpliceerd wordt. Het zou ook mogelijk zijn dat slechts een deel van de sterkte van het 3.5 keV in Perseus veroorzaakt wordt door reguliere emissie zodat de 'werkelijke' sterkte lager zou zijn.

Om het vraagstuk van de oorsprong van het 3.5 keV signaal te beslechten, is de hoop voornamelijk gericht op nieuwe instrumenten. Korte raketvluchten met een instrument met superieure spectrale resolutie aan boord zou waarnemingen van de Melkweg kunnen maken, die vanwege de betere resolutie verschil zou moeten kunnen maken tussen een signaal van het verval van Donkere Materie en reguliere emissie van heet plasma. Een ruimte telescoop met vergelijkbare kwaliteit als de huidige instrumenten maar met een veel groter gezichtsveld kan binnen enkele jaren de hele hemel observeren. Door wederom het opstapelen van de vele objecten die in deze dataset aanwezig zullen zijn, kan een hoge statistische kracht bereikt worden.

7.5 Hoofdstuk 5 - Een Nieuwe Methode voor de Zoektocht naar het Verval van Donkere Materie

In dit hoofdstuk wordt een nieuwe methode ontwikkeld om te zoeken naar het verval van Donkere Materie die de nadelen van traditionele methoden vermijdt. Het onderzoek in de voorgaande hoofdstukken naar de 3.5 keV lijn berust voor een groot deel op het modelleren met hoge precisie van de spectra van individuele objecten. De nadelen inherent hieraan zijn in de eerste plaats dat er per object maar een beperkte hoeveelheid data beschikbaar is, en ten tweede dat een zwak signaal bij het modelleren erg gevoelig kan zijn voor het samenspel van onderling ontaardde spectrale componenten. Om vervolgens de oorsprong van het signaal te onderzoeken moet het signaal vergeleken worden tussen verschillende objecten, maar voor ieder object afzonderlijk zijn de foutmarges vaak groot.

Eén gedeeltelijke oplossing is om een opstapeling te maken van meerdere objecten, en het resulterende gecombineerde spectrum te modelleren. Hierdoor kan de hoeveelheid gebruikte data vergroot worden evenals de statistische kracht. Tegelijkertijd wordt het echter moeilijker om het spectrale model te interpreteren, en de individuele objecten kunnen niet meer met elkaar worden vergeleken.

Om zowel de statistische kracht van het combineren van data van verschillende objecten, als het onderscheidend vermogen van het vergelijken van de objecten te behouden in een enkele analyse is een correlatiemethode ontwikkeld. De twee basis ingrediënten zijn ten eerste een vrij groot aaneengesloten veld van Röntgen waarnemingen, opgedeeld in een raster waarbij elke cel een eigen spectrum heeft. Ten tweede een catalogus van de verdeling van Donkere Materie in dit raster, gerepresenteerd door groepen van sterrenstelsels. De correlatie is in essentie en in de meest eenvoudige implementatie dan het verschil tussen de totale Röntgenstraling gemiddeld over het hele veld, en de gemiddelde Röntgenstraling in cellen waar zich groepen sterrenstelsels bevinden. Door tijdens het nemen van deze gemiddelden te corrigeren voor de roodverschuiving van iedere groep sterrenstelsels isoleert deze methode automatisch louter die Röntgenstraling die daadwerkelijk uitgezonden worden door de groepen. Bij wijze van spreke 'herkent' de correlatie welk deel van de Röntgenstraling bij de groepen hoort en welk deel niet doordat het spectrum van de groepen 'beweegt' naar gelang de roodverschuiving van de groepen.

Vervolgens kan de correlatie op verschillende manieren uitgevoerd worden. De catalogus bevat informatie over de massa van iedere groep van sterrenstelsels. In plaats van de Röntgenstraling te correleren met slechts de aanwezigheid (of niet) van een groep, kan er gecorreleerd worden met de massa van iedere groep. Of er kan gecorreleerd worden met de massa van iedere groep in het kwadraat, of met de massa tot welke andere macht dan ook. Als bekend is hoe een inherent signaal in werkelijkheid schaal met de massa van een groep (d.w.z met welke exponent van de massa), kan berekend worden hoe de correlatie moet veranderen als functie van de exponent van de massa waarmee de correlatie wordt uitgevoerd. Door vervolgens de correlatie uit te voeren met verschillende exponenten van de massa, en te bestuderen hoe de correlatie telkens verandert, kan afgeleid worden wat de inherente schaling is van Röntgenstraling. Het signaal van het verval van Donkere Materie schaal als de massa tot de eerste macht. Als de bovenstaande analyse concludeert dat er op één bepaalde energie een emissie component bestaat die schaal als de massa tot de eerste macht, mag dat beschouwd worden als een zeer sterke aanwijzing dat het verval

van Donkere Materie is waargenomen.

Om het concept in andere woorden uit te drukken, deze correlatie methode offert kennis van de individuele datapunten op om tot slechts twee getallen te komen die samen uitdrukken of er al dan niet een verval signaal van Donkere Materie in de data is te ontdekken.

De methode wordt in dit Hoofdstuk ontwikkeld en getest op bestaande archiefdata waar gesimuleerde verval signalen aan zijn toegevoegd. De methode is in staat om signalen te detecteren die in een traditionele analyse moeilijk te detecteren zouden zijn, en om tegelijkertijd te bevestigen dat het inderdaad om een verval signaal gaat, iets wat met traditionele methoden niet mogelijk is. Deze dataset is echter niet gevoelig genoeg om tot conclusies te kunnen komen wat betreft de oorsprong van het 3.5 keV signaal. Dit is in de toekomst mogelijk door meer archiefdata (en data van nieuwe waarnemingen) te combineren, iets waar deze methode uitermate geschikt voor is.