



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **X-ray spectroscopy of interstellar dust: from the laboratory to the Galaxy**

Zeegers, S.T.

### **Citation**

Zeegers, S. T. (2018, November 1). *X-ray spectroscopy of interstellar dust: from the laboratory to the Galaxy*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/66668>

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/1887/66668>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/66668> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Zeegers, S.T.

**Title:** X-ray spectroscopy of interstellar dust: from the laboratory to the Galaxy

**Issue Date:** 2018-11-01

# Westfriese samenvatting

## *omzet deur: Ina Slot*

### **X-ray spectroscopy of interstellar dust**

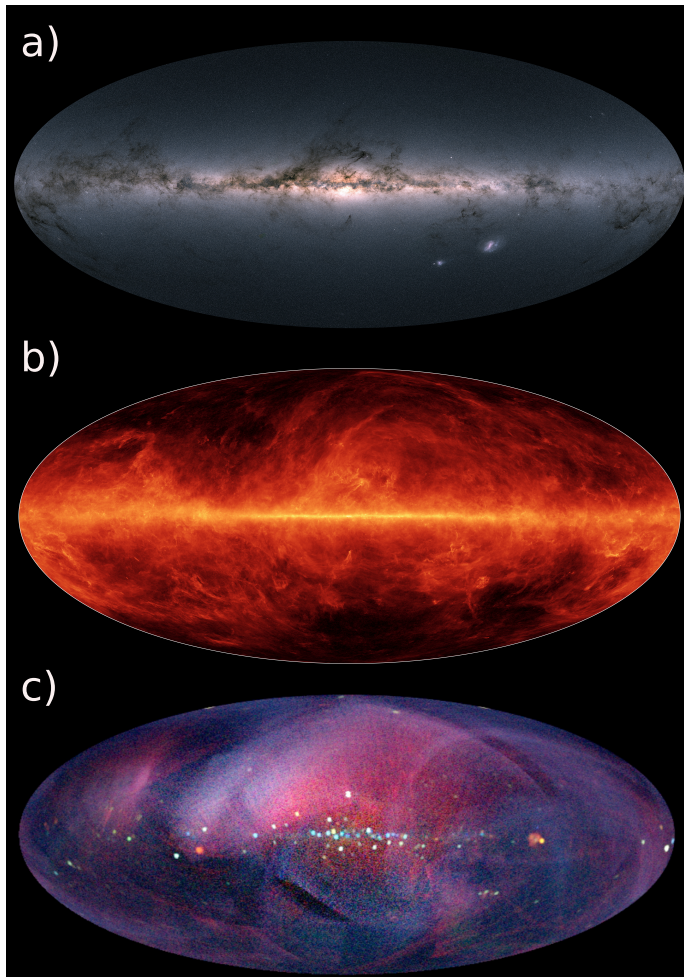
from the laboratory to the Galaxy

#### Stof tussen sterre, wat dochte ze deer voorheen van?

De ruimte tussen de sterre hiet 't interstellair medium (ISM). Die ruimte is vezelf niet leeg. Tussen de sterre ziene we wolke van iele stofdeêltjes en gasse, die allegaar aars benne. Ze he- wwe are vurme, ze benne niet even groôt en ok niet allegaar even dicht. Deuze wolke kè-je bebobbeêld zien as donkere plekke in oôze oigen Melkweg. De sterre geve licht en die wolke niet. Zuks kè-je goed bekoike bovenan Feguur A.6. De telescope in de 18e eêuw werde al beterder, dat de mense konne deuze donkere plekke ok al beterder bestudere. Vezelf wouwe ze meer wete van die plekke. Eerst bedochte ze dat 't gate in de hemel ware. De astronoom William Herschel zee bebobbeêld: 'Hier is eerlijk waar een gat in de hemel!'. Maar twei eêuwe later hadde ze in de smieze dat 't gien gate ware, maar een soortement 'inde weg zitters': wolke die 't licht van de sterre deerachter voor een deêl teughouwe. An 't end van de 19e eêuw begon Barnard kiekies te maken van de wolke en hai zette die beêlde in 1919 in een mooi boek. Op die kiekies kon je alderhand kloine dinge zien die je met je oigen oge nooit zien kenne zou. Agnes Clerke skreef over de wolke in heur boek 'Problems in Astrophysics' en zai noemde ze verduisterde objecte. In 1847 deed Friedrich von Struve een nuwe ontdekking. Ok al zien je gien wolke die 't sterrelicht teughouwe, den nag douft 'r een deêl van dat licht uit. De sterre loike puur rooierder van kleur asdat ze in 't echt benne. Pas in 1930 konne ze bewoi- ze dat 't deêls uitdove en 't rooier worre van 't sterlicht (in de sterrekunde hiet dat extinctie: 't verstrooien en opslorpe van licht) komt deur interstellaire stofdeêltjes. Schalén en Trumpler ontdekte dut baiegaar, de eerst in 1929 en de tweidst in 1930, maar ze wiste 't niet van mekaar.

#### Weerom bestudere we die stof tussen sterre?

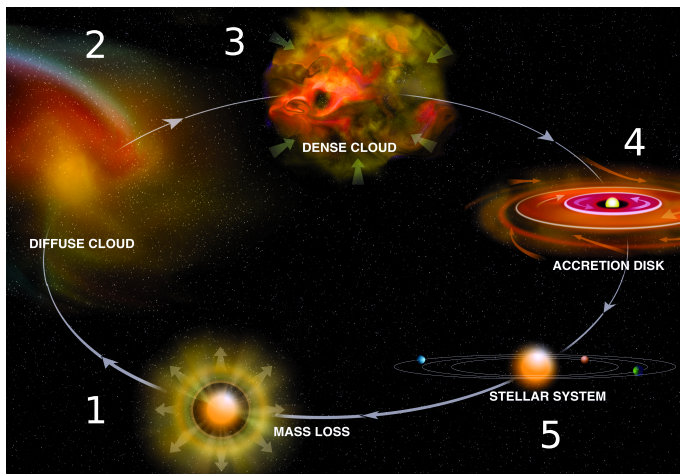
Nei de ontdekking van 't interstellair stof raakte de wetenskappers deer al meer mee in 't zin. In 't begin niet, toe hadde ze d'r hêlegaar niks mee op. Later vonde ze 't stof enkeld maar verveulend, want 't zat in de weg as ze sterre en sterrestelsels bekoike wouwe. Maar sinds de jare zestig van de vorige eêuw ziene ze 't al meer as een ansasser bai alles wat 'r beurt in 't grôte heelal. De belangroike rol van stof in 't heelal kè-je 't beste begroipe al koik je nei de levensloop van sterre. In alle paiemente van die levensloop heb stof pittig wat in de melk te



Figuur A.6: De Melkweg in drie verschillende golflengtes: a) licht wat we zien kenne, de donkere plekke benne gas en stofwolke: GAIA 330-1050 nm, © ESA/Gaia/DPAC - b) infrarood: kouwe stofdeeltjes die oplichte in infrarood, © ESA/NASA/JPL-Caltech - c) Röntgenstraling: de stippies benne röntgendubbelsterre, © JAXA/RIKEN/MAXI team.

brokkelen, koik maar nei Feguur A.7. Sterre make 't heelal roiker met elemente, die maakt worre in 't nucleosynthese proces. Die elemente worre deur sterwinde of een (super) novae de ruimte in bonjourd. Zo zurge sterre voor de bouwstiene van interstellair stof. 't Stof wordt denkelyk maakt as een condensaat in de atmosfere van sterre die puur latig in hullie evolutie zitte, in 't achterend van een onwoize supernova-ontploffing en meskien wel in 't ISM zelf. Al klontere gas en stof in de ruimte samen tot een barre dichte wolk den ken d'r een nuwe ster maakt worre in de middend van zô'n wolk. Stof is merakel belangroik bai 't maken van de ster: van 't in mekaar lazeren van de wolk deur de zwaartekracht tot 't maken van planete.

Kosmisch stof kè-je overal teugenkomme: in oôs zonnestelsel, rond jonge sterre, in skoftig grôte wolke, in de Melkweg, maar ok in sterrestelsels die een heêl end weg legge. En die stof is 'r al heêl vroeg in de geskiedenis van oôs heelal. Deerom ken 't oôs helpe om d'r achter te kommen hoe of 't vroege heelal grôter worren is. Dut benne al pittig wat redenaties die zegge: gaan kosmisch stof bestudere. Maar d'r is nag een are reden. Wai, en alles wat rondom oôs is, bestane uit deuze stof. Al wulle we 't begin van 't leven op deuze wirreld begroipe den moete we te weten komme wat de oorsprong is van 't stof, weer of 't van maakt is en hoe of 't maakt wordt.



Figuur A.7: De levensloop van sterre en interstellair stof in 5 stadia: 1) geëvolueerde ster, 2) diffuse wolk, 3) dichte wolk, 4) protostellare skoif en 5) stelsel met planete. In alle dêle van stervorming speelt stof een cruciale rol. © Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF.

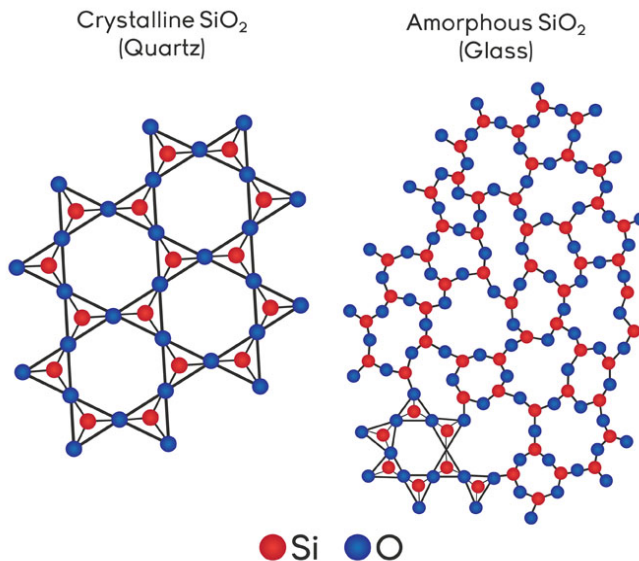
## De eigenskappe van interstellair stof

Omdat stof een grôte rol speelt in veul processe in 't heelal is 't een belangroik onderdeel in heêl wat astronomische medelle. Om percieze interstellaire stofmedelle te ontwikkelen is 't van belang om onder meer te snappen wat de eigenskappe van 't stof benne, weer 't stof van maakt is, op wat voor manier 't een wisselwerking angaat met straling, wat de verdêling in grôotte is van de stofdeêltjes, wat hullies medêl en hullies makelai van binnen is, en of deuze eigenskappe verandere in verskillende omgevings. We wete wat voor êlemente deur sterre maakt worre en ok in wat voor hoeveulhede. Dat we kenne de abundatie van een êlement (de hoeveulheid die d'r is in vergeloeiking met waterstof) in de gasfase vergeloeike met astronomische waarnemings.<sup>7</sup> Die waarnemings woize uit dat de abundantie van een paar êlemente

<sup>7</sup>Waterstof en helium, maakt in de Oerknal, benne êlemente die 't meist voorkomme in 't heelal. Alle êlemente die sweerder benne en die weer d'r minder van benne, worre in de levensloop van de sterre maakt.

leiger is asdat je verwachte zou. Dat je kenne vaststelle dat de êlemente die misse, in stofdeêltjes opslôten zitte. Stof bestaat voor 't groôte deêl uit koôlstof (C), silicium (Si), oizer (F), magnesium (Mg) en zuurstof (O). Al legge we deuze kennis én boekewoishoid, sterrekundige waarnemings (bevobbeêld infrarôôdspectroscopie) en studies van meteoriete bai mekaar den kenne we 't stof in 't interstellair medium in grôte loine opdêle in twee hoofdgroep: silicate (bevobbeêld pyroxeen- en olivointypes, die je vergeloike kenne met foine zandkorrels op aarde) en koôlstofhouwende stof (te vergeloiken met roet) met deerbai den ok nag oxiden (eg., MgO, SiO, SiO<sub>2</sub>), carbide (meistens SiC) en metallisch oizer.

Dat we wete gerust wel een zoôt, maar d'r benne ok nag zat dinge onzeker met dat interstellair stof. We wete niet percies hoe en weerzo stof maakt wordt en hoe de oigensappe van stof aars worre in verskillende omgevings. We wulle ok graag wete wat of 'r met stof beurt in de buurt van 't instellair medium weer 't puur grof te keer gaat. Deer wordt stof beskôten met straling en kosmische deêltjes en stikmaakt met lillijke skokgolve. Deur al deuze onwoizigheid verandert meskien de makelai van 't stof. Al hadde de stofdeêltjes een kristalloine makelai voordat ze in 't instellair medium kwamme den zouwe ze deuze makelai kwoit rake kenne en al meer zonder vurm rake, koik maar nei Feguur A.8. Deerbai wete we ok niet percies wat of de chemische samenstelling van de stofdeêltjes is.

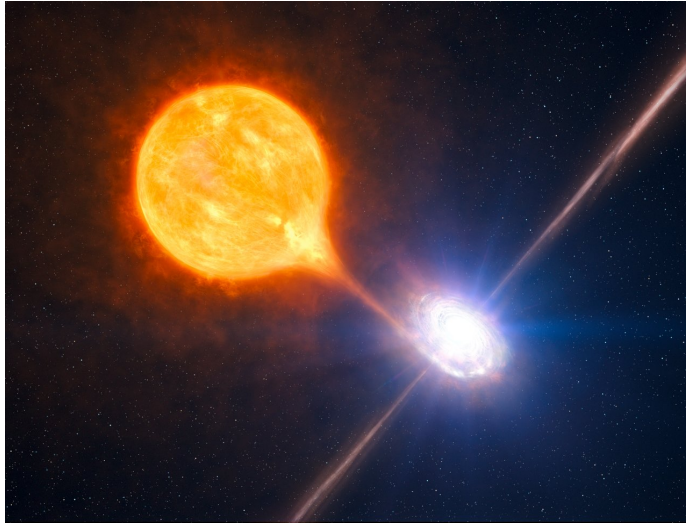


**Feguur A.8:** Links 't silicaat kwarts, dat een kristallijne structuur heb. Rechts glas met dezelfde atomaire compositie, maar nou zonder de kristalloine geordendheid van de atome (amorf). In quartz heb elk silicium atoom een band met vier are silicium atome deur "zuurstof bregge". Samen make ze een symmetrische tetraëder. Om niet in de tist te raken, liete we 't vierde silicium atoom en z'n zuurstof breg weg. Bron: NDT Resource Center, Center for NDE, Ioawa State University.

## Dut proefskrift

Hoge resolutie röntgenspectroscopie is een belangroike techniek in de studie nei interstellair stof. As we spectrale kenmerke in röntgenspectra en verstrooiingshalos rond röntgenbronne bestudere, kenne we -zoas al zoid is- meskien een paar wezelijke vrage over interstellair stof beantwoorde. In dut proefskrift benne we vooral in de weer met stof van 't silicaatype, ien van de hoofbestanddele van interstellair stof.

Röntgenstrale benne verlegen best om silicate te bestuderen. Dat komt omdat 'r spectrale absorptiekenmerke van zuurstof, magnesium, silicium en oizer in 't röntgengebied van 't spectrum zitte. Deuze êlemente benne de belangroikste onderdele van silicate. We gebruike met name 't spectrale absorptiekenmerk van Silicium, dat we ok wel de Si K-rand noeme<sup>8</sup>, om de oigenskappe van silicaatstof te onderzoeken. Voor elk type silicaatstof benne de spectrale kenmerke in de rand, ok wel Röntgenabsorptiefoinstructure (XAFS) kloin effies aars. Dut betekent dat ze een unieke vingerofdruk voor 't stof vorme.



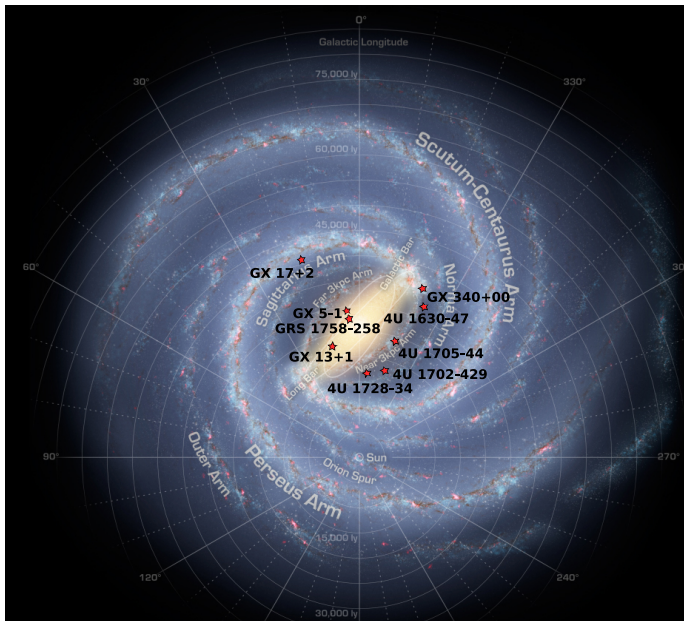
Figuur A.9: Kunstig beeld van een röntgendubbelster, bron: ESO/L. Calçada/M.Kornmesser

In de Melkweg benne heldere lage massa Röntgen dubbelsterre. Dat benne verlegen beste bronne om goed te koiken nei 't stof wat 'r tussen loit en 't gas langs de zichtloin. Dat doene we deur ze heël gewoôn te gebruiken as een lanteerns die deur 't interstellair medium skoine, deerbai wordt de straling deur stof en gas voor een deël opslurpt en verstrooid. Deuze bronne bestane uit twee onderdele, een neutrônester of swart gat dat spul bai mekaar sweêlt van een ster in de buurt, deurgaans een gewône hoofdreeksster (dat gien reuzester). Deuze systeme benne pittig helder wat röntgenstraling angaat, omdat 't spul van de buurster wat bai mekaar sweêld is een skoif maakt rond de neutrônester of 't swarte gat. Deur de gravitationële energie

<sup>8</sup>Dut absorptiekenmerk komt voor op de ionisatie-energie van een kernatoom in de K-electronenschil van een siliciumatoom en ziet 'r uit as een rand of drumpel.

die vraikomt van 't invallende spul in de skoif zal deuze röntgenstraling oplichte, koik maar nei Feguur A.9. De aardatmosfeer slurpt röntgenstraling op. Deorum kenne we de straling van de röntgendubbelsterre niet drekt in ien keer vanof de grond mete. Nei, röntgentelescope die in de ruimte zwurve, zalle oôs helpe. In dut proefskrift make we gebruik van data van 't Chandra röntgenobservatorium, een röntgensatelliet die in 1999 de ruimte inzwuupt is. De spectra van dut observatorium benne heël best voor stofstudies omdat ze een barre hoge spectrale resolutie hewwe. En deer komt ok nag bai dat we profoit hewwe van 't roike Chandra data archief, deer zitte een zoôt spectra van röntgendubbelsterre in.

In Hoofdstuk 2 gebrukte we 't spectrum van de röntgendubbelster GX 5-1 as een test om interstellair stof langs de zichtloin nei de bron te bekoiken. We dede dat met een stel van zes verskillende silicaatmonsters, die kwamme uit de netuur of ware met een kunsie maakt in een laboratorium, en we hewwe hullies röntgenspectra bai de Soleil synchrotronfacilitoit in Perois meten. Deuze metings werde klaarmaakt om ze toe te passen in astronomische medelle om zodoend 't spectrum van de Röntgendubbelster uit te tisten. We bedochte dat de kristalloine olivoin silicate 't spectrum 't beste verklare kenne. En deerbai komt ok nag dat een verstrooiingskenmerk net onder de opslurp-kraacht van de K-rand een anwoizing geeft voor de grôteverdeling van de stofdeêltjes. Wat die grôte deêltjes langs de zichtloin allegaar doene, bekeke we deur de K-rand in medel te brengen met twei verskillende verdêlings van deêltjesgrôte. Hier vonde we anwozings dat 'r grôte stofdeêltjes langs de zichtloin nei GX5-1 benne.



Feguur A.10: Kunstig beêld van een anbliek van boven van de Melkweg, maakt nei infraroôdbeêlde van de Spitzer Space Telescope van de NASA. De roike sterre woize de plaas an van de LMXB's. © NASA/JPL-Caltech/R. Hurt

In Hoofdstuk 3 hewwe we oôze set van silicaatmonsters grôter maakt nei 14 en hullies Silicum K-rand in 2017 in een tweede meetreeks vastloid bai de Soleil synchrotronfacilitoit. We hewwe ok de röntgendubbelsterre die we zage, vergroôt tot negen bronne. Hullies plaas kenne we zien in Feguur A.10. Deuze bronne zitte in de alderdichste plaase van oôs Sterrestelsel. Deerom kenne we stof bekoike in barre lastige gebiede van dat Sterrestelsel. We vinde dat amorf olivoin de baas is in de meiste waarnemings, maar dat 'r nag altoid een grôte baidrage is van kristalloine silicate. Dut is aars as de resultate die we eerder zagge in 't infraroôd, deer werd minder as 2% van 't stof as amorf vonden. Dut verskil ken meskien komme deur de gevoelighoid van XAFS voor interacties die kortbai benne. In 't infraroôd benne metings meer doende met interacties binnen de stofdeêltjes van puur vedder weg. Verskille in de abundantie van êlemente tussen alderhand gebiede van oôs Sterrestelsel benne belangroik voor 't snappen van de makerai en de chemische evolutie van 't Sterrestelsel. De chemische samenstelling van de Galactische skoif is altemet aars met toid, omdat sterre 't interstellair medium alsmar roikerder make. 't Is gewoôn dat de abundantie meer wordt al mete we richting 't Galactisch centrum. Maar we vinde dat in de binnenste plaase van 't Sterrestelsel de abundantie van Silicum vlakker wordt en dicht in de buurt van 't Galactisch centrum zellefs mindert. Meskien komt dat deur de typische silicaatkorrels die al grôterder worre of deur verskille in de chemische evolutie van de Galactische kern in vergeloiking met de skoif van 't Sterrestelsel.

In Hoofdstuk 4 koike we nei wat 'r ken met absorptierandstudies met ruimtetelesope van de kommende toid: XARM (2021), Arcus (2023) en Athena (2028). We koike heêl sekuur nei de K-rand van koôlstof, zwavel, aluminium, nikkel, titanium en calcium. Over niet als te lange toid zal de depletie en abundantie van deuze êlemente met zekerhoid vaststeld worre. In 't geval van koôlstof en zwavel zal ok de chemische samenstelling van 't opslurpende stof bepaald worre kenne. Voor aluminium en calcium zalle - ondanks de grôte depletie in 't interstellair medium en de prominente opslurping deur stof - de spectrale rand kenmerke een zoôt kere niet aars worre, zellefs al verandert de chemische samenstelling van de stoffe waar aluminium en calcium inzit. 't Extinctiesignaal van grôte stofkorrels ken zocht en in medel douwd worre, den kenne verskillende verdêlings van stofdeêltjes test worre. 't Is nôselijk maar de lage kosmische abundantie van titanium en nikkel zalle een sekure studie van spectrale rand kenmerke teughouwe.

In 't leste hoofdstuk, Hoofdstuk 5, koike we of we 't verstrooien van röntgenstrale deur stofdeêltjes in een puinskoif rondom een ster mete kenne. We ziene dat medelle met een nagal sterke sterrewind en een samenstelling van silicate en grafiet een verstrooiingshalo versterke kenne. Maar dut ziene we enkeld in theorie, niet in 't echie. Neidat we medelle vergeleke met waarnemings van een stelsel met een ster en een skoif vinde we dat deuze medelle gien duidelijk verstrooiende halo voor mekaar kroige, al mete we zuks met de teughwoordige skerpte van röntgentelesope. Meskien ken deuze röntgenhalo rond sterre met puinskoive in de kommende toid wel meten worre met de röntgenmissies die d'r den benne.

We benne an 't end van de akker. In dut proefskrift kè-je zien dat röntgenspectroscopie een goeie manier is om antwoorde te vinden op grondige vrage over interstellair stof. In de toid die komme gaat - al worre nuwe breedband extinctiemedelle mongen met de spectra van toekomstige röntgentelesope - zal deuze manier van doen lang lopende onzekere zake in medelle weghale. Opheden - zoas in dut proefskrift opskreven staat- geeft de Silicum K-rand in spectra van röntgendubbelsterre al een hêle beste koik op de chemie van interstellair silicaatstof.

*“Zelfs als ik ooit daadde ben  
Dan weet je dat ik ergens ben  
Dan ben ik alsnog, in de lucht als sterrenstof”*

Sterrenstof - De Jeugd van Tegenwoordig