

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

Nederlandstalige samenvatting

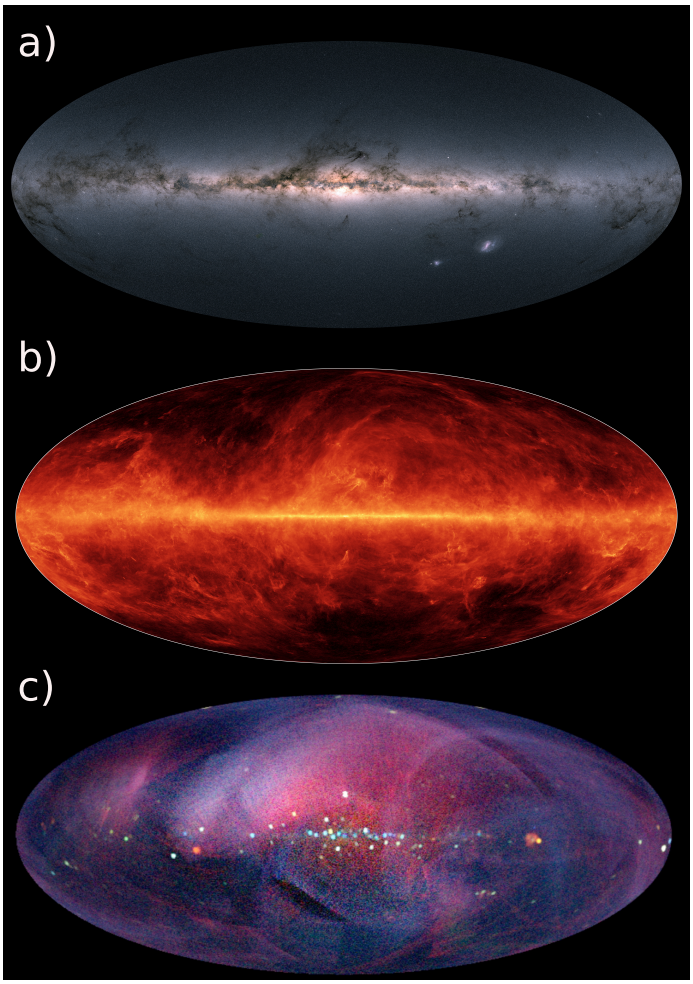
X-ray spectroscopy of interstellar dust
from the laboratory to the Galaxy

Interstellair stof vanuit een historisch perspectief

De ruimte tussen de sterren, die het interstellair medium (ISM) wordt genoemd, is niet leeg. Tussen de sterren zien we wolken bestaande uit fijne stofdeeltjes en gassen, die varieren van vorm en in grootte en dichtheid. Deze wolken kunnen bijvoorbeeld worden waargenomen als donkere plekken in ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg. Ze vormen een contrast met het licht van de sterren, zie bovenaan Figuur A.1. De ontwikkeling in de kwaliteit van telescopen in de 18e eeuw maakte het mogelijk om deze donkere plekken in de Melkweg beter te kunnen bestuderen. Dit leidde tot een toename in de interesse in dit soort objecten. In het begin dacht men dat deze donkere plekken gaten in de hemel waren. De astronoom William Herschel heeft bijvoorbeeld gezegd: "Hier ist wahrhaftig ein Loch im Himmel!". Echter, aan het begin van de 20ste eeuw werd ontdekt dat deze zogenaamde gaten in de lucht in werkelijkheid voorgrond objecten zijn, namelijk wolken die het licht van de sterren erachter (gedeeltelijk) tegenhouden. Aan het einde van de 19e eeuw begon Barnard de wolken te fotograferen en publiceerde deze foto's in een catalogus in 1919. De foto's lieten details zien die met het blote oog niet kunnen worden waargenomen. Agnes Clerke omschreeft de wolken in haar boek 'Problems in Astrophysics' als verduisterende objecten. In 1847 ontdekte Friedrich von Struve dat zelfs in het geval dat er geen wolken worden waargenomen die het sterlicht belemmeren, er nog steeds een deel van het sterlicht wordt uitgedoofd. De sterren lijken roder van kleur dan dat ze in werkelijkheid zijn. Het duurde tot 1930 voordat bewezen werd dat de oorzaak van het deels uitdoven en roder worden van het sterlicht (in de sterrenkunde noemt men dit extinctie, namelijk de verstrooing en absorptie van licht) wordt veroorzaakt door interstellaire stofdeeltjes. Schalén en Trumpler ontdekten dit effect onafhankelijk van elkaar in respectievelijk 1929 en 1930.

Waarom bestuderen we interstellair stof?

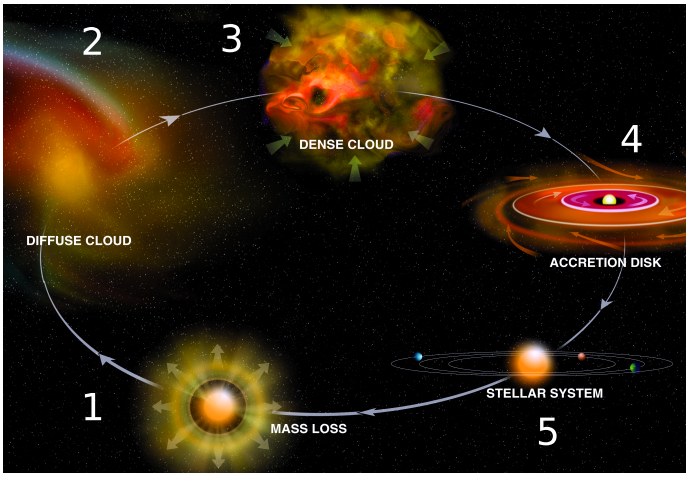
Sinds de ontdekking van interstellair stof zijn wetenschappers de aanwezigheid van dit stof steeds meer gaan waarderen. In het begin werd het compleet genegeerd, daarna werd het gezien als een belemmering wanneer men sterren en sterrenstelsels wilde observeren, maar sinds de jaren 60 van de vorige eeuw wordt het stof meer en meer gezien als een belangrijke en



Figuur A.1: De Melkweg in drie verschillende golflengtes: a) zichtbaar licht, waarbij donkere plekken gas en stofwolken zijn: GAIA 330-1050 nm, bron: ESA/Gaia/DPAC - b) infrarood: koude stofdeeltjes die oplichten in infrarood, bron: ESA/NASA/JPL-Caltech - c) Röntgenstraling: De stipjes zijn röntgendubbelsterren, bron: JAXA/RIKEN/MAXI team.

drijvende factor in de vele processen die in het universum plaatsvinden. De belangrijke rol van stof in het universum laat zich het beste uitleggen door te kijken naar de levenscyclus van sterren, waar stof in elke fase van de cyclus een belangrijke rol vervuld, zie Figuur A.2. Sterren verrijken het universum met elementen, die worden geproduceerd in het nucleosynthese proces en door sterwinden of (super) novae de ruimte in worden geslingerd. Op deze manier verzorgen sterren het bouwmateriaal voor interstellair stof. Het stof wordt waarschijnlijk gevormd als een condensaat in de atmosferen van sterren die zich in een laat stadium van hun evolutie bevinden, in de nasleep van een geweldadige supernova explosie en wellicht in het

ISM zelf. Wanneer gas en stof in de ruimte samenpakken tot een zeer dichte wolk, kan er een nieuwe ster worden gevormd in de kern van zo'n wolk. Stof speelt een cruciale rol tijdens het formatieproces van de ster: van het instorten van de wolk onder de invloed van zwaartekracht tot het vormen van planeten. Kosmisch stof kan overal worden waargenomen: in ons zonnestelsel, rond jonge sterren, in gigantisch wolken, in de Melkweg, maar ook in ver weg gelegen sterrenstelsels en het is al heel vroeg in de geschiedenis van ons universum aanwezig. Om deze reden kan stof ons helpen om te begrijpen hoe het vroege universum zich heeft ontwikkeld. Naast de argumenten die hier al zijn gegeven, is er natuurlijk nog een andere reden die pleit voor het bestuderen van kosmisch stof. Wij en alles om ons heen bestaan uit dit stof. Als we de oorsprong van het leven op aarde willen begrijpen, is het dus noodzakelijk om te weten te komen wat de oorsprong van het stof is, waar het uit bestaat en hoe het wordt gevormd.



Figuur A.2: De levenscyclus van sterren en interstellair stof in vijf stadia: 1) geëvolueerde ster, 2) diffuse wolk, 3) dichte wolk, 4) protostellaire schijf en 5) evolved planetary system. stelsel met planeten. In iedere fase van stervorming speelt stof een cruciale rol. Bron: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF.

De eigenschappen van interstellair stof

Aangezien stof een belangrijke rol speelt in vele processen in het universum is het een essentieel onderdeel in vele astronomische modellen. Om nauwkeurige interstellaire stofmodellen te ontwikkelen is het belangrijk om onder andere te begrijpen wat de eigenschappen van het stof zijn, waar het stof uit bestaat, op welke manier het een wisselwerking aangaat met straling, wat de grootteverdeling is van de stofdeeltjes, wat hun vorm en interne structuur is, en of deze eigenschappen veranderen in verschillende omgevingen. Aangezien we weten welke elementen door sterren geproduceerd worden en in welke hoeveelheden, kunnen we de abundantie van een element (de aanwezige hoeveelheid vergeleken met waterstof) in de gas fase vergelijken

met astronomische waarnemingen[5]. Deze waarnemingen laten ons zien dat de abundantie van enkele elementen lager is dan verwacht, wat tot de conclusie leidt dat deze missende elementen opgesloten zitten in stofdeeltjes. Stof bestaat hoofdzakelijk uit koolstof (C), silicium (Si), ijzer (Fe), magnesium (Mg) en zuurstof (O). Als we deze informatie combineren met theorie, sterrenkundige waarnemingen (bv. infrarood spectroscopie) en studies van meteorieten, dan kan het stof in het interstellair medium in grote lijnen in twee hoofdgroepen worden opgedeeld; namelijk silicaten (bv., pyroxeen- en olivijntypes, vergelijkbaar met fijne zandkorrels op aarde) en koolstofhoudend stof (vergelijkbaar met roet), met daaraan toegevoegd oxiden (eg., MgO, SiO, SiO_2), carbiden (grotendeels SiC) en metallisch ijzer.

Desondanks zijn er nog veel onzekerheden wat betreft interstellair stof. We weten niet precies hoe en waar stof wordt geproduceerd en hoe de eigenschappen van stof veranderen in verschillende omgevingen. We willen weten wat er met stof gebeurd in de meest gewelddadige omgeving van het interstellair medium, waar stof wordt gebombardeerd met straling en kosmische deeltjes, en tevens wordt vernietigd door schokgolven. Deze invloeden veranderen mogelijk de interne structuur van het stof. Als de stofdeeltjes een kristallijne structuur hadden voor hun introductie in het interstellair medium, dan kunnen ze mogelijk deze structuur kwijtraken waarbij ze meer en meer amorf wordt, zie Figuur A.3. Bovendien weten we niet precies wat de chemische samenstelling van de stofdeeltjes is.

Dit proefschrift

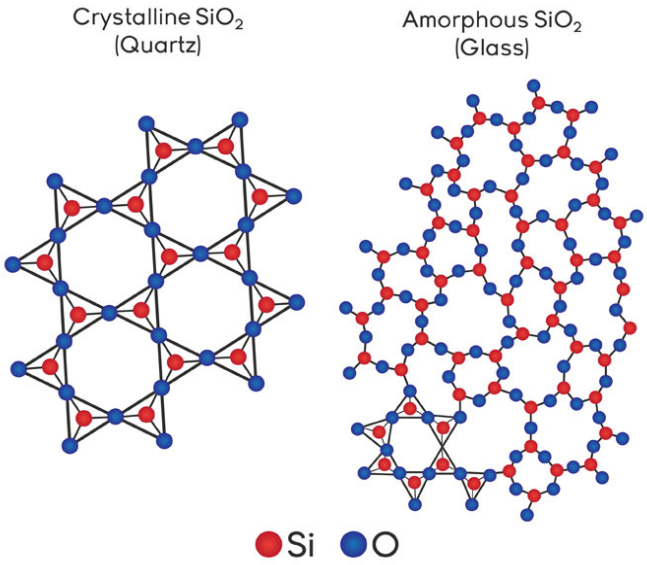
Hoge resolutie röntgenspectroscopie vormt een belangrijke techniek in de studie naar interstellair stof. Door spectrale kenmerken in röntgenspectra en verstrooiingshalos rond röntgenbronnen te bestuderen kunnen we -zoals eerder vermeld- wellicht enkele fundamentele vragen over interstellair stof beantwoorden. In dit proefschrift concentreren we ons op stof van het silicaattype, een van de hoofdbestanddelen van interstellair stof.

Röntgenstralen zijn buitengewoon geschikt om silicaten te bestuderen door de aanwezigheid van spectrale absorptiekenmerken van zuurstof, magnesium, silicium en ijzer in het röntgengebied van het spectrum. Deze elementen vormen de belangrijkste onderdelen van silicaten. We gebruiken met name het spectrale absorptiekenmerk van Silicium, ook wel de Si K-rand genoemd [6], om de eigenschappen van silicaatstof te onderzoeken. Voor elk type silicaatstof zijn de spectrale kenmerken in de rand, ook wel Röntgenabsorptiefijnstructuren (XAFS) een klein beetje verschillend. Dit betekent dat ze een unieke vingerafdruk voor het stof vormen.

Heldere lage massa Röntgen dubbelsterren in de melkweg zijn ideale bronnen om het tussenliggende stof en gas langs de zichtlijn te bestuderen, door ze simpelweg te gebruiken als lantaarns die door het interstellair medium schijnen, waarbij stof en gas de straling deels absorbeert en verstrooid. Deze bronnen bestaan uit twee onderdelen, een neutronenster of zwart gat dat materiaal verzameld van een buurster, gewoonlijk een normale hoofdreeksster (en dus geen reuzenster). Deze systemen zijn erg helder qua röntgenstraling, omdat het verzamelde

[5]Waterstof en helium, geproduceerd in de Oerknal, zijn de meest veelvoorkomende elementen in het universum. Alle zwaardere en minder veelvoorkomende elementen worden in de levenscyclus van sterren geproduceerd.

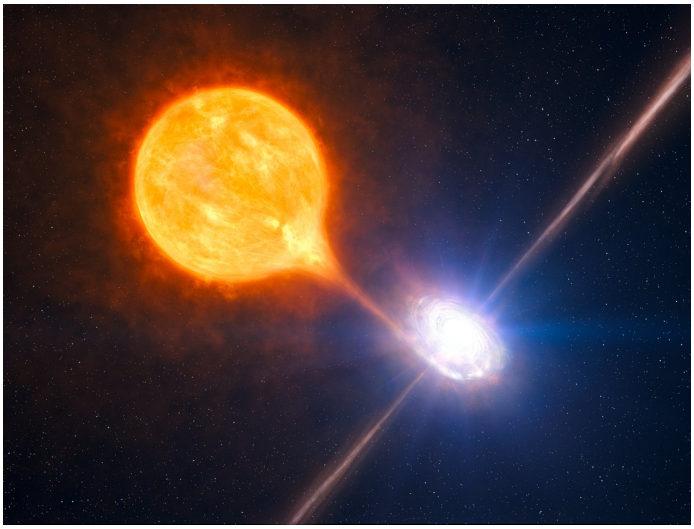
[6]Dit absorptiekenmerk komt voor op de ionisatie-energie van een kernatoom in de K-electronenschil van een siliciumatoom en ziet eruit als een rand of drempel.



Figuur A.3: Links het silicaat kwarts, dat een kristallijne structuur heeft. Rechts glas met dezelfde atomaire compositie, maar nu zonder de kristallijne geordendheid van de atomen (amorf). In quartz is ieder silicium atoom verbonden met vier andere silicium atomen via "zuurstof bruggen"en vormt daarmee een symmetrische tetraëder. Voor de duidelijkheid is het vierde silicium atoom en de daarbij behorende zuurstof brug weggelaten. Bron: NDT Resource Center, Center for NDE, Ioawa State University.

materiaal van de buurster een schijf vormt rond de neutronenster of het zwarte gat. Door de vrijkomende gravitationele energie van de invallende materie in de schijf zal deze in röntgenstraling oplichten, zie Figuur A.4 . De aardatmosfeer absorbeert röntgenstraling, waardoor we de straling afkomstig van de röntgendubbelsterren niet rechtstreeks vanaf de grond kunnen meten. Dit betekent dat we gebruik moeten maken van röntgentelescopen in die zich in de ruimte bevinden. In dit proefschrift maken we gebruik van data van het Chandra röntgenobservatorium, een röntgensatelliet gelanceerd in 1999. De spectra van dit observatorium zijn zeer bruikbaar voor stofstudies dankzij hun hoge spectrale resolutie. Bovendien kunnen we profiteren van het rijkgevulde Chandra data archief waarin vele spectra van röntgendubbelsterren zijn opgenomen.

In Hoofdstuk 2 gebruikten wij het spectrum van de röntgendubbelster GX 5-1 als een test om interstellair stof langs de zichtlijn naar deze bron te bestuderen. We gebruikten een set van zes verschillende silicaatmonsters, afkomstig uit de natuur of kunstmatig ontwikkeld in een laboratorium, en hebben hun röntgenspectra bij de Soleil synchrotronfaciliteit in Parijs gemeten. Deze metingen werden geschikt gemaakt voor toepassing in voor astronomische modellen om zodoende het spectrum van de Röntgendubbelster te verklaren. We concluderen dat de kristallijne olivijnsilicaten het beste het spectrum verklaren. Bovendien geeft een verstrooiingskenmerk net onder de absorptie-energie van de K-rand een aanwijzing voor de grootteverdeling van stofdeeltjes. De invloed van de aanwezigheid van grote deeltjes langs de

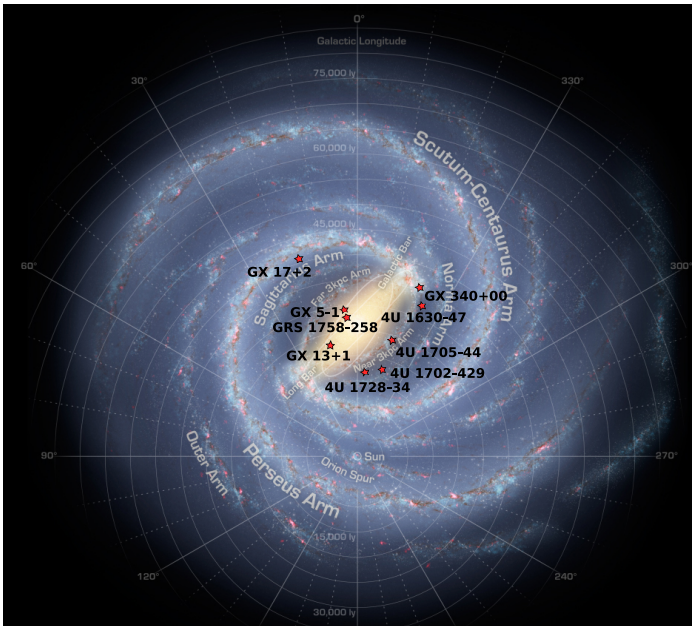


Figuur A.4: Artistieke weergave van een röntgendubbelster, bron: ESO/L. Calçada/M.Kornmesser.

zichtlijn is bestudeerd door de K-rand te modelleren met twee verschillende verdelingen van deeltjesgroottes. Hier vinden we indicaties voor de aanwezigheid van grote stofdeeltjes langs de zichtlijn naar GX 5-1.

In Hoofdstuk 3 hebben wij onze set van silicaatmonsters uitgebreid naar 14 en hun Silicium K-rand kenmerken in een tweede meetreeks bij de Soleil synchrotronfaciliteit in 2017 vastgelegd. We hebben ook het aantal waargenomen röntgendubbelsterren uitgebreid tot 9 bronnen waarvan de locatie te zien is in Figuur A.5. Deze bronnen bevinden zich in de dichtste gebieden van ons Sterrenstelsel en dit maakt het mogelijk om stof te verkennen in gebieden van ons Sterrenstelsel die anders moeilijk te bestuderen zijn. We vinden dat amorf olivijn dominant is in de meeste waarnemingen, maar dat er nog steeds een belangrijke bijdrage van kristallijne silicaten is. Dit is in tegenstelling tot eerdere resultaten in het infrarood, waar minder dan 2% van het stof als amorf wordt gedetecteerd. Dit verschil kan misschien worden toegewezen aan de gevoeligheid van XAFS voor korte afstandinteracties, terwijl in het infrarood metingen meer toegespitst zijn op lange afstandinteracties binnen de stofdeeltjes. Variaties in de abundantie van elementen tussen verschillende gebieden van ons Sterrenstelsel zijn een belangrijke factor in het begrijpen van de vorming en chemische evolutie van het Sterrenstelsel. De chemische samenstelling van de Galactische schijf varieert met tijd, aangezien sterren almaar het interstellair medium blijven verrijken. Normaal wordt in grote lijnen een toename in abundantie gemeten richting het Galactisch centrum. Wij vinden daarentegen dat in de binnenste gebieden van het Sterrenstelsel de abundanties van Silicium afvlakt en dichtbij het Galactische centrum zelfs afneemt. Dit kan wellicht worden veroorzaakt door een toename in grootte van de typische silicaatkorrels of door verschillen in de chemische evolutie van de Galactische kern vergeleken met de schijf van het Sterrenstelsel.

In Hoofdstuk 4 onderzoeken we de mogelijkheden van absorptierandstudies met toekom-



Figuur A.5: Artistieke weergave van een bovenaanzicht van de Melkweg, gebaseerd op infraroodbeelden van de Spitzer Space Telescope van de NASA. De rode sterren geven de positie van de LMXB's aan. Bron: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt

stige ruimtetelescopen: XARM (2021), Arcus (2023) en Athena (2028). We concentreren ons op de K-rand van koolstof, zwavel, aluminium, nikkel, titanium en calcium. In de relatief nabije toekomst zal de depletie en abundantie van deze elementen met zekerheid worden bepaald. In het geval van koolstof en zwavel zal ook de chemische samenstelling van het absorberende stof kunnen worden bepaald. Voor aluminium en calcium zullen - ondanks de grote depletie in het interstellair medium en de prominente absorptie door stof- in vele gevallen de spectrale rand kenmerken niet significant veranderen, zelfs wanneer er een verandering in de chemische samenstelling van de aluminium en calcium-houdende stoffen plaatsvindt. Het extinctiesignaal van grote stofkorrels kan worden gedetecteerd en gemodelleerd, waardoor het mogelijk wordt verschillende verdelingen van stofdeeltjesgroottes te testen. De lage kosmische abundantie van titanium en nikkel zullen helaas een gedetailleerde studie van spectrale rand kenmerken belemmeren.

In het laatste hoofdstuk, Hoofdstuk 5, verkennen we de mogelijkheid om het verstrooien van röntgenstralen door stofdeeltjes in een puinschijf rond een ster te meten. We zien dat modellen met een relatief sterke sterrenwind en een samenstelling van silicaten en grafiet een verstrooiingshalo in theorie kunnen versterken. Na het vergelijken van modellen met waarnemingen van een stelsel met een ster en een schijf vinden we dat deze modellen geen significant verstrooiende halo genereren, wanneer we dit meten met de huidige scherpte van röntgentelescopen. Met behulp van toekomstige röntgenmissies kan deze röntgenhalo rond sterren met puinschijven wellicht wel gemeten worden.

Tot slot, dit proefschrift laat zien dat röntgenspectroscopie een krachtige methode is om fundamentele vragen over interstellair stof te beantwoorden. In de nabije toekomst, als nieuwe breedband extinctiemodellen worden gecombineerd met de spectra van toekomstige röntgentelescopen zal deze methode lang lopende onzekerheden in modellen weghalen. Momenteel -zoals gepresenteerd in dit proefschrift- biedt de Silicium K-rand in spectra van röntgendubbelsterren al belangrijke inzichten in de chemie van interstellair silicaatstof.

"We are stardust, we are golden
We are billion year old carbon"

Woodstock - Crosby, Stills and Nash, written by Joni Mitchell