

De weg terug

Van Kinsarvik reden we in zuidelijke richting, naar Odda, vandaar naar Seljestad langs de zuidrand van de Hardangervidda. Bij Haukeligrend vonden we aan de rand van een bos het langgezochte Linnaeusklokje in volle bloei. Via Hortten namen we het veer over het Oslofjord naar Moss. Bij Frederikstad kampeerden we nog enkele dagen. Bij de VVV aldaar kregen we een gratis beschrijving van de 'Sagazeitweg'. We hebben genoten van onze tocht langs deze weg. Bij Hornes en Solberg enkele grote grafheuvels ge-

zien, waarbij vele mooie zwerfstenen lagen. Prachtige rotstekeningen bij Begby. De kale rotsen in het mooie landschap tonen landbouwers achter de ploeg, bespannen wagens, een boer bij zijn koeien, de hond erbij. Je ziet de boer naar zijn land gaan! Daarna langs Gotenburg, Hälsingborg, Helsingör, dwars door Denemarken terug in Holland. Ik kan u deze reis aanbevelen!

Adres van de auteur:

Draafsingel 36
1623 LB Hoorn

Literatuur

ANWB Reisgids door Noorwegen

Holtehadal, O en J.A. Dons, 1966. Geological Guide to Oslo and District. Universitetsforlaget.

Pannekoek, A.J. e.a., 1973. Algemene Geologie. Tjeenk Willink.

Rutten, M.G., 1967. The Geology of Western Europe, Chapter 2 and 3. Elsevier Publishing Comp.



De oermaterie van ons Zonnestelsel

Dr. J. van Diggelen

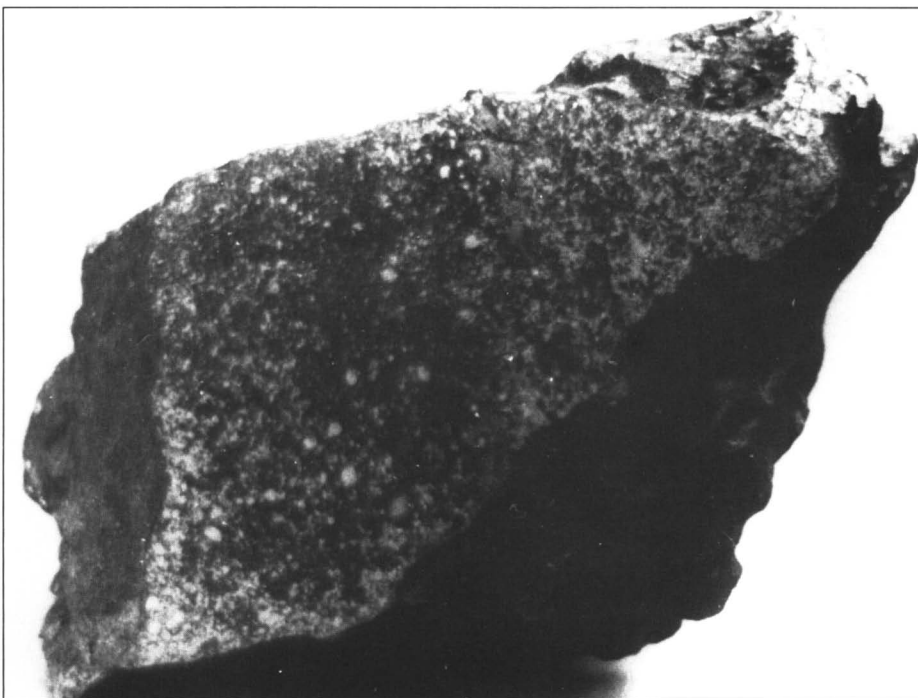
De alleroudste gesteenten die wij kennen, zijn niet van Aardse herkomst, maar komen uit de ruimte. Het zijn bepaalde soorten meteorieten chondrieten genoemd die een belangrijke plaats innemen bij het onderzoek naar het ontstaan en de eerste levensjaren van ons Zonnestelsel.

De naam van deze interessante groep meteorieten is afkomstig van het Griekse woord 'chondros', hetgeen korrel of zaadje betekent. Stenen van dit type bestaan inderdaad uit een matrixmassa, een soort 'deeg', waarin een groot aantal ronde insluitsels zitten die chondrieten genoemd worden, precies zoals krenten in krentenbrood. Chondrieten zijn oud. Hun ouderdom bepaalt

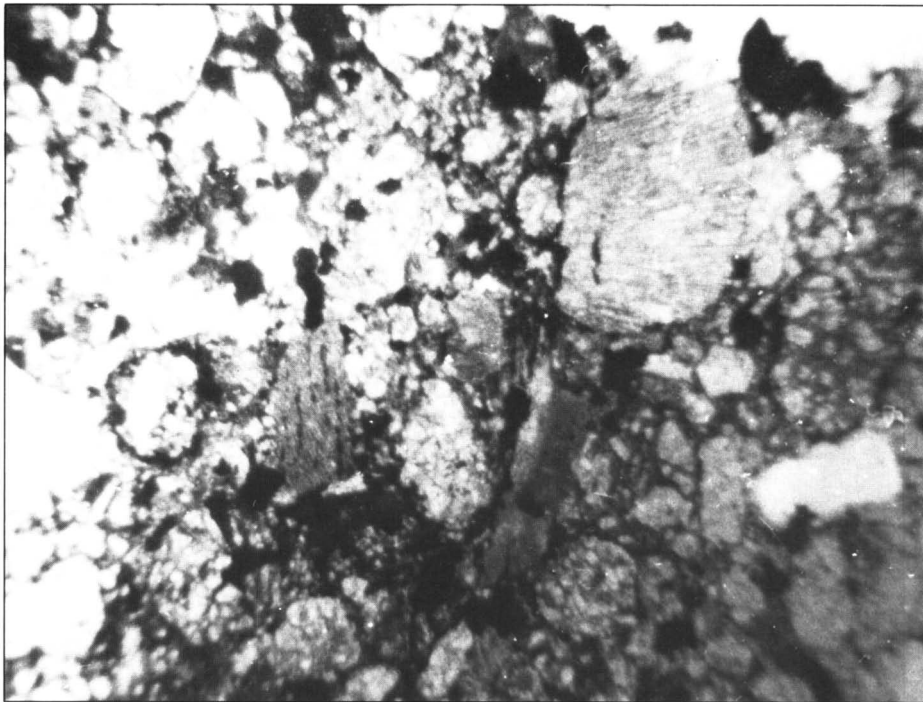
men met behulp van rubidium-strontium isotopen. Het element rubidium komt deels voor in de vorm van het isotoop rubidium⁸⁷. Dat zijn radioactieve kernen, die na verloop van tijd uiteenvallen, waarbij strontium⁸⁷, een isotoop van het element strontium, ontstaat. Na ongeveer 49 miljard jaar is de helft van een hoeveelheid rubidium⁸⁷ uiteengevallen (dit tijdsverloop heet de

halveringstijd). Behalve het door dit proces ontstane isotoop strontium⁸⁷, zit er ook strontium⁸⁶ in het gesteente, dat niet door dit proces is ontstaan. Het is een stabiel element en daarom worden de hoeveelheden hiervan steeds ten opzichte van strontium⁸⁶ gemeten. De hoeveelheid strontium⁸⁷ neemt dus geleidelijk toe ten opzichte van strontium⁸⁶, terwijl de hoeveelheid rubidium⁸⁷ afneemt. Als we uitgaan van bijvoorbeeld een gesteente met twee mineralen erin waarvan een van de mineralen tijdens het ontstaan van het gesteente tweemaal zoveel rubidium⁸⁷ bevatte dan het andere (in beide mineralen ten opzichte van strontium⁸⁶). Na verloop van tijd zit er in het eerste mineraal dan ook tweemaal zoveel strontium⁸⁷ als in het tweede. Zetten we in een grafiek de hoeveelheid strontium⁸⁷ uit tegen de nog aanwezige hoeveelheid rubidium⁸⁷ voor de mineralen in dezelfde steen, dan liggen de meetpunten keurig op een rechte lijn. Zo'n lijn wordt isochron genoemd.

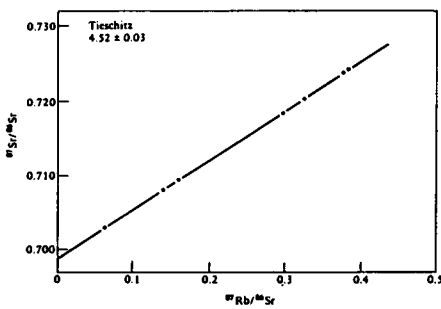
Hoe ouder de steen wordt, hoe meer rubidium⁸⁷ er is omgezet en hoe meer strontium⁸⁷ er is gevormd. Het gevolg is dat alle meetpunten op de rechte lijn naar links en omhoog schuiven, maar de hogere meer dan de lagere, dus blijven ze op een rechte lijn liggen. Hoe steiler de lijn dus verloopt hoe ouder de steen is. Zo vinden we bijvoorbeeld een ouderdom van 4,52 miljard jaar voor de meteoriet van Tieschitz, een in Tsecho-Slowakije gevallen chondriet.



De Kediri is een gewone chondriet van het type L 4. Dit fragment is een stukje van de 70 brokken die in 1940 op Java bij Kediri vielen en waarvan de grootste steen (3,3, kg) in Amsterdam is onderzocht. (Collectie en foto Th. van Dijk).



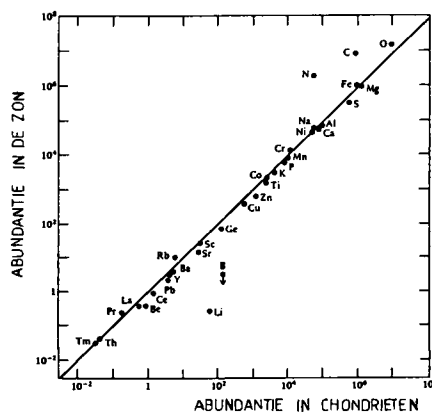
Op een foto van een slijpplaatje van de chondriet Kediri, zijn de chondrulen als ronde objecten zichtbaar (vergroting 20 X). (Foto Th. van Dijk).



Radioactieve rubidiumkernen (Rb^{87}) vervallen in de loop van de tijd tot strontium (Sr^{87}). Door een hoeveelheid van beide in verschillende mineralen (ten opzichte van het stabiele element strontium⁸⁶) in een steen precies te meten, krijgen we een aantal meetpunten die op een rechte lijn liggen. Deze wordt isochroon genoemd. Hoe steiler die lijn verloopt, hoe meer radioactief rubidium is omgezet, dus hoe ouder de steen is. De Tieschitz-chondriet werd zo op 4,52 miljard jaar gedateerd.

Drietel soorten

Chondrieten bestaan uit zeer oud materiaal, kort na het ontstaan van het Zonnestelsel gevormd. Jodium¹²⁹ is ook een radioactief isotoop dat in xenon¹²⁹ overgaat. De halveringstijd is echter 'slechts' 16 miljoen jaar, zodat na ca. 100 miljoen jaar bijna geen spoor van het jodium over is. Als er echter veel jodium¹²⁹ geweest is, moet

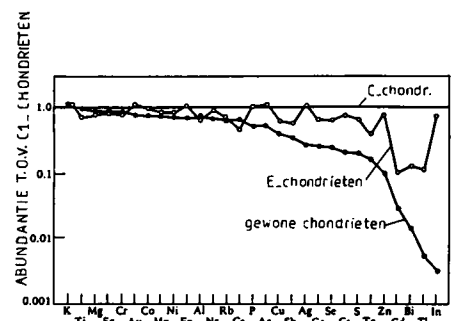


De hoeveelheid van de chemische elementen in de koolstofhoudende chondrieten is voor de meeste elementen bijna gelijk aan die in de Zon. Vandaar dat de meetpunten in een vergelijkende grafiek nagenoeg op een rechte lijn vallen. Deze lijn heet 45°. Blijkbaar bestaan zulke meteorieten uit de oermaterie van ons Zonnestelsel. Beide schalen zijn logaritmisch en alle metingen zijn ten opzichte van een miljoen atomen silicium).

dat zich nu manifesteren in extra veel xenon¹²⁹. Met een massaspectrome ter kunnen de hoeveelheden van de verschillende xenon-isotopen in chondrieten goed worden vergeleken. Er blijkt inderdaad altijd extra veel xenon¹²⁹ aanwezig ten opzichte andere xenon-isotopen.

De chemische samenstelling van de chondrieten is uitgebreid bestudeerd.

Zeer interessant is de grafiek van de hoeveelheid (de abundantie) van elk chemisch element in chondrieten in vergelijking met de hoeveelheid in de Zon. (Alle metingen worden uitgevoerd ten opzichte van een miljoen atomen silicium). Bij de meeste elementen is er een zeer goede overeenkomst, zoals is te zien op een grafiek: ze volgen de rechte lijn. Geen enkel Aards gesteente zou dat zo mooi doen, omdat allerlei geologisch processen het Aardse gesteente hebben veranderd. De elementen die afwijken van de rechte lijn zijn of sterk vluchtig, zoals waterstof, helium en dergelijke, of ze nemen deel aan kernreacties in de Zon. Toch blijkt bij een zeer nauwkeurige analyse, dat er kleine verschillen zijn in de chemische samenstelling van diverse chondrieten. Aan de hand hiervan is een drietal soorten onderscheiden. Tot de meest voorkomende soort behoren de gewone chondrieten. Deze zijn verder onderverdeeld in een subgroep met extra veel ijzer, de H-groep (van high), een subgroep met weinig ijzer, de L-groep (van low) en een derde subgroep met nog veel minder ijzer, de LL-groep. Daarnaast bevatten de koolstofhoudende chondrieten, een groep die met C wordt aangeduid, grotere hoeveelheden van stoffen die gemakkelijker in damp overgaan. Zij moeten dus bij lagere temperaturen in de oerzon zijn gevormd dan de gewone chondrieten. Ze zijn zeer broos en los samenhangend, zodat er moeilijk slijpplaatjes van zijn te maken. Tenslotte wordt er nog een tussengroep onderscheiden, de enstatiet chondrieten, aangeduid met E. Deze ontleen hun naam aan de grote hoeveelheid van het mineraal enstatiet.



Bij nauwkeurig onderzoek blijken de gewone chondrieten en de enstatiet-chondrieten chemisch kleine verschillen te vertonen met de koolstofhoudende chondrieten, die het meest in samenstelling met de Zon overeenkomen. Blijkbaar ontstond elke soort uit zijn eigen 'oerplaneetje'.

Chondrulen

Het fijne matrix-materiaal, het 'deeg' waar de chondrulen als 'krenten' inzitten, bestaat meestal uit zeer kleine kristalletjes van olivijn en pyroxeen vermengd met allerlei bijbehorende stoffen zoals sulfiden, oxiden en kleimineralen. Andere soorten bevatten grafiet gemengd met magnetiet, een ijzeroxide.

De zich in de matrix bevindende korrels, de chondrulen, zijn zo genoemd door de Duitse mineraloog Rose in 1864. Ongeveer in dezelfde tijd concludeerde de Engelse onderzoeker Sorby, de uitvinder van de petrografische mikroscoop, dat het gekristalliseerde druppels waren, die eens vloeibaar waren en moeten zijn afgekoeld voordat ze in de chondrieten werden ingesloten. Ze komen in geen enkel ander soort gesteente voor, behalve misschien in de vorm van kleine bolletjes in enkele Maanstenen die zijn ontstaan door smelten tijdens inslagen. Om chondrulen te smelten zijn hoge temperaturen nodig. Experimenteel is vastgesteld, dat ze uiterst langzaam, slechts enkele graden of minder per minuut, zijn afgekoeld. Behalve chondrulen bevatten sommige chondrieten onregelmatig gevormde witte insluitels die op grond van hun chemische samenstelling als calcium-aluminiumsluissels worden aangeduid. Sommige van die insluitels bevatten op hun beurt weer kleine korreltjes platina of andere legeringen van zeldzame metalen, die Fremdlinge genoemd worden.

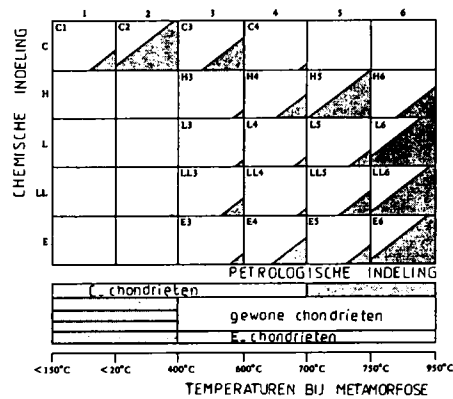
Radioactieve processen in de chondrieten produceren vooral kort na hun ontstaan aanzienlijke hoeveelheden warmte, die niet gemakkelijk konden ontsnappen, omdat steen een slechte warmtegeleider is. Dit is waarschijnlijk de oorzaak geweest van in sommige chondrieten opgetreden metamorfe processen, waarbij de materie zich aan de nieuwe thermische condities aanpaste. Het gevolg ervan was, dat in sommige verhitte chondrieten de oorspronkelijke chondrulen niet meer zijn te herkennen. Een ander gevolg was, dat eventueel aanwezig glas is uitgekristalliseerd. Op grond van veranderingen in bouw en mineralogie zijn op deze manier zes stadia van metamorfisme in chondrieten te onderscheiden. Samen met de reeds besproken chemische classificatie vormen deze petrologische typen de momenteel gangbare indeling van de chondrieten.

In zo'n schema is duidelijk te zien, dat de koolstofhoudende chondrieten het minst te lijden hebben gehad van me-

tamorfe processen, omdat ze bij betrekkelijk lage temperaturen ontstaan zijn en nooit verder verhit. Daarom worden ze vaak als de oermaterie van het Zonnestelsel opgevat.

Oerplaneet

Toch zijn ook de koolstofhoudende chondrieten wel veranderd, vooral door circulerende vloeistoffen. Uit de daardoor opgetreden veranderingen schat men dat er door een C2-chondriet een volume water van de grootte van de steen moet zijn gestroomd met een temperatuur van minder dan 20° C. C1-chondrieten verbleven in een warmere en vochtiger omgeving van ongeveer 140° C. De oorspronkelijke matrix in de meeste koolstofhoudende chondrieten is omgezet in een hoop waterhoudende mineralen, die phyllosilicaten worden genoemd en wel wat lijken op Aardse kleisoorten.



De chemische indeling van de chondrieten in koolstofhoudende chondrieten (C), gewone chondrieten (H, L en LL) en enstatiet-chondrieten (E) is te verfijnen door rekening te houden met de metamorfe veranderingen die ze na hun ontstaan in hun oerplaneet ondergingen. We kunnen hierdoor vier klassen onderscheiden naarmate ze door hogere temperaturen werden aangetast. Zo blijkt dat gewone chondrieten meer veranderd zijn dan koolstofhoudende chondrieten. Alleen de laatste groep bevat type 1 en 2, die het best bewaard zijn gebleven. De gearceerde driehoekjes corresponderen met het aantal meteorieten in die klassen in procenten.

Het is natuurlijk belangrijk om te weten wanneer deze omzettingen plaats hebben gevonden. De rubidium-strontium isochronen worden door metamorfe processen opnieuw ingesteld en hun ouderdom (ca. 4,45 miljard jaar) wijst er op, dat de metamorfe omzettingen binnen 100 miljoen jaar na het ontstaan zijn opgetreden. Dat klopt met de veronderstelling dat verhitting door radioactieve stoffen met korte levensduur de oorzaak er van was. Ook de doordringing door waterige oplossing vond kort

na het ontstaan plaats. Vloeibaar water, ontstaan door verhitting van ijs door kortlevende radioactieve kernen, kan maar een paar honderd miljoen jaar aanwezig zijn geweest.

De chondrieten moeten deel hebben uitgemaakt van een oerplaneet (of enkele oerplaneten) en zijn daaruit weggeslagen. Inslagen in zulke hemellichamen kunnen brokstukken er van wegslingeren of, als ze niet te groot zijn, zulke hemellichamen volledig in stukken breken. De chondrieten kunnen dus diverse inslagen hebben meegemaakt, voordat ze zelf uit hun oerplaneet werden vrijgemaakt. Zulke inslagen produceren onder meer breksies en inderdaad blijkt 25% van de H, 10% van de L en 62% van de LL chondrieten breksies te zijn, die insluitels ('clasts') blijken te bezitten van dezelfde soort chondritisch materiaal, maar van verschillende graad van metamorfisme. Blijkbaar onderging elk oerplaneetje een reeks metamorfe processen en inslagen wierpen diepgelegen en dus sterk gemetamorfiseerd materiaal, omhoog, waar het vermengd werd met minder omgezet oppervlaktegesteente. De inslagen gaan gepaard met hevige trillingen van de bodem waardoor het gesteente rondom de plaats van de inslag sterk wordt geschokt. Het ondergaat schokmetamorfisme waardoor wijzigingen optreden in de kristalstructuur en er kan glasvorming optreden of zelfs kan er een deel smelten.

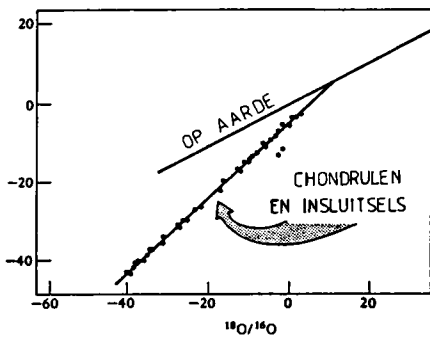
Voortdurend botsingen

Ook het tijdstip van zo'n schok kan gedateerd worden. Radioactief kalium⁴⁰ gaat over in het gas argon⁴⁰ en bij zo'n inslag kan de temperatuur voldoende zijn om al het aanwezige argon te laten ontsnappen. Daarna begint er uit het overgebleven kalium⁴⁰ opnieuw argon⁴⁰ te ontstaan en dat blijft in de steen ingesloten en de daaruit bepaalde ouderdom levert ons dus de tijd die verliep sinds de meteoriet zijn laatste hevige thermische storing ondervond. De gevonden waarden variëren van 0,5 tot 4,4 miljard jaar. Blijkbaar zijn er in ons Zonnestelsel voortdurend botsingen opgetreden tussen reeds aanwezige chondrieten en daardoor ook verse kleinere chondrietbrokstukken gevormd.

Al die latere gebeurtenissen hebben de in de chondrieten vastgelegde gegevens over het ontstaan en het begin van de oerplaneten van ons Zonnestelsel drastisch verward en het is dus een grote prestatie dat wij nog iets over die gebeurtenissen te weten kunnen komen. Het beste resultaat leverden ech-

ter de chondrieten op die het het minst van de veranderingen hebben geleden, die van type 3.

Volgens de meest gangbare hypothese ontstond ons Zonnestelsel uit een wolk interstellair gas en stof, die onder invloed van de zwaartekracht begon samen te trekken waardoor zich een centrale massaconcentratie vormde, de oerzon. Door de rotatie kreeg de overgebleven gaswolk de vorm van een platte schijf, de Zonnenevel. Een deel van het stof was door de bij de samentrekking vrijkomende warmte verdampt en recondenseerde bij latere afkoeling, werd vloeibaar en uit de druppels vormden zich mineralen. De resten hiervan vinden we nu nog terug in het matrixmateriaal van chondrieten. De chondrulen en bepaalde andere insluitels condenseerden echter niet uit vloeibare materie. Het zijn overgebleven interstellaire korrels uit de oernevel, die slechts gedeeltelijk zijn gesmolten, terwijl de meer vluchtige materie verdampte.



De verhouding van de zuurstofisotopen (O^{18} , O^{17} en O^{16}) van alle Aardse materie blijft onveranderd bij metamorfe processen. Zet men echter de verhouding van zuurstof $^{17/16}$ uit tegen die van $18/16$ voor chondrulen en insluitels van chondrieten, dan volgt die een andere rechte lijn. Deze wijkt af van die van het Aardse materiaal door een verrijking aan zuurstof 16 . Deze zuurstof 16 is waarschijnlijk in de Zonnenevel van buiten ons Zonnestelsel binnengedrongen voor het ontstaan van Aarde en planeten.

Die korrels vertellen ons echter nog meer. Het element zuurstof komt voor in de vorm van drie stabiele isotopen: zuurstof 16 , zuurstof 17 en zuurstof 18 . Door bepaalde processen kan hun verhouding zich wijzigen, omdat ze verschillen in massa, maar als er bij een bepaald proces bijvoorbeeld tweemaal meer zuurstof 16 verdwijnt dan zuurstof 17 , dan zal er ook tweemaal meer zoveel zuurstof 17 verdwijnen dan zuurstof 18 . Met andere woorden: de verhouding $17/16$ blijft gelijk aan die van $18/17$ of is tweemaal die

van $18/16$. Zetten we de verhouding $17/16$ van door allerlei processen veranderde Aardse gesteenten uit tegen de verhouding $18/16$, dan liggen de meetpunten keurig op een rechte lijn. Dat doen de metingen van de zuurstofisotopen in de chondrulen en de insluitels in C-chondrieten ook, maar.... ze volgen een andere rechte lijn en bevatten een grote hoeveelheid zuurstof 16 . Blijkbaar is de gewone materie van de Zonnenevel verrijkt met korrels die zuiver zuurstof 16 hebben bevat. Nu kan door bepaalde chemische reacties tijdens een sterexplosie (een zogenoemde supernova-vorming) alle zuurstof in zuurstof 16 worden omgezet. Materie van zo'n supernova is in de Zonnenevel binnengedrongen en heeft zich gemengd met de daar aanwezige materie, waarbij chondrulen ontstonden. Ook de grotere hoeveelheid magnesium 26 in de insluitels wijst misschien in deze richting. Het radioactieve element aluminium 26 ontstaat door kosmische straling, die waarschijnlijk het gevolg is van een supernova-explosie. Omdat dit element in zeer korte tijd tot magnesium 26 vervalt, moet het ook kort na de explosie in de insluitels terecht zijn gekomen, zodat de supernova blijkbaar vrij dicht bij onze Zonnenevel moet zijn geëxplodeerd. De schokgolven van deze explosie persten het interstellair gas en stof samen en vormden zo klompen materie waarvan een tot onze Zonnenevel evolueerde. Zo was die supernova de oorzaak van het ontstaan van ons Zonnestelsel.

Aminozuren

Een interessant aspect van het onderzoek van de chondrieten was ook de ontdekking van mogelijke organische deeltjes in deze meteorieten. In een direct na de val opgeraapt fragment van de op 14 mei 1864 gevallen meteoriet van Orgueil, werden koolwaterstoffen aangetroffen in een 50 maal grotere concentratie dan in Aardse gesteenten. Speciaal in C-chondrieten zijn ze uitgebreid onderzocht. Zelfs meenden de onderzoeker Claus en zijn medewerkers deeltjes in zulke stenen te zien, die ze voor fossiele organismen hielden, ééncellige structuren of algen. In de op 28 september 1969 bij het stadje Murchison gevallen C-chondriet, werden 18 aminozuren ontdekt, waarvan een twaalfal (de meest voorkomende) zeer zeldzaam is in Aardse organisch materiaal. Bijna alle Aardse organismen zijn opgebouwd uit eiwitten, die aminozuren bevatten. Deze draaien het polarisatievlak van doervallend licht naar links. Men veronderstelt echter dat in de oerzee van de Aarde, in het Precambrium, evenveel links als rechtsdraaiende aminozuren ontstonden, maar dat de eiwitmoleculen bij hun ontstaan slechts een bepaalde soort prefereerden en dat waren dan (toevallig?) op Aarde de linksdraaiende. Merkwaardig is dat in de C-chondrieten evenveel links- als rechtsdraaiende aminozuren, de bouwstenen van de levende organismen, voorkomen.

Adres van de auteur:
Aetveldselaan 12, 1381 EA Weesp



Gigantische sterexplosies veroorzaken tijdelijk helder opvlammende sterren, die supernova's genoemd worden. Na vele jaren wordt het overblijfsel van zo'n supernova omringd door een nevel, zoals de hier afgebeelde uit het sterrenbeeld Vulpecula. De insluitels in de chondrieten bevatten aanwijzingen, die suggereren dat zo'n supernova misschien ook de oorzaak was van het ontstaan van ons Zonnestelsel, inclusief onze Aarde.