

Ouderdomsbepaling

door Dr. J. van Diggelen

Voor die lezers, die een gedegen kennis van de grondslagen van de moderne natuurkunde bezitten is het eerste gedeelte van het hier volgende artikel wellicht niet meer interessant. Zij kunnen misschien in het tweede gedeelte meer van hun gading vinden.

Moderne ouderdomsbepalingen van gesteenten maken gebruik van de radioactiviteit. In 1896 ontdekte de Franse natuurkundige Becquerel dat uraniumzouten onzichtbare straling uitzenden, die afgesloten fotografisch materiaal belicht. Madame Curie vond, dat het scheikundige element thorium deze eigenschap ook bezit. Enkele uraniummineralen bleken zelfs nog veel sterker te stralen dan zuiver uranium. Die moesten dus nog een onbekend element bevatten met een veel heftiger werking. Uit pechblende slaagde Marie Curie er in samen met haar man Pierre het radium te isoleren. Zij noemde het stralingsverschijnsel **radioactiviteit**. Om de werking van die radioactiviteit te begrijpen is het noodzakelijk diep in de natuurkunde van de atomen te duiken. Alle amateurgeologen weten uiteraard, dat een gesteente is opgebouwd uit een of meer mineralen. Zo'n mineraal bezit een bepaalde scheikundige samenstelling, die men weergeeft door een (soms vrij ingewikkelde) formule. Het allerkleinste deeltje van een mineraal is een **molekuul**. Zo'n molekuul is soms een betrekkelijk ingewikkeld bouwsel, dat is samengevoegd uit een aantal verschillende bouwstenen. Het aantal bouwstenen van een molekuul kan soms zeer groot zijn, maar soms is het ook maar een. Er zijn een groot aantal verschillende soorten van die bouwstenen. Deze heten **atomen**. Voor ieder soort atoom is er een bepaald symbool ontworpen. Zo wordt een atoom calcium Ca, een atoom koolstof C, een atoom zuurstof O genoemd. Het ons allen bekende calciëet is CaCO_3 . Een molekuul calciëet bestaat dus uit een atoom calcium, een atoom koolstof en drie atomen zuurstof. Er bestaan nog steeds amateurgeologen, die de voor de verschillende atomen in gebruik zijnde afkortingen niet kennen. Het is een dankbare maar taaie taak dat zo spoedig mogelijk te leren. Dan is immers iedere chemische formule, die men in "Gea" ontmoet een normale leesbare zaak geworden.

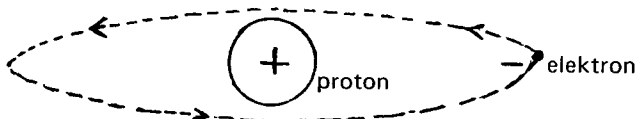
Wij moeten echter nog veel dieper graven in de elementaire opbouw van de materie om de radioactiviteit te kunnen begrijpen. Het allereenvoudigste atoom is dat van het element waterstof (figuur 1). Daar waterstof onder bijna alle in het heelal voorkomende natuurlijke omstandigheden een gas is, zult U het niet in de vorm van kristallen kennen. Een zo'n

waterstofatoom zou men zich kunnen voorstellen als een miniatuurbolletje met een minime kleine satelliet, dus op fantastisch kleine schaal zoiets als de aarde met haar maan. Die "miniatuuraarde" zelf is in dit geval de kern van het atoom. Deze wordt ook wel een **proton** genoemd. Het is een uiterst klein deeltje met een massa van $1,67 \times 10^{-27}$ kg (die -27 boven de tien betekent dat er voor de 1,67 eigenlijk 27 nullen behoren te staan, uitgeschreven is de massa dus 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 67 kg). Deze kern is positief elektrisch geladen en om haar heen beweegt zich net als bij de echte aarde haar "maan", het negatief geladen **elektron**, waarvan de massa nog eens 1800 keer kleiner is dan van de kern zelf. Hun lading is echter even groot, maar tegengesteld. Zij trekken elkaar daardoor aan met een elektrische kracht, immers positief en negatief geladen deeltjes trekken elkaar aan.

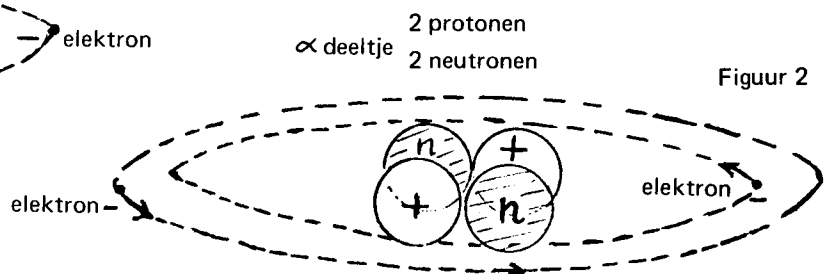
Als U nu meent een mooi idee te hebben van een waterstofatoom moet ik U bitter teleurstellen. Niemand heeft ooit deze kleine deeltjes "gezien" en het U door mij geschetste model is afkomstig van de natuurkundige Rutherford. Er zijn echter belangrijke argumenten die ons tegenwoordig dwingen om dit model als onjuist of althans als onvolledig aan te duiden. Voor ons zijn die echter niet van belang om het proces van de radioactiviteit te begrijpen. Daarom stel ik U voor ons tot dit soort simpele modellen te beperken, maar wel in gedachte te houden dat er betere (maar veel moeilijker voorstelbare) modellen bestaan.

Waterstof is het lichtste en het kleinste atoom. Het maakt deel uit van diverse mineralen. Het in gewicht op waterstof volgende element uit de scheikunde is **helium**. Een heliumatoom (figuur 2) bestaat uit een kern met daaromheen twee elektronen. Beide hebben een even grote negatieve lading, het zijn dezelfde soort deeltjes als die om de waterstofkernen cirkelen. Daar een heliumatoom neutraal is moet de kern wel twee maal zo sterk positief geladen zijn als die van waterstof. Zo'n heliumkern is dan ook een wat grotere bouwsteen. Het blijkt uit twee protonen te bestaan met daarenboven nog twee **neutronen**. Dat zijn ongeladen (dus neutrale) deeltjes ongeveer even zwaar als een proton. Een heliumkern wordt ook wel met de naam **alpha-deeltje** aangeduid, terwijl een elektron wel eens een **beta-deeltje** heet.

Lithium is de volgende in de lange reeks der chemische bouwstenen. Het bevat drie elektronen per atoom en de kern bestaat uit drie protonen en drie neutronen. De massa is derhalve ongeveer zes maal zo zwaar als die van het proton. Zo kunnen we doorgaan en een groot aantal chemische elementen onder de loep nemen. We beperken ons



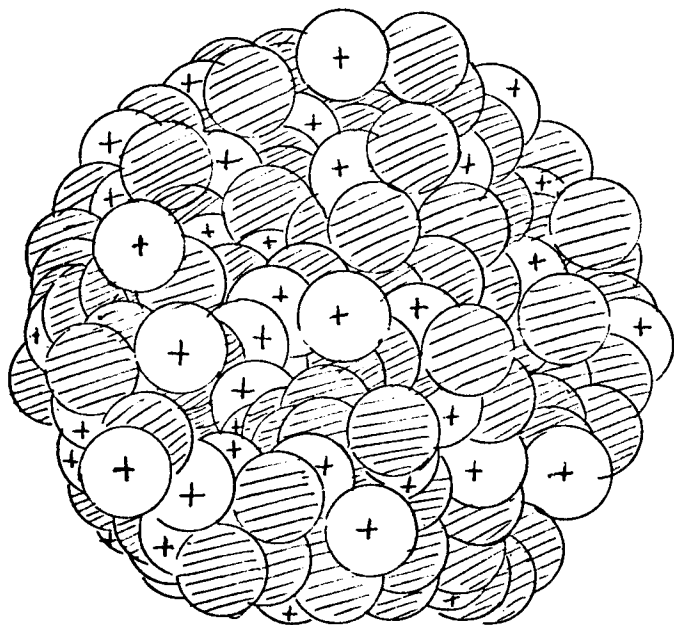
Figuur 1



Figuur 2

verder maar tot een voorbeeld. Lood is een metaal, dat als atoom bestaat uit een bouwsel van 82 elektronen, die we ons in gedachte om een kern zien cirkelen, die uit 206 deeltjes kan bestaan. Hiervan zijn dan 82 protonen (evenveel protonen als negatieve deeltjes) en er moeten derhalve nog 124 neutronen aanwezig zijn. Bij zulke grote kernen is het aantal protonen steeds even groot, maar het aantal neutronen verschilt wel eens een beetje. Zo bestaat er ook lood, waarvan de kern slechts 122 neutronen bevat, zodat er daar in het totaal maar 204 deeltjes in de kern verblijven. Zo zijn er nog wel meer loodkernen bestaanbaar met een ander aantal neutronen. We spreken in zo'n geval van **isotopen**. Chemisch zijn ze niet van elkaar te onderscheiden, het is allemaal lood. Natuurkundig echter is er een heel klein verschil, de kernen met minder neutronen zijn lichter. Daarvan maakt men gebruik als men ze wil scheiden. Een toestel waarmee dat gebeurt is de **massaspectrograaf**. Een beroemd voorbeeld van een isotoop van waterstof is het zware waterstof of **deuterium**, waarvan de kern uit twee deeltjes bestaat, een neutron en een proton. Maakt zo'n kern deel uit van de stof water (H_2O) dan spreken we van zwaar water.

Een zware kern zoals lood bevat dus veel meer neutronen dan protonen (figuur 3). Dat dit wel zinvol is, blijkt als U



Figuur 3

eens over de stabiliteit nadenkt. We brachten U al in herinnering dat positieve en negatieve deeltjes elkaar aantrekken. Dat is de oorzaak van het feit, dat het elektron om de kern blijft draaien in een waterstofatoom, omdat beide elkaar aantrekken. Ook al weer net als de aarde en de maan in de macrowereld. Nu meent U misschien, dat positieve deeltjes elkaar onderling afstoten (negatieve trouwens ook). Ten dele heeft U zelfs gelijk. Een zware kern zou dan echter maar een onmogelijk bouwsel zijn, als de protonen er in elkaar zouden afstoten. Daarom moet men wel veronderstellen dat zulke deeltjes met onderling gelijksoortige ladingen zoals protonen elkaar alleen maar afstoten als ze zich niet al te dicht bij elkaar bevinden. Twee **nucleonen**, dat zijn kerndeeltjes zoals protonen en neutronen trekken elkaar steeds aan als hun afstand kleiner is dan $2,5 \times 10^{-15}$ m. Dat is heel weinig, maar atomen zijn dan ook zeer kleine bouwsels.

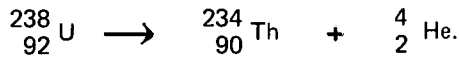
De straal van een nucleon (zo'n klein kerndeeltje stellen we ons maar als een bolletje voor) is $1,2 \times 10^{-15}$ m. Dat is niet zoveel minder als het zojuist hierboven genoemde getal. Een nucleon oefent dan ook alleen maar een aantrekkende kracht uit op zeer dichtbij gelegen andere kerndeeltjes. Het kan zich in de kern bovendien vrij gemakkelijk bewegen (zoals goudvissen in een kom met water). Komt het dicht bij de buitenrand van de kern dan ondervindt het echter wel een aantrekkende kracht van zijn meer naar binnen gelegen burens, maar aan de buitenkant zijn geen burens, zodat het uiteindelijk toch naar binnen toe wordt getrokken en niet zomaar uit de kern kan ontsnappen. Een grote kern neemt in het algemeen een soort druppelvorm aan.

Twee nucleonen, die verder dan $2,5 \times 10^{-15}$ m uit elkaar zijn zullen als ze beide toevallig positief geladen zijn elkaar afstoten. Bij grote kernen ondervinden dus de protonen van alle verderaf gelegen protonen een afstotende kracht. Daarom moeten deze kernen meer neutronen dan protonen bevatten om hun nucleonen bijeen te houden. Te grote kernen worden minder stabiel en wel des te eerder naarmate er een geringer overschot is aan neutronen. Zo konden Bohr en Wheeler berekenen, dat sommige kernen spontaan moeten uiteenvallen en ze konden tevens voorspellen in welke stukken zo'n kern zou breken. Dat spontane uiteenvallen nu is de door Madame Curie gevonden radioactiviteit.

Doordat de nucleonen in een grote kern vrij kunnen bewegen zal iedere radioactieve kern op een bepaald moment een keer in een ongunstige constellatie komen, zodat hij uiteenvalt. Zo'n situatie kan men zich voorstellen als een proton aan de grens van de kern is en toevallig bevinden zich net alle andere protonen ver uit de buurt. Ze stoten dan allemaal dat ene proton af en dan kan de afstotende kracht zo groot worden dat het uit de kern wordt geslingerd. De kans op zo'n constellatie is echter uiterst gering. Het is daar net zo mee als met het risico van verkeersongevallen. Hoe goed U ook rijdt, de kans dat een ander U van de weg afrijdt is steeds aanwezig en hoe meer kilometers U aflegt, hoe groter de kans wordt dat U door zo'n ongeval zou worden getroffen. De verzekering baseert daarop zelfs zijn premies. Misschien dat een individueel radioactief atoom jarenlang zonder uiteenvallen blijft bestaan, maar eens zal hem toch dat lot treffen. Een ongelukkige collega van hem is misschien vandaag al het slachtoffer.

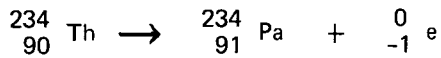
In een hoeveelheid uranium van enkele grammen zitten 10^{20} molekulen. De kans dat een bepaalde kern uiteenvalt is dan ook uiterst klein op een bepaalde dag. Toch zullen er echter iedere dag een aantal kernen uiteenvallen omdat er zoveel zijn. Pas na $4,5 \times 10^9$ jaar (vier en een half miljard jaar!) is de helft van de uraniumatomen het lot beschoren geweest van splijting. Deze tijd heet de **halveringstijd** of halfwaardetijd. Gaan we uit van een bepaalde hoeveelheid uranium (bijv. 1 gram) dan zal deze in de loop van de tijd steeds meer afnemen (figuur 4) en door dus het gewicht van het restant te bepalen kunnen we nagaan hoe lang onze gram uranium al ligt te vervallen. We kunnen door haar te wegen dus haar ouderdom bepalen. Aan de andere kant zouden we ook de hoeveelheid vrijgekomen materie kunnen meten. Hoe langer het verval al bezig is, hoe meer er daarvan is. Meestal is dat natuurlijk moeilijker want wat er vrijkomt is vaak in gasvorm en kan dan makkelijk ontsnappen. Het zijn niet altijd protonen, die uit zo'n kern worden losgemaakt. Bij een uraniumkern bijvoorbeeld splijt er zich een alphadeeltje van de kern af. Dat is dus een heliumkern bestaande uit twee protonen en twee neutronen. De uraniumkern bezat 238 nucleonen, waarvan 92 protonen en dus 146 neutronen. Nadat het alphadeeltje er is uitgegaan bevat het overgebleven restant nog 234 nucleonen, waarvan 90 protonen. Een kern met

90 protonen is een kern van het scheikundige element thorium (Th). Zo'n radioactiefproces wordt vaak symbolisch geschreven. De zojuist beschreven vervalreactie van uranium schrijft men als:



Linksboven ieder chemisch symbool staat het aantal kerndeeltjes, linksonder het aantal protonen.

Het uit een uraniumkern na zo'n proces tot stand gekomen thorium is ook onstabiel. Na betrekkelijk korte tijd (enkele uren of dagen) vindt er in de meeste kernen een soort omzetting plaats. Een der nucleonen, een neutron, gaat over in een proton en een elektron, waarna dit elektron bijna gelijktijdig wordt uitgestoten. Zo'n hoeveelheid thorium zendt dus elektronen uit. Men spreekt dan van betastraling. In de overgebleven kern zitten nu nog evenveel nucleonen als tevoren, maar er is een neutron minder en een proton meer. Als reactievergelijking schrijft men het als volgt op:



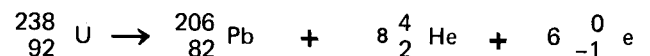
waarin het elektron met bijna geen massa (vandaar de 0) en een negatieve lading (vandaar de -1) met e is afgekort. De Pa is het nu gevormde element, dat is protactinium, dat evenmin stabiel is. Zo volgt op het ene proces het andere en er volgt een hele serie vervalprocessen, die allemaal betrekkelijk vlug na elkaar plaatsvinden, omdat hun

halfwaardetijd relatief kort is.

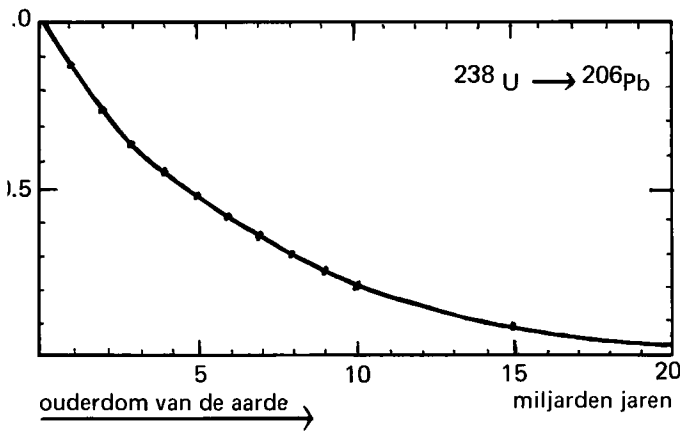
Gaan we dus uit van een gram uranium, dan zal na verloop van een lange tijd een gedeelte daarvan zijn vervallen. Het gevormde thorium is echter grotendeels ook weer omgezet. Iedere dag vervallen er nieuwe uranium-kernen. Maar ook iedere dag vervallen er gevormde thorium-kernen en evenzo van de verdere gevormde producten. Onze gram uranium bevat dus behalve het overgebleven nog niet vervallen restant minieme hoeveelheden van alle tussenschakels en tenslotte een hoeveelheid van het ten laatste overblijvende splijtproduct, dat niet meer instabiel is. Dat laatste is het stabiele element lood (Pb). Als voorbeeld geven we hier ook nog de andere tussenschakels tesamen met de beide eerste reactievergelijkingen:

	halfwaardetijd
${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$	$4,5 \times 10^9$ jaar
${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa} + {}_{-1}^0\text{e}$	24 dagen
${}_{91}^{234}\text{Pa} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{U} + {}_{-1}^0\text{e}$	ca 1 minuut
${}_{92}^{234}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{230}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$	$2,5 \times 10^5$ jaar
${}_{90}^{230}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{226}\text{Ra} + {}_2^4\text{He}$	$8,0 \times 10^4$ jaar
${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$	$1,6 \times 10^3$ jaar
${}_{86}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}_{84}^{218}\text{Po} + {}_2^4\text{He}$	3,8 dagen
${}_{84}^{218}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{214}\text{Pb} + {}_2^4\text{He}$	ca 3 minuten
${}_{82}^{214}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{214}\text{Bi} + {}_{-1}^0\text{e}$	ca 27 minuten
${}_{83}^{214}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{214}\text{Po} + {}_2^4\text{He} + {}_{-1}^0\text{e}$	ca 20 minuten
${}_{84}^{214}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{210}\text{Pb} + {}_2^4\text{He}$	ca 0,0001 sec
${}_{82}^{210}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{210}\text{Bi} + {}_{-1}^0\text{e}$	22 jaar
${}_{83}^{210}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{Po} + {}_{-1}^0\text{e}$	5,0 dagen
${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + {}_2^4\text{He}$	138,3 dagen

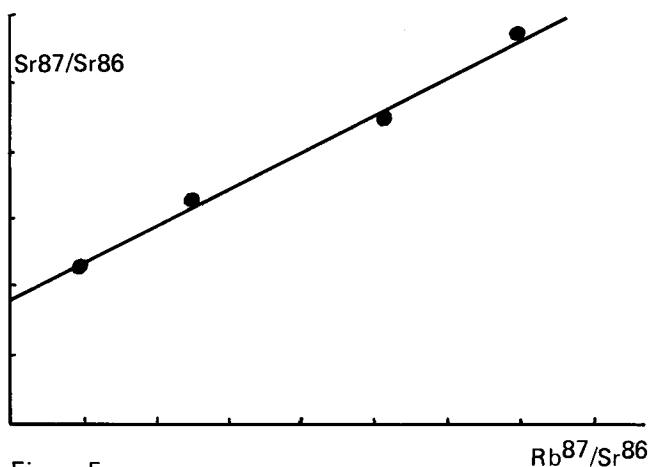
Het uiteindelijk resultaat van al deze reacties is dus dat:



Na deze uitvoerige inleiding is het nu mogelijk de diverse methodes van ouderdomsbepaling te bespreken. In principe kan men de ouderdom van een gesteente bepalen door een bepaald radioactief materiaal te kiezen. We noemden hierboven allereerst de



Figuur 4



Figuur 5

Uranium loodmethode

Daar we de begin gewichtshoeveelheid ^{238}U van een gesteente nooit kunnen te weten komen kan men de ouderdom te weten komen door te bepalen in een zekere gewichtshoeveelheid materiaal

a) de huidige overgebleven hoeveelheid ^{238}U in grammen
b) het aantal grammen gevormd ^{206}Pb .

Uit de verhouding $^{206}\text{Pb} : ^{238}\text{U}$ volgt dan via een grafiek als figuur 4 (in de praktijk via een daarmee gelijkwaardige formule) de ouderdom. Helaas doen er zich nu een aantal praktische problemen voor.

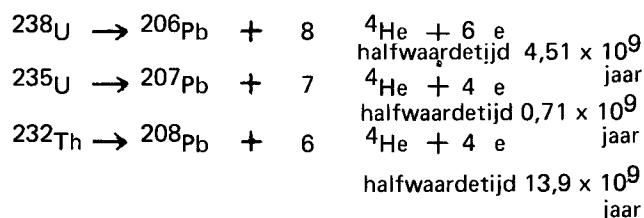
Als een vloeibaar magma diep uit de aarde omhoog komt en afkoelt ontstaat het vaste gesteente, dat sommige mineralen kan bevatten, die ^{238}U bevatten. Direct na de vorming van het mineraal begint het vervalproces. Als we dus nu zo'n mineraal aantreffen en de $^{206}\text{Pb} : ^{238}\text{U}$ verhouding meten in zo'n mineraal kennen we dus de tijd die verliep sinds dat vaste gesteente ontstond.

Zo'n reeds bestaand en deels door radioactieve processen aangetast mineraal kan met het gesteente waarin het zich bevindt in de loop der tijd ten gevolge van metamorfe processen herkrystalliseren, waarbij zich andere nieuwe mineralen vormen, waarvan het nog overgebleven niet vervallen uranium deel uitmaakt. Treffen we miljoenen jaren later zo'n mineraal aan dan kunnen we uit de uranium-lood verhouding de tijd vinden, die verliep sinds het metamorfe gesteente ontstond.

Vormt zich bij sedimentatie een radioactief nieuw mineraal dan is ook het tijdstip van die vorming te dateren. Het is dus steeds belangrijk zich goed voor ogen te houden welke ouderdom men met deze (en ook andere) methode bepaalt.

Een moeilijkheid wordt veroorzaakt door het feit, dat het mineraal naast het uit het uranium ontstane lood ook oorspronkelijk niet radioactief gevormd lood kan bevatten. Gelukkig is de hoeveelheid van dit oorspronkelijke lood meestal te verwaarlozen. Bovendien is het van radioactief lood te onderscheiden doordat het een ander loodisotoop is namelijk ^{204}Pb .

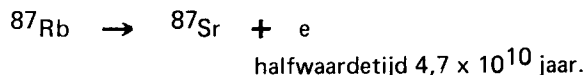
Een tweede complicatie maakt de zaak nog ingewikkelder. Behalve ^{238}U is er ook radioactief ^{235}U , dat via een aantal tussenstappen uiteenvalt in ^{207}Pb , waarbij zeven alpha-deeltjes en vier beta-deeltjes vrijkomen. Bovendien zit er in de mineralen, waarin uranium voorkomt en die zich dus voor de uranium-lood methode zouden lenen ook dikwijls thorium, dat uiteenvalt tot ^{208}Pb (met zes alpha-deeltjes en vier beta-deeltjes). Samengevat dus:



Uit de verhouding van $^{207}\text{Pb} : ^{206}\text{Pb}$ kan men zonder dat het nodig is de hoeveelheden U of He te bepalen direct ook de ouderdom vinden. Voor de meeste geologische ouderdomsbepalingen is deze methode zeer bruikbaar, hoewel ze betrekkelijk onnauwkeurig wordt voor gesteenten jonger dan 100 à 200 miljoen jaar. Zij wordt veelal toegepast op mineralen, zoals zirkoon en titaniet, die als accessoria tot hoeveelheden van 1 procent in allerlei stollings- en metamorfe gesteenten voorkomen. De uranium-lood methode is van meer waarde dan de thorium-lood methode, die vaak tot vage resultaten leidt.

Rubidium-strontium methode

Het chemisch element rubidium (Rb) heeft een isotoop ^{87}Rb die uiteenvalt in strontium ^{87}Sr volgens de reactie

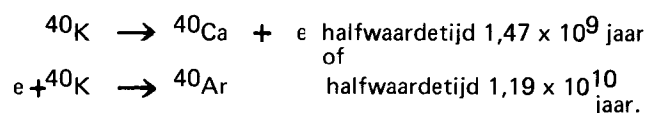


Het zeldzame element rubidium komt alleen in kaliummineralen voor. Hiermee valt de ouderdom van muskoviet, biotiet en allerlei kaliveldspaten te dateren. Het is een bruikbare methode voor granieten en granitische gneisen. Bij het gebruik wordt het gesteente dat gemeten moet worden, het geslagen proefmonster, geheel verpulverd en daarvan wordt een zeer klein gedeelte geanalyseerd. Men moet corrigeren voor een strontiumisotoop dat reeds in het mineraal aanwezig was toen dit kristalliseerde. In de praktijk kan men de methode toepassen op verschillende mineralen uit hetzelfde gesteente of op verschillende monsters van eenzelfde gesteente. Dan bepaalt men bij ieder de verhouding $\text{Sr}^{87} : \text{Sr}^{86}$ en de verhouding $\text{Rb}^{87} : \text{Sr}^{86}$. Bij een bepaalde toename van de eerste verhouding (na zekere tijd) behoort een vaste waarde van de andere. Zet men ze uit tegen elkaar dan ontstaat een **isochroon**, een rechte lijn waarvan de helling een maat is voor de tijd (figuur 5). De toepassing van deze grafieken is van groot belang en heeft reeds veel bijgedragen tot ouderdomsbepalingen van allerlei gesteenten.

Een probleem is nog dat de natuurkundigen slechts zeer moeilijk de halfwaardetijd van dit proces konden achterhalen. Er zijn tegenwoordig velen, die $5,0 \times 10^{10}$ jaar aannemen in plaats van $4,7 \times 10^{10}$. Er blijkt dan namelijk een betere overeenstemming op te treden met de eerste methode.

De kalium-argon methode

Kalium is een zeer veel voorkomend chemisch element en een van de drie bekende isotopen is radioactief. De vervalreeks is



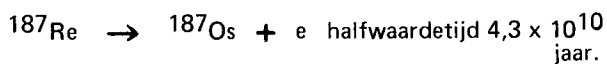
89 procent van het kalium veertig verval volgens de eerste mogelijkheid. Deze methode wordt zelden toegepast omdat de meeste gesteenten zoveel calcium veertig bevatten van niet radioactieve herkomst dat de kleine hoeveelheid, die uit ^{40}K ontstaat niet precies bepaald kan worden. Het tweede proces, dat voor 11 procent van de K geldt kan wel bij een groot aantal soorten gesteente worden gebruikt. Zowel voor de oudste aardse gesteenten (ca 3,4 miljard jaar) als bij jonger materiaal tot omstreeks 30 000 jaar. Bij heel jonge gesteenten is de geringheid, dat de hoeveelheid argon (Ar) te gering wordt om te meten. Geschikte mineralen zijn biotiet, muskoviet, hoornblende en nefelien en in veel gevallen is het niet nodig deze mineralen eerst uit het gesteente af te zonderen. Dit is vooral nuttig bij fijnkorrelige vulkanische gesteenten, zoals bazalten, andesieten en rhyolieten maar ook bij fijnkorrelige metamorfe gesteenten. In sedimentaire gesteenten vindt men soms het kaliumhoudende mineraal glauconiet, dat bij de sedimentvorming ontstond en dat met de kalium-argon methode kan worden gedateerd.

Een bezwaar van deze methode is dat het argon (een edelgas) vaak door diffusie verloren is gegaan als het ontstond bij hoge temperatuur. Het is dan in de aardatmosfeer terecht gekomen. Deze bevat dan ook ca 1 procent argon-40. De temperatuur waarboven deze diffusie van belang is hangt af van het mineraal dat het argon bevatte en de bouw van zijn kristalrooster en varieert van ca 200°

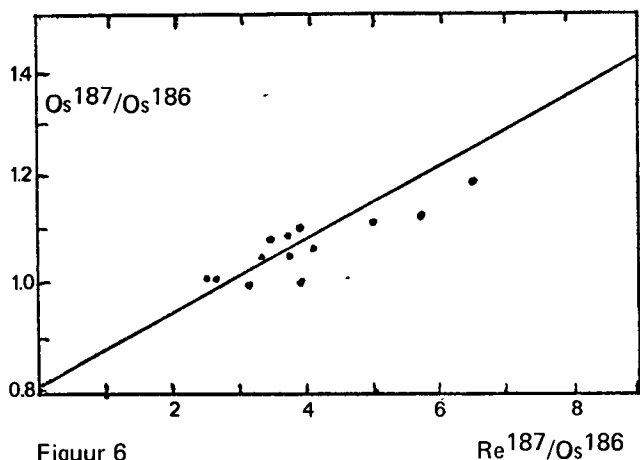
C voor biotiet, 300° voor muskoviet en sandien tot bijna 500° bij hoornblend. Bovendien hangt het af van de korrelgrootte van het gesteente. Bepalingen aan diep in de aarde tot stand gekomen gesteenten leiden dikwijls tot geringe leeftijden, omdat zulke gesteenten zeer langzaam zijn afgekoeld. Daarentegen geven de aan het oppervlak van de aarde afgekoelde lavastromen en assen veel betere waarden omdat ze snel afkoelden. Soms is er ook bij de kristallisatie radioactief argon in het kristalrooster ingesloten, dat ter plaatse reeds aanwezig was (uit vroegere verdwenen gesteenten ontstaan). Dan vindt men een te grote waarde voor de ouderdom en op deze wijze werden vroeger waarden gevonden, die groter zijn dan de aangenomen ouderdom van de aarde.

De rhenium-osmium methode

Deze vertoont een sterke overeenkomst met de rubidium-strontium methode. De vervalreactie is:



Ook hier is de halfwaardetijd zeer moeilijk te bepalen. Bovendien zijn de beide elementen Re en Os moeilijk te scheiden. Men bepaalt met deze methode ook weer isochronen. Voorzover mij bekend is zij toegepast bij ijzermeteorieten.

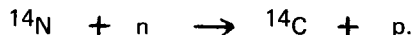


Figuur 6

De koolstof-stikstof methode

Volledigheidshalve willen we deze zo vaak genoemde methode niet onvermeld laten, hoewel ze voor de geologie van minder betekenis is. Alleen de kwartairgeologie kan

er soms gebruik van maken, daar ze hoogstens ouderdomsbepalingen tot 70 000 jaar toelaat, terwijl vooral de archeologie deze methode dankbaar toepast. Zoals U bekend is onze aardse dampkring in hoofdzaak opgebouwd uit zuurstof en stikstof (N). Het laatste gas maakt er bijna vier vijfde deel van uit. Nu wordt de aarde vanuit het heelal onophoudelijk bestookt door deeltjes vanuit de wereldruimte. Men spreekt van de kosmische straling. In deze straling bevinden zich ook energierijke neutronen, die de dampkring onophoudelijk bombarderen. Regelmatig worden ook stikstofkernen getroffen door zo'n neutron (n) en dan vindt de reactie soms plaats dat



Zo ontstaat ^{14}C , koolstof veertien. Dit is een radioactieve kern. In de dampkring zijn dus voortdurend enkele radioactieve koolstofkernen. Deze kernen kunnen zich verbinden met zuurstof tot een molekuul koolzuur (CO_2). Behalve zuurstof en stikstof bevat onze dampkring ook steeds een kleine hoeveelheid koolzuur, waarvan dus een uiterst gering percentage een koolstofatoom bevat dat radioactief is. De planten nemen koolzuur op uit de lucht, waaronder ook de radioactieve koolzuur is. De dieren eten de planten en uiteindelijk komt het via de stofwisseling in ons lichaam terecht. Alle levende wezens bevatten koolstof, waarvan dan ook slechts 10^{-10} procent koolstof veertien is. Weliswaar valt dat uiteen, maar doordat het wezen leeft neemt het steeds verse koolstof op, zodat het percentage ^{14}C constant blijft. Nadat het echter sterft houdt die opname op en de koolstof veertien begint te vermoderen, want ze vervalst volgens



Na 5600 jaar is dus de helft van de ^{14}C verdwenen. Door de overgebleven hoeveelheid te bepalen is de ouderdom vast te stellen.

Bij het ontstaan van het zonnestelsel zijn er misschien ook radioactieve elementen aanwezig geweest met betrekkelijk korte halfwaardetijden, die nu geheel zijn verdwenen. Alleen de vervalproducten zijn nog over. Zulke verdwenen radioactieve stoffen zouden alleen merkbare effecten gehad kunnen hebben als het zonnestelsel kort na de vorming van de elementen in het heelal ontstond. Materie uit het zonnestelsel, die onveranderd is gebleven gedurende de 4 1/2 miljard jaar van zijn bestaan zouden sporen van zulke kernen kunnen bevatten. In meteorieten heeft men inderdaad gezocht naar de eindproducten van kernreacties met jodine-129 en met paladium 107. Het zou hier te voeren op deze methodes in te gaan.