

## 5.2 Atomen en verval

Al duizenden jaren zijn mensen op zoek naar manieren om nieuwe stoffen te maken. Zie figuur 5.7. Dat kunnen geneesmiddelen zijn of ‘toverdrankjes’, maar ook goud. In de middeleeuwen zochten alchemisten naar de steen der wijzen, waarmee gewone metalen in goud zouden veranderen of mensen eeuwig jong konden blijven. Deze zoektocht heeft heel veel kennis over stoffen en chemische reacties opgeleverd.

### Startopdracht

- 12**
- a Is het mogelijk goud uit andere metalen te maken?
- b Vind je deze onderzoekers dom, of heb je er wel bewondering voor?

### De bouw van atomen

Tussen 1500 en 1900 hebben wetenschappers leren begrijpen dat materie uit atomen is opgebouwd. Rond 1870 publiceerde Mendelejev een tabel waarin hij chemische elementen (atoomsoorten) rangschikte op basis van atoommassa, dichtheid en de mate waarin ze reageren met andere stoffen.



5.7 Alchemisten aan het werk op een schilderij uit 1570

Mede door dit periodiek systeem der elementen (zie *Binas* tabel 99) konden wetenschappers, na de ontdekking van het neutron als kerndeeltje in 1932, een model maken van de bouw van een atoom.

Kernen van atomen bestaan uit twee soorten nucleonen: **protonen**, met een positieve lading  $+e$ , en **neutronen** die geen lading hebben. Rond de kern bewegen de **elektronen**, elk met een negatieve lading van  $-e$ . Ze blijven aan de kern gebonden door de aantrekkende kracht van de positieve lading van de kern. De nucleonen zelf zijn ook aan elkaar gebonden door een kracht tussen de protonen en neutronen onderling. Het is een kracht die vooral werkt als nucleonen zeer dicht bij elkaar zitten. Deze kracht heeft de toepasselijke naam **sterke kernkracht** en is veel groter dan de afstotende elektrische kracht van de positieve protonen op elkaar.

Het aantal protonen in een kern noem je het **atoomnummer** en geef je aan met  $Z$ . Het aantal neutronen, ook wel het neutronengetal genoemd, geef je aan met  $N$ . Het totaal aantal kerndeeltjes of **nucleonen** samen geef je aan met het symbool  $A$  en noem je het **atoommassagetal** of kortweg het **massagetal**. Deze naam gebruiken we omdat de massa van een atoom nagenoeg gelijk is aan  $A$  maal de massa van een kerndeeltje, omdat de massa van de eromheen draaiende elektronen verwaarloosbaar klein is.  $A$ ,  $N$  en  $Z$  hebben geen eenheid. Het verband ertussen is:

$$A = N + Z$$

- $A$**  is het totaal aantal kerndeeltjes of nucleonen (het massagetal)
- $N$**  is het aantal neutronen in de kern
- $Z$**  is het aantal protonen in de kern (het atoomnummer)

Je schrijft het massagetal en het atoomnummer vóór het symbool van het element,  $A$  linksboven en  $Z$  links onder:



- $X$**  is het symbool van het element

Het aantal protonen ( $Z$ ) bepaalt de chemische en fysische eigenschappen van een element. Het eenvoudigste atoom is waterstof. Het atoomnummer is 1: er zit één proton in de kern. Helium heeft atoomnummer 2: de kern bevat twee protonen en (meestal) twee neutronen. Van elk volgend element neemt  $Z$  met 1 toe. In het periodiek systeem zijn alle atoomsoorten gerangschikt naar opklimmend atoomnummer  $Z$ . Je noemt  $Z$  ook wel het ladinggetal, met de lading uitgedrukt in  $e$ .

Bij een andere notatie van elementen vermeld je alleen de atoomsoort met het massagetal: H-1, Ne-22 en He-4. Met het symbool weet je het atoomnummer namelijk al.

Ook in *Binas* tabel 25 zijn de atomen gerangschikt op atoomnummer  $Z$  (eerste kolom). In deze tabel is de atoommassa  $A$  (vierde kolom) van elke atoomsoort uitgedrukt in de **atomaire massa-eenheid**  $u$ :  $1\text{ u} = 1,660\,54 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ . Zie *Binas* tabel 7. Dat is ongeveer gelijk aan de massa van een proton of neutron. Bijvoorbeeld  $^{22}_{10}\text{Ne}$  vind je door 10 in de eerste kolom op te zoeken. In de tweede kolom staat dan het symbool Ne en in de derde kolom vind je het massagetal 22.

● **Atoomkernen bestaan uit protonen en neutronen. Rond de kern draaien elektronen. Het aantal protonen  $Z$  in een kern noem je het atoomnummer. Het aantal neutronen is  $N$ . Het aantal protonen en neutronen samen is het (atoom)massagetal  $A$ . Een atoom of element noteer je als  $^A_Z\text{X}$ . De sterke kernkracht zorgt ervoor dat de deeltjes in de kern bij elkaar blijven. De massa van een atoom in kg kun je berekenen door de atoommassa te vermenigvuldigen met de atomaire massa-eenheid  $u$ .**

## Isotopen

De kernen van één element blijken niet allemaal even zwaar te zijn. Het aantal protonen is 'ke(r)nmerkend' voor de atoomsoort, het aantal neutronen niet. Chemisch is er geen verschil, maar fysisch wel. Kernen van één element met dezelfde  $Z$ , maar een verschillende  $A$  heten **isotopen**. Ze verschillen dus alleen in het aantal neutronen. In figuur 5.8 zie je drie isotopen van waterstof:  $^1_1\text{H}$ ,  $^2_1\text{H}$  en  $^3_1\text{H}$ . In dit geval hebben de isotopen een eigen naam gekregen: waterstof (alleen één proton), deuterium (met een neutron

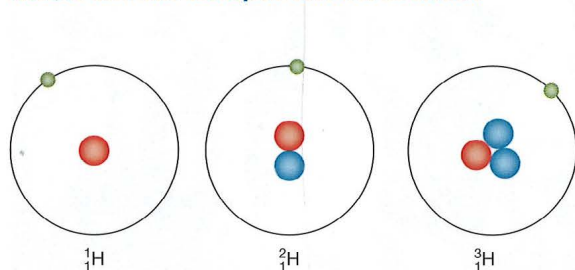
erbij) en tritium (met twee neutronen erbij). De drie isotopen van waterstof mag je dan ook schrijven als:  $^1_1\text{H}$ ,  $^2_1\text{D}$  en  $^3_1\text{T}$ . Bijna alle waterstof in de natuur bestaat uit gewoon waterstof, slechts 0,015% is deuterium. Alle isotopen kun je weergeven in een isotopendia-gram, zoals in *Binas* tabel 25B.

Bij kleine kernen is het aantal neutronen meestal gelijk aan het aantal protonen. Bij grotere kernen zijn er in verhouding meer neutronen nodig om de sterke afstoting van de protonen te compenseren. In zwaardere kernen zijn er (veel) meer neutronen dan protonen. Een kern van  $^{238}_{92}\text{U}$  bevat bijvoorbeeld 92 protonen en  $238 - 92 = 146$  neutronen.

Van veel elementen zijn er één of meer isotopen die **stabiel** zijn. De andere isotopen van een element veranderen in de loop van de tijd, omdat ze **instabiel** zijn. Van zwaardere elementen zijn soms wel tien of meer van deze instabiele isotopen bekend. Onder het uitzenden van straling verandert zo'n atoom in een ander element. Van alle kernen met een atoomnummer groter dan  $Z = 83$  zijn helemaal geen stabiele isotopen bekend. Een overzicht van de meest voorkomende isotopen vind je in *Binas* tabel 25. Je kunt stabiele en instabiele isotopen herkennen aan het niet of wel vermeld staan van het soort verval in de laatste kolom van *Binas* tabel 25A.

In *Binas* tabel 99 (het periodiek systeem) zie je in elk vakje een element. In de linkerbovenhoek staat het atoomnummer  $Z$ . In de rechterbovenhoek staat de **gemiddelde atoommassa** van alle isotopen die van dat element in de natuur voorkomen.

● **Isotopen zijn vormen van hetzelfde element met een verschillend aantal neutronen in de kern. Sommige isotopen zijn stabiel en vervallen dus niet. Andere zijn instabiel en vervallen na verloop van tijd, waarbij ze straling uitzenden. In het periodiek systeem vind je de gemiddelde atoommassa van alle isotopen van het element.**



5.8 Drie isotopen van waterstof: a waterstof (H), b deuterium (D), c tritium (T)

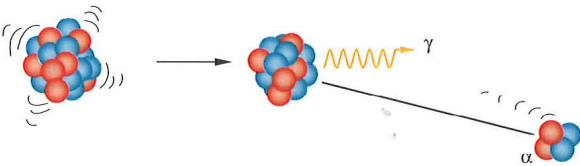


## $\alpha$ - en $\beta$ -straling

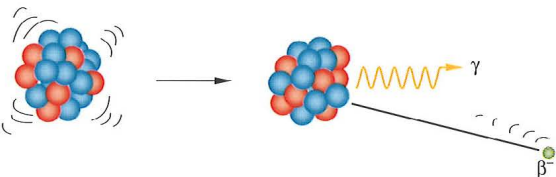
Bij het uitzenden van straling verandert de oorspronkelijke kern in een andere. Je noemt dit **radioactief verval**. De oorspronkelijke kern noemt je **moederkern**, de kern na verval heet **dochterkern**.

Je kunt niet voorspellen *wanneer* een kern vervalt. Bij radioactief verval is het vervallen volledig onafhankelijk van de omstandigheden, en is dus ook nooit voorspelbaar voor een los atoom. Een instabiel atoom kan binnen een milliseconde na het ontstaan vervallen, maar het kan ook honderden jaren later gebeuren. Grote hoeveelheden kernen hebben wel een gemiddelde vervaltijd. Het is als met dobbelstenen gooien. Als je zes keer gooit, is het helemaal niet zeker dat je daarbij één keer de getallen 1 t/m 6 gooit. Maar na 12 000 keer gooien kun je er vanuit gaan dat je elk getal op de dobbelsteen ongeveer 2 000 keer hebt gegooit. Sommige instabiele kernen vervallen gemiddeld heel snel, andere heel langzaam. Bij  $^{14}_6\text{C}$  is pas na 5730 jaar de helft van alle atomen vervallen, terwijl dat bij  $^{211}_{84}\text{Po}$  in een halve seconde is gebeurd.

Als een instabiele kern vervalt, schiet een  $\alpha$ - of een  $\beta$ -deeltje uit de kern en vaak ook  $\gamma$ -straling. In figuur 5.9a is  $\alpha$ -verval weergegeven. Een  $\alpha$ -deeltje bestaat uit twee neutronen en twee protonen. In *Binas* tabel 25 zie je dat dit een heliumkern is. Uranium is het bekendste voorbeeld van een element dat  $\alpha$ -straling uitzendt. Bij  $\alpha$ -verval van uranium vermindert  $Z$  met 2. De uraniumkern ( $Z = 92$ ) verandert in een thoriumkern ( $Z = 90$ ). Het massagetal  $A$  neemt met 4 af.



**5.9a** Het verval van een atoom dat een  $\alpha$ -deeltje uitzendt; er ontstaat ook  $\gamma$ -straling.



**5.9b** Het verval van een atoom dat een  $\beta^-$ -deeltje uitzendt; er ontstaat ook  $\gamma$ -straling.

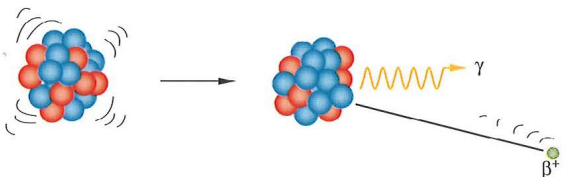
Bij  $\beta$ -verval komt er een elektron uit de kern (figuur 5.9b). Dat lijkt vreemd. Er zitten immers helemaal geen elektronen in de kern, ze bewegen er alleen omheen. De verklaring is dat bij  $\beta$ -verval een neutron verandert in een proton en een elektron. Het elektron schiet weg uit de kern en het proton blijft in de kern achter. Omdat er een proton bij komt, neemt  $Z$  bij  $\beta$ -verval dus met 1 toe. Er verdwijnt echter een neutron, waardoor het massagetal  $A (= N + Z)$  niet verandert.

In sommige gevallen kan er ook een ander proces plaatsvinden. Een proton in een kern kan veranderen in een neutron. Bij dit verval ontstaat een positief deeltje. Dit deeltje, het positron of  $\beta^+$ -deeltje, is het anti-deeltje van het elektron. Om het positron goed te kunnen onderscheiden van het andere  $\beta$ -deeltje (het elektron) schrijf je dat als  $\beta^+$ . Omdat een proton verdwijnt en een neutron ontstaat, neemt  $Z$  bij  $\beta^+$ -verval met 1 af. Het massagetal  $A (= N + Z)$  blijft ook hier gelijk.  $\beta^+$ -straling is pas voor het eerst waargenomen in 1929 door Skobeltsyn (zie figuur 5.10a) bij het onderzoeken van straling uit de ruimte. Hij besepte alleen niet dat het een nieuw soort straling was. In 1932 heeft Anderson deze straling benoemd. Hij ontving hier later de Nobelprijs voor. Een voorbeeld van  $\beta^+$ -verval zie je in figuur 5.10b.

● **Radioactief verval is het uitzenden van straling door een instabiele kern. Door het vervallen kan het aantal protonen en het aantal neutronen van de moederkern veranderen en ontstaat een dochterkern van een ander element.**



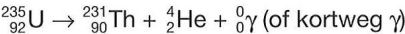
**5.10a** Dimitri Skobeltsyn rond 1950.



**5.10b** Het verval van een atoom dat een  $\beta^+$ -deeltje uitzendt; er ontstaat ook  $\gamma$ -straling.

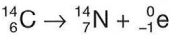
Vervalvergelijkingen opstellen

Een kerncentrale bevat brandstofstaven waarin het uraniumisotoop <sup>235</sup><sub>92</sub>U zit. Dit element is instabiel. Het straalt α-deeltjes uit, waarbij het in een ander element verandert. Hierbij ontstaat ook γ-straling. Wat er met een vervallende kern gebeurt, beschrijf je met een **vervalvergelijking**. Je schrijft alle deeltjes die in de reactie voorkomen op dezelfde manier:

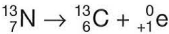


Je ziet dat de som van de massagetallen A links en rechts gelijk is: het aantal kerndeeltjes samen is vóór en ná het verval gelijk: 235 = 231 + 4. Dat geldt ook voor het atoomnummer Z. Het aantal protonen of de positieve lading van de kern is vóór en ná de reactie gelijk: 92 = 90 + 2. In beide gevallen is dit een gevolg van twee belangrijke behoudswetten in de natuurkunde: de **wet van behoud van massa** (voor het massagetal A) en de **wet van behoud van lading** (voor het ladingsgetal Z).

Ook voor stoffen die β-straling uitzenden kun je een vervalvergelijking opstellen. De koolstofisotoop C-14 vervalt bijvoorbeeld onder het uitzenden van β-straling. Er komt een β-deeltje vrij, dus een elektron. Je mag de massa van een elektron afronden op 0. Uit precieze metingen blijkt: m<sub>e</sub> = 0,000 55 u. Bij het opstellen van een vervalvergelijking stel je de massa van het elektron gelijk aan 0, dus A = 0. Het getal Z geeft de lading (uitgedrukt in e) van de kern aan. Voor het elektron is de lading -1. Hoewel het elektron geen kern heeft, geven we de lading aan door -1 voor Z in te vullen. Een β-deeltje kun je dus schrijven als <sup>0</sup><sub>-1</sub>e. De vervalvergelijking van C-14 noteer je dan zo:



Het opstellen van een vervalvergelijking bij β<sup>+</sup>- verval gaat op een soortgelijke manier. Een β<sup>+</sup>-deeltje noteer je als <sup>0</sup><sub>+1</sub>e. De vervalvergelijking van bijvoorbeeld N-13 ziet er dan als volgt uit:



De notatie van enkele belangrijke deeltjes is:

α	<sup>4</sup> <sub>2</sub> He
β <sup>-</sup> (elektron)	<sup>0</sup> <sub>-1</sub> e
β <sup>+</sup> (positron)	<sup>0</sup> <sub>+1</sub> e
γ	<sup>0</sup> <sub>0</sub> γ
neutron	<sup>1</sup> <sub>0</sub> n
proton	<sup>1</sup> <sub>1</sub> p

- In een vervalvergelijking is de som van de bovenste getallen (atoommassa's) links en rechts gelijk, omdat het totaal aantal protonen en neutronen gelijk blijft (wet van behoud van massa). Ook de som van de onderste getallen (de atoomnummers) is links en rechts gelijk, omdat de totale lading gelijk blijft (wet van behoud van lading).

Site

De bouw van een atoom

Je bekijkt hoe een atoom is opgebouwd. Zie figuur 5.11.

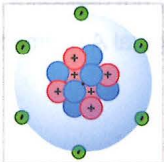
α- en β-verval





Je ziet hoe kernen van atomen α- en β-deeltjes uitzenden.

protonen +

neutronen

elektronen -



Naam	Waterstof	Helium	Lithium	Beryllium	Koolstof
Symbol	H	He	Li	Be	C
Atoommodel					
Aantal protonen	1	2	3	4	6
Aantal neutronen	0	2	4	5	6
Aantal elektronen	1	2	3	4	6

5.11 Bouw van atomen



# Opdrachten

**A 13**

- a Wat zijn isotopen?
- b Zoek de isotopen van zuurstof op en noteer ze.
- c Geef de notatie van een  $\alpha$ -deeltje, een  $\gamma$ -foton, een  $\beta^-$ -deeltje en een  $\beta^+$ -deeltje.

**A 14**

In de atmosfeer komt behalve het stabiele  $^{12}_6\text{C}$  ook het instabiele  $^{14}_6\text{C}$  voor.

- a Wat betekent: een kern is stabiel?
- b Geef het aantal protonen en neutronen aan in  $^{12}_6\text{C}$ .
- c Geef het aantal protonen en neutronen aan in  $^{14}_6\text{C}$ .
- d Geef de vervalvergelijking van  $^{14}_6\text{C}$ .

**B 15 \***

Stel met behulp van *Binas* tabel 25A in de vervalvergelijking op voor:

- a Po-210
- b O-19
- c Bi-210
- d C-11
- e het verval van een neutron in een proton en een elektron.
- f het verval van een proton in een neutron en een positron

**B 16 \***

Bereken hoeveel neutronen de dochterkern van  $^{239}_{92}\text{U}$  na verval heeft.

**B 17**

Waarom zijn veel kunstmatig geproduceerde radioactieve isotopen zeldzaam in de natuur?

**B 18 \***

In een isotopendiagram (zie *Binas* tabel 25B) staan stabiele en instabiele kernen.

- a Wat is het atoomnummer van het zwaarste, nog stabiele, atoom?
- b Waar staan kernen die isotopen van elkaar zijn: naast elkaar of onder elkaar?
- c Welk atoomnummer heeft het grootste aantal stabiele isotopen?
- d Welke isotopen van zuurstof zijn stabiel?

**B 19 \***

Rangschik de onderstaande lijst op lading. Begin bij de grootste negatieve lading en eindig met de grootste positieve. Gebruik tabel 99 van *Binas*.

- 1 een proton
- 2 een  $\text{O}^{2-}$ -ion
- 3 de elektronenwolk van een natriumatoom
- 4 een neutron
- 5 een stikstofkern
- 6 een elektron
- 7 een  $\text{Fe}^{3+}$ -ion
- 8 een waterstofatoom
- 9 een  $\text{F}^-$ -ion
- 10 een positron

**B 20 \***

Rangschik de onderstaande lijst op massa. Begin bij de kleinste. Gebruik tabellen 7 en 25 van *Binas*.

- 1 een neutron
- 2 een waterstofkern
- 3 een elektron
- 4 de elektronenwolk van een natriumatoom
- 5 een proton
- 6 een uraniumkern
- 7 een waterstofatoom
- 8 een positron

**B 21 \***

- a Wat zijn de symbolen van de elementen die met X aangeduid zijn in:  $^{239}_{92}\text{X}$ ,  $^{18}_7\text{X}$  en  $^{82}_{36}\text{X}$ ?
- b Hoeveel protonen en hoeveel neutronen hebben die verschillende elementen?

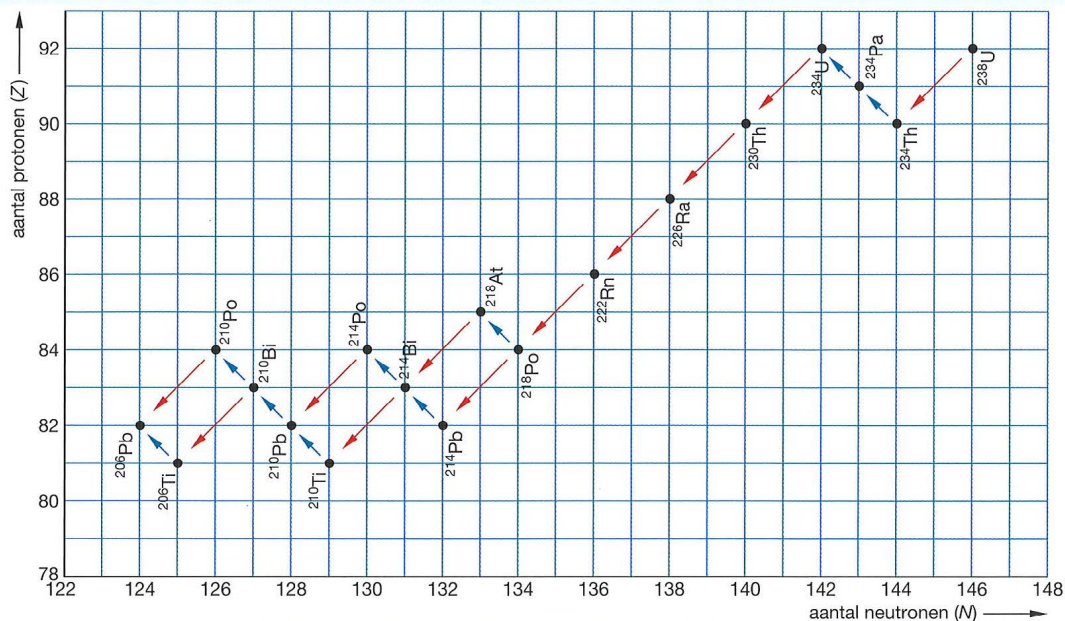
**B 22 \***

Pu-239 verval, waarbij een dochterkern ontstaat die instabiel is. Die verval ook weer en heeft een dochterkern die ..... enzovoorts. Stel met behulp van *Binas* tabel 25A de reeks vervalvergelijkingen op van het verval van Pu-239 en van de dochterkernen. Ga door tot je bij een stabiel isotoop uitkomt.

**C 23**

In tabel 25 van *Binas* staat de massa van atomen gegeven, uitgedrukt in de atomaire massa-eenheid u. De waarde van u staat in *Binas* tabel 7.

- a Hoe groot is 1 u, uitgedrukt in kg?
- b Bereken met behulp van *Binas* de massa van een  $\alpha$ -deeltje in kg in een zo groot mogelijk aantal significante cijfers.



5.12 De vervalreeks van uranium-238

### C 24 \*

- Waarom zijn de atoommassa's van veel elementen in tabel 99 van *Binas* niet (ongeveer) gelijk aan gehele getallen?
- Bereken (gebruik *Binas* tabel 25) de gemiddelde atoommassa van Cl, en vergelijk je antwoord met tabel 99.

### C 25 \*

Uranium-238 vervalst, waarbij een dochterkern ontstaat die instabiel is. Die kern vervalst ook weer en heeft een dochterkern die ..... enzovoorts. Figuur 5.12 geeft aan hoe dit verval verloopt. Het eindigt als er een stabiele kern ontstaat.

- Welke stabiele kern ontstaat uiteindelijk?
- Leg uit welk soort verval de rode pijl voorstelt.
- Leg uit welk soort verval de blauwe pijl voorstelt.
- Na hoeveel maal  $\alpha$ -verval en hoeveel maal  $\beta$ -verval is de eindsituatie bereikt?

### D 26 \*

Van alle waterstof op aarde bestaat ongeveer 0,015% in de vorm van deuterium.

Maak een ruwe schatting van de massa van de hoeveelheid deuterium in de oceanen op aarde.

### D 27 \*

Ga na of er isotopen in *Binas* staan waarvan de dochterkern een goudisotoop is.

## Na deze paragraaf kun je:

- uitleggen wat isotopen zijn, ze op de juiste twee manieren aanduiden, opzoeken welke stabiel zijn en welke niet;
- met behulp van *Binas* van een willekeurig atoom de bouw met neutronen, protonen en elektronen schetsen en de massa in kg berekenen;
- van een willekeurig atoom het type verval opzoeken in *Binas* en de bijbehorende vervalvergelijking opstellen.