

## Hoofdstuk 38

# Essential University Physics

Richard Wolfson  
2<sup>nd</sup> Edition

## Kernfysica

Nuclear Physics

### 38.1 Kernstructuur en Isotopen



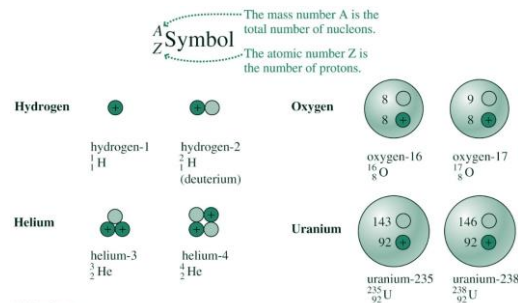
Bij een PET-scan (positron emission tomografie) wordt gebruik gemaakt van het radioactief koolstof isotoop koolstof-11 met halveringstijd **20,4 minuten**.

Als bij het inbrengen van het sample de radioactiviteit **800 MBq** (MegaBecquerel) bedroeg, hoeveel zal die dan nog (ongeveer) bedragen 1 uur na het inbrengen?

- a) 50 MBq      b) 100 MBq      c) 200 MBq  
d) 400 MBq    e) praktisch nul

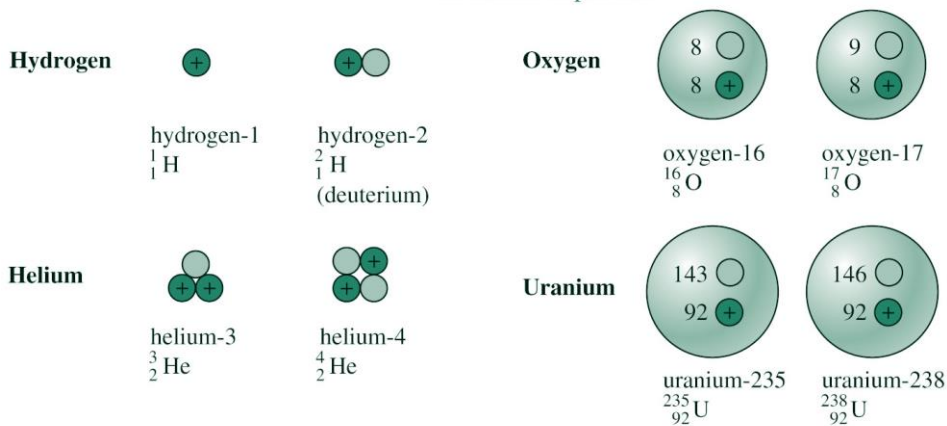
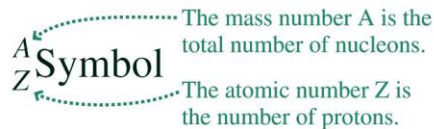
## 38.1 Kernstructuur en Isotopen

- Het **atoomnummer**,  $Z$ , geeft het aantal protonen in een kern.
  - Het atoomnummer bepaalt het element.
  - Alle kernen van hetzelfde element hebben dezelfde  $Z$ .
- Het **massagetal**,  $A$ , geeft het totaal aantal nucleonen (neutronen plus protonen).
  - Het massagetal bepaalt het **isotoop**.
  - Verschillende isotopen van hetzelfde element hebben verschillende aantallen neutronen en dus verschillende massagetallen.



© Johan D'heer

3



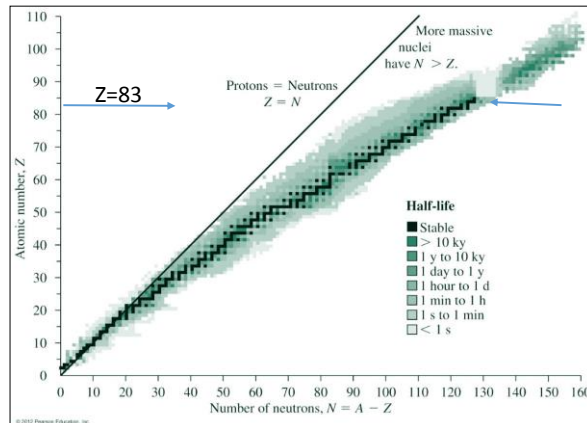
© 2012 Pearson Education, Inc.

Google "isotopen" → wikipedia → tabel van Mendeljev → element aanklikken  
 → alle isotopen en hun kenmerken  
 bv : [https://nl.wikipedia.org/wiki/Isotopen\\_van\\_koolstof](https://nl.wikipedia.org/wiki/Isotopen_van_koolstof)

4

## 38.1 Stabiliteit van Kernen

- Kernen worden samengehouden door de **sterke kracht** die op alle nucleonen werkt, maar enkel op korte afstand.
  - De lange-afstands afstotende elektrische kracht tussen protonen daarentegen, destabiliseert kernen.
  - Gevolg: massievere kernen hebben meer neutronen nodig om stabiel te kunnen zijn.
- Er zijn geen stabiele kernen met  $Z > 83$ .
- De **grafiek van de nucliden (= stabiele kernen)** vat deze trends samen.



© Johan D'heer

## 38.1 Toepassing: NMR, MRI

- De energie van de protonen in H-atomen in moleculen hangt af van het magneetveld waarin ze zich bevinden.
- Dit magneetveld is afkomstig van het magneetveld van de omringende elektronen en omringende kernen  $B_{\text{locaal}}$  en van een eventueel uitwendig aangelegd magneetveld  $B_{\text{ext}}$ .
- Het totale magneetveld  $B_{\text{tot}} = B_{\text{locaal}} + B_{\text{ext}}$  bepaalt de frequentie  $f$  van de e.m. straling die nodig zal zijn om de protonen in een geëxciteerde toestand te brengen en terug zal worden uitgestraald door de molecule wanneer deze protonen terugkeren naar hun grondtoestand.
- Meting van deze frequentie(s) leert dus iets over de omringing van de protonen van de H-atomen en geeft dus informatie over de structuur van de molecule.
- Men noemt deze techniek NMR (Nuclear Magnetic Resonance).

© Johan D'heer

14

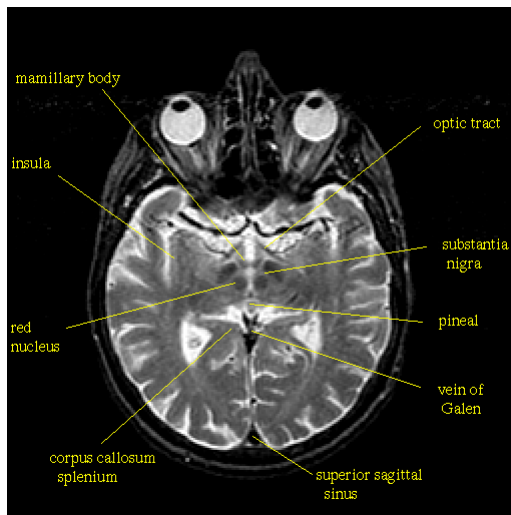
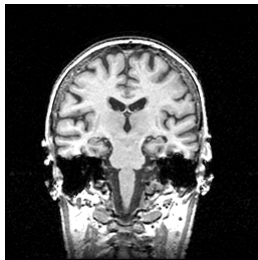
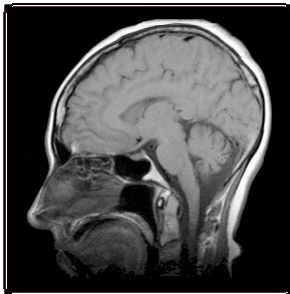
## 38.1 Toepassing: NMR, MRI

- Met de NMR techniek, kan men ook plaatsen waar H-atomen zich bevinden in een menselijk lichaam, opsporen.
- Men spreekt in dit geval over MRI (Magnetic Resonance Imaging).
- Vermits H-atomen vooral voorkomen in vet en weefsel krijgt men op die manier een beeld van het lichaam, complementair aan dat van röntgenfoto's.
- De resolutie van MRI bedraagt ongeveer 1 mm.



15

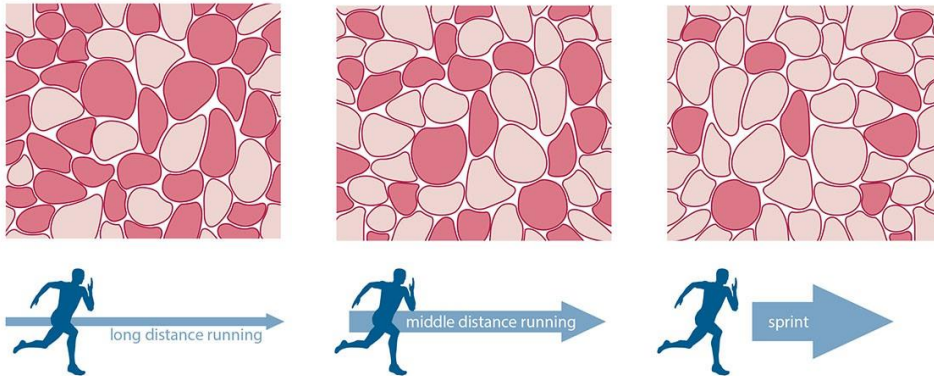
## 38.1 Toepassing: NMR, MRI



© Johan D'heer

16

## 38.1 Bepaling Vezeltype in Spieren



One of the main factors determining whether a person has talent for either short sprint-type exercise or rather longer duration endurance-type exercise, is the muscle fiber type composition. Human skeletal muscles are composed of a mixture of fast and slow fibers. Some people have predominantly **fast fibers**, and are born **sprinters**, and others have relatively more **slow fibers**, and are destined to become **endurance athletes**. A lot of people, however, have a roughly equal distribution of fast and slow fibers. This fiber type distribution is largely genetically determined.

Ref.: <http://www.victoris.ugent.be/en/Projects/muscle%20talent%20scan/>

© Johan D'heer

17

## 38.2 Radioactiviteit en Halfwaardetijd

- **Radioactiviteit** komt o.a. voort uit het **spontane verval** van **onstabiele kernen**.
  - Het aantal kernen dat per tijdseenheid vervalst is de **activiteit**.
  - De SI-eenheid van activiteit is de **becquerel** (Bq), gelijk aan 1 verval per seconde.
  - Oudere eenheid: de Curie (Ci), gelijk aan  $3,7 \times 10^{10}$  Bq (ongeveer de activiteit van 1 gram radium-226).
  - Vervalwet:
    - $dN \sim$  aantal kernen  $N$
    - $dN \sim$  tijdsinterval  $dt$
    - $dN$  is negatief (afname van  $N$ )
  - $\lambda$  is de **vervalconstante**.
  - Startend op  $t = 0$  met  $N_0$  kernen, is het aantal kernen op tijdstip  $t$ :

$$\text{integratie van } \frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

© Johan D'heer

18

## 38.2 Radioactiviteit en Halfwaardetijd

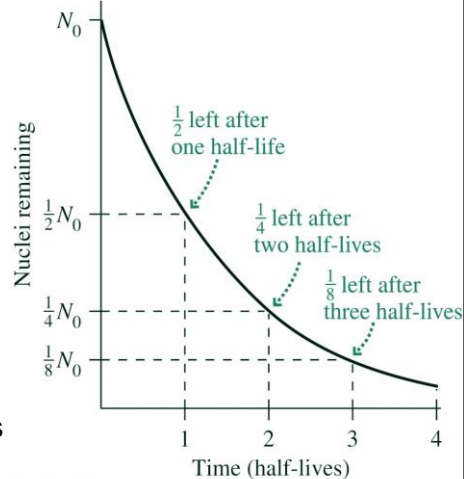
- De tijd nodig om de helft van het aantal kernen van een monster te laten vervallen is de **halfwaardetijd**  $t_{1/2}$ .
- Het aantal kernen na een tijd  $t$  bedraagt dan:

$$N = N_0 2^{-t/t_{1/2}} \quad (3)$$

- Uit de def. van  $t_{1/2}$  volgt:
- (stel  $\ln(N/N_0)$  uit (2) en (3) gelijk)

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

- Merk op:  
De activiteit van een monster neemt op dezelfde wijze exponentieel af als het aantal kernen, want activiteit is evenredig met aantal kernen.

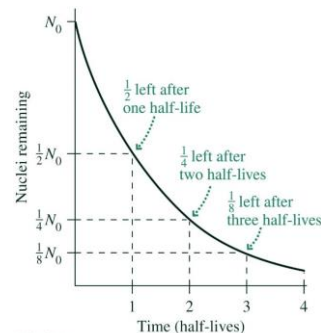


© Johan D'heer

19

## Conceptvraag

- A radioactive isotope decays by  $\beta$ - emission with a half-life of 1.0 min. During the first 1.0 min, a particular sample emits 1000  $\beta$ - particles. During the next 1.0 min, the number of  $\beta$ - particles this sample will emit will be closest to
- A) 250.
- B) 500.
- C) 1000.
- D) 1500.
- E) 2000.



© Johan D'heer

20

### Conceptvraag

- A radioisotope has a half-life of  $\tau$  at a temperature of 150 K. If its temperature is increased to 300 K, what will its half-life be?
- A)  $4\tau$
- B)  $2\tau$
- C)  $\tau$
- D)  $\tau/2$
- E)  $\tau/4$

© Johan D'heer

21

### Conceptvraag

- The half-life of cobalt-60 is 5.3 years, while that of strontium-90 is 28 years. Suppose you have a sample of each, such that they initially contain equal numbers of atoms of these nuclides. How will the activities (number of decays per second) of the samples compare?
- A) The activity of the cobalt-60 sample will be greater.
- B) The activities cannot be compared without more information.
- C) The activities will be equal.
- D) The activity of the strontium-90 sample will be greater.

© Johan D'heer

22



## Enkele Isotopen en Hun Halfwaardetijden

Table 38.1 Selected Radioisotopes

Isotope	Half-life	Decay Mode	Comments
Carbon-14 ( $^{14}_6\text{C}$ )	5730 years	$\beta^-$	Used in radiocarbon dating
Iodine-131 ( $^{131}_{53}\text{I}$ )	8.04 days	$\beta^-$	Fission product abundant in fallout from nuclear weapons and reactor accidents; damages thyroid gland
Oxygen-15 ( $^{15}_8\text{O}$ )	2.03 minutes	$\beta^+$	Short-lived oxygen isotope produced with cyclotrons and used for medical diagnosis in PET
Potassium-40 ( $^{40}_{19}\text{K}$ )	$1.25 \times 10^9$ years	$\beta^-$	Comprises 0.012% of natural potassium; dominant radiation source within the normal human body; used in radioisotope dating
Plutonium-239 ( $^{239}_{94}\text{Pu}$ )	24,110 years	$\alpha$	Fissile isotope used in nuclear weapons; produced by neutron capture in $^{238}_{92}\text{U}$
Radium-226 ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ )	1600 years	$\alpha$	Highly radioactive isotope discovered by Marie and Pierre Curie; results from decay of $^{238}_{92}\text{U}$
Radon-222 ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ )	3.82 days	$\alpha$	Radioactive gas formed naturally in decay of $^{226}_{88}\text{Ra}$ ; seeps into buildings, where it may cause serious radiation exposure
Strontium-90 ( $^{90}_{38}\text{Sr}$ )	29 years	$\beta^-$	Fission product that behaves chemically like calcium; readily absorbed into bones
Tritium ( $^3_1\text{H}$ )	12.3 years	$\beta^-$	Hydrogen isotope used in biological studies and to enhance yields of nuclear weapons
Uranium-235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ )	$7.04 \times 10^8$ years	$\alpha$	Fissile isotope comprising 0.72% of natural uranium; used as reactor fuel and in simple nuclear weapons
Uranium-238 ( $^{238}_{92}\text{U}$ )	$4.46 \times 10^9$ years	$\alpha$	Predominant uranium isotope; cannot sustain a chain reaction

© Johan D'I © 2012 Pearson Education, Inc.

23

## 38.2 Toepassing: C-14 datering

- C-14 heeft een halfwaardetijd van 5730 jaar.
- Dit isotoop wordt opgenomen door alle levende wezens en heeft een vrijwel constante concentratie in levende wezens (Er is een evenwicht tussen de koolstof die vervalt en die wordt opgenomen uit o.a. lucht)
- Eenmaal de opname stopt, begint de concentratie aan C-14 af te nemen.
- Kent men de oorspronkelijke concentratie, dan kan men via meting van de overblijvende concentratie de "leeftijd" van het voorwerp, bvb. een been, ongeveer bepalen :

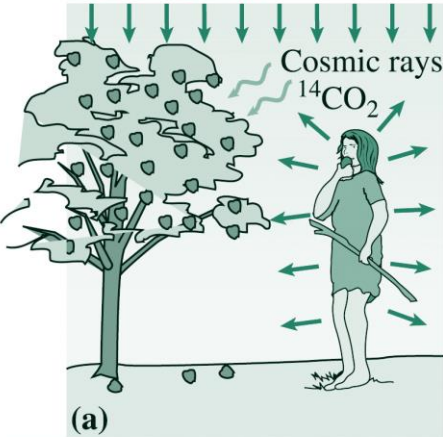
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}$$

© Johan D'heer

24



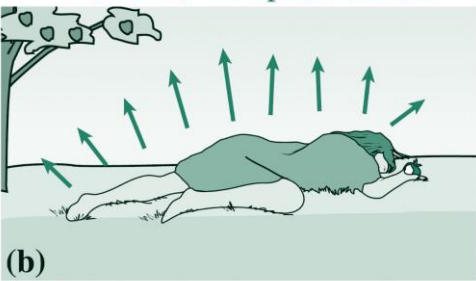
Carbon-14 formed in the atmosphere is incorporated into a living organism through the food chain.



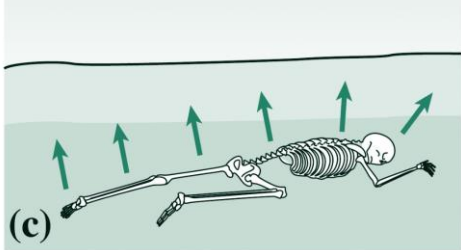
(a)

Cosmic rays  
 $^{14}\text{CO}_2$

At death,  $^{14}\text{C}$  uptake ceases.



(b)

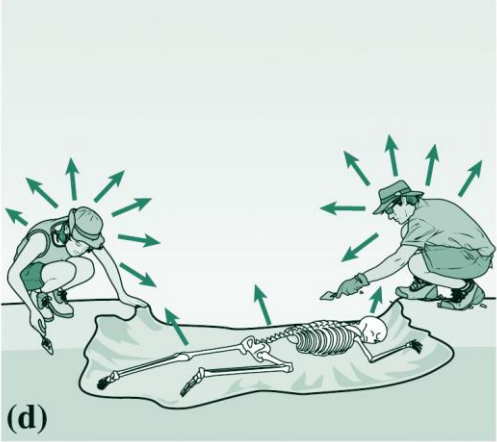


(c)

Much later,  $^{14}\text{C}$  activity has decayed considerably.

© 2012 Pearson Education, Inc.

© Johan D'heer



(d)

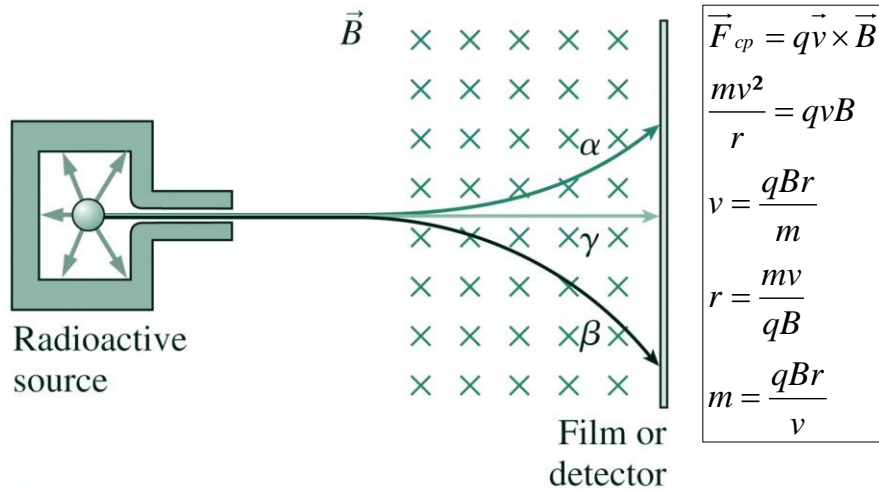
Archaeologists excavate the long-dead remains. By measuring  $^{14}\text{C}$  activity, they can infer the time since death. Note that the archaeologists, with their active  $^{14}\text{C}$  intake, are more radioactive than their ancient ancestor.

© 2012 Pearson Education, Inc.

© Johan D'heer

## 38.2 Vervalprocessen en Soorten Straling

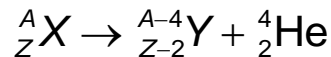
- Kernen die vervallen zenden radioactieve straling uit.
- Er zijn 3 soorten natuurlijke straling:  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  straling.
- Gedrag in een magnetisch veld :



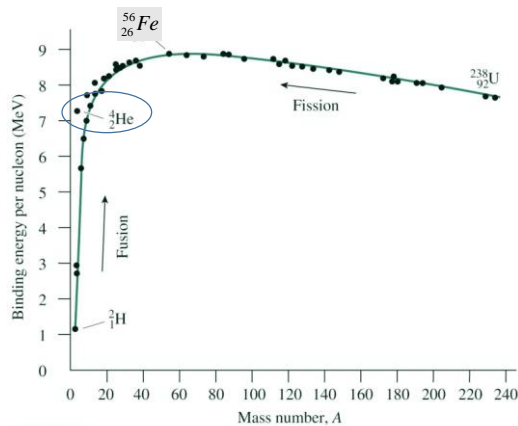
27

## 38.2 Vervalprocessen en Soorten Straling

- Bij **alfa verval** wordt een alfa-deeltje (een helium-4 kern) uitgezonden → Bij alfa verval daalt het atoomnummer met 2 en het massagetal met 4.



Een helium-4 kern is uitzonderlijk stabiel vergeleken met andere “lichte” kernen : vandaar dat bij spontaan verval steeds dit “cluster” van 2 protonen en 2 neutronen wordt uitgestoten.



28

## 38.2 Vervalprocessen en Soorten Straling

- **beta verval** komt voor in 3 verschillende vormen:
  - **$\beta^-$  verval**: hierbij wordt een elektron en een antineutrino uitgezonden: 
$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{\nu}$$
  - Bij dit verval verhoogt het atoomnummer met 1 en blijft het massagetal onveranderd.
  - In de kern wordt een neutron omgezet in een proton.
 
$${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$$
  - Het bestaan van het neutrino en het antineutrino werd destijds voorspeld (1930, Pauli) i.v.m. de energiebalans maar pas tientallen jaren later (1956) experimenteel ontdekt. (zéér weinig interactie met de materie)

© Johan D'heer

29

## 38.2 Vervalprocessen en Soorten Straling

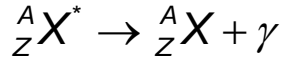
- **$\beta^+$  verval**: hierbij wordt een positron en een neutrino uitgezonden: 
$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+ + \nu$$
- Bij dit verval verlaagt het atoomnummer met 1 en blijft het massagetal onveranderd.
- In de kern wordt een proton omgezet in een neutron.
- **Elektronvangst**: hierbij neemt de kern een elektron op, afkomstig van de binnenste schillen, onder uitzenden van een neutrino: 
$${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu$$
- Bij dit verval verlaagt het atoomnummer met 1 en blijft het massagetal onveranderd.
- In de kern wordt een proton omgezet in een neutron.
- Elektronvangst wordt meestal gevolgd door uitzenden van **röntgenstraling** (waarom?, waar ontstaat die?).

© Johan D'heer

30

## 38.2 Vervalprocessen en Soorten Straling

- Bij **gamma verval**, gaat een geëxciteerde kern een hoog-energie foton (gamma straling) uitzenden, zonder dat  $A$  of  $Z$  zal veranderen:



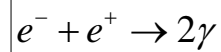
- Opm.: het sterretje duidt op een geëxciteerde toestand.
- Opm.: na alfa of beta straling verkeert de resulterende kern dikwijls in dergelijke geëxciteerde toestand en volgt dus “meteen” ook nog gamma straling.
- **OPMERKINGEN:**
  - Neutrino en antineutrino zijn elkaars antideeltjes.
  - Beide zijn neutraal en quasi massaloos en zullen dus praktisch niet met materie interageren.
  - Ook een elektron ( $e^- = \beta^-$ ) en een positron ( $e^+ = \beta^+$ ) vormen een “deeltje – antideeltje” paar

31

## 38.2 Deeltje – anti-deeltje paar: Creatie en annihilatie

- Een deeltje – anti-deeltje paar wordt o.a. gekenmerkt door de mogelijkheid tot “creatie” en “**annihilatie**”.

- bv : **annihilatie** van een elektron – positron paar :



álle massa wordt omgezet in elm straling  
TWEЕ fotonen omwille van impulsbehoud ( $p = h/\lambda$ )

- Rustenergie van zowel elektron als positron :  $m_0c^2 = 0,51 \text{ MeV}$
- Frequentie en golflengte van de fotonen :

$$2hf = 2m_0c^2 \rightarrow f = m_0c^2/h = 1,25 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$$

$$\lambda = c/f = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

32

## 38.2 Deeltje – anti-deeltje paar: Creatie en annihilatie

- Een deeltje – anti-deeltje paar wordt o.a. gekenmerkt door de mogelijkheid tot “**creatie**” en “**annihilatie**”.

- bv : **creatie** van een elektron – positron paar :  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$   
massa “ontstaat” uit elm straling

- Rustenergie van zowel elektron als positron :  $m_0c^2 = 0,51 \text{ MeV}$

- Minimale frequentie (en maximale golflengte) van de fotonen :

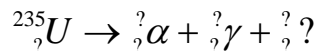
$$hf \geq 2m_0c^2 \rightarrow f \geq m_0c^2/h = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$$

$$\lambda = c/f \leq 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

33

## 38.2 Radioactief verval : Spontane kernreacties

*Vul in*



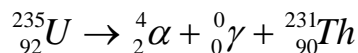
Uranium is steeds  $Z=92$  (tabel van Mendeljev)

$\alpha$  is steeds  $Z=2$  en  $A=4$ ;  $\gamma$  is steeds  $Z=0$  en  $A=0$

Behoud van lading  $Z$  :  $Z? = 92 - 2 = 90 \rightarrow \text{Th} \langle \Leftarrow \text{Mendeljev} \rangle$

Behoud van massa(geval)  $A$  :  $A_{Th} = 235 - 4 = 231$

Resultaat:

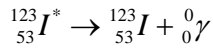
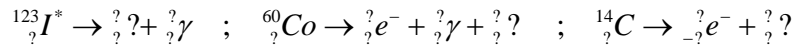


Opmerking  ${}^{235}_{92}\text{U}$ :

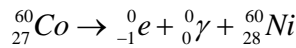
- halveringstijd bij spontaan verval  $7 \cdot 10^8$  jaar;
- als kernbrandstof (mits interactie met neutronen)

34

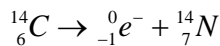
## 38.2 Radioactief verval : Spontane kernreacties



geëxiteerde kern verliest zijn extra energie via foton ( $T_{1/2} = 13\text{uur}$ )  
(*nucleaire geneeskunde : diagnoses*)



(*nucleaire geneeskunde : therapie*) ( $T_{1/2} = 5.27\text{jaar}$ )



(archeologie, ouderdomsbepaling,  $T_{1/2} = 5730\text{jaar}$ )

De VS en Europa clashen over een nieuw internationaal kernakkoord. Ons land kan de dupe worden, als de reactor in Mol geen Amerikaans uranium meer krijgt. Een hele medische industrie leeft van de stoffen die de reactor produceert.

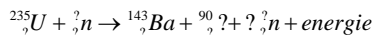
(De Morgen, 03/12/2014)

35

## 38.2 Geïnduceerde kernreacties

Wanneer een energierijk deeltje (proton, neutron, alfa, elektron, ...) op een (stabiele) kern wordt geschoten kan ook dit een kernreactie tot gevolg hebben. Dit komt onder meer voor in zowel kernfissie als kernfusie reacties (fissie : kernreactoren; fusie : bv in de zon).

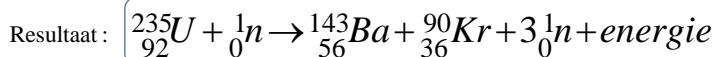
Vul in



Uranium is  $Z=92$  en Barium is  $Z=56$  (<Mendeljev); n (neutron) is steeds  $Z=0$  en  $A=1$ ;

Som der ladingen  $Z$  :  $Z = 92 - 56 = 36 \rightarrow \text{Kr}$  (Mendeljev)

som der massa's  $A$  : aantal vrijgekomen neutronen  $= (235 + 1) - (143 + 90) = 3$



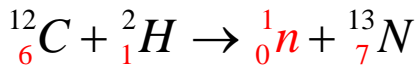
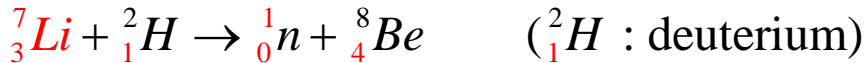
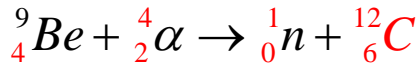
Opmerkingen :

- ${}^{143}_{56}\text{Ba}$  en  ${}^{90}_{36}\text{Kr}$  zijn zelf niet stabiel en vervallen spontaan tot andere kernen
- wanneer een neutron invalt op een Uranium-kern kunnen ook andere "brokstukken" ontstaan
- kernreactor blijft stabiel als één van de drie neutronen opnieuw een uraniumkern laat splijten

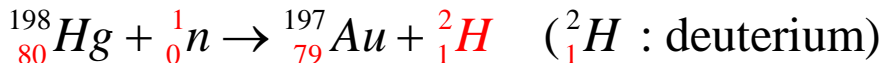
36

## 38.2 Geïnduceerde kernreacties

Zwart = gegeven; rood = gevraagd!



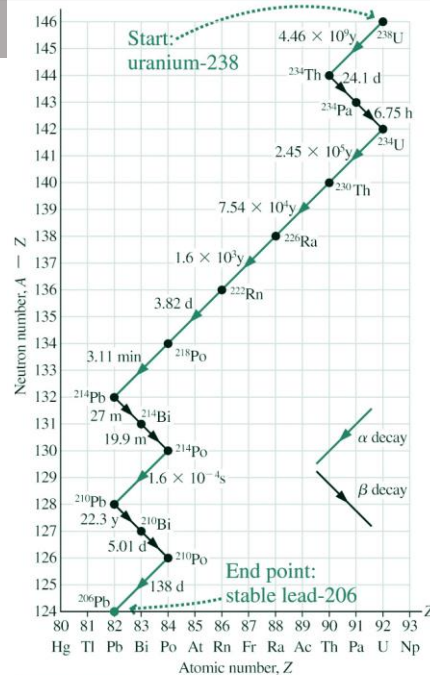
en ten slotte voor de alchemisten :



37

## 38.2 Verval Series

- Lang-levende radioactieve isotopen vervallen via een **vervalreeks** die kort-levende isotopen produceert.
- Het eind-isotoop in de reeks is stabiel.
- De grafiek toont de vervalreeks voor uranium-238.
- Isotopen als radon en radium, gevaarlijk voor de gezondheid, komen voor in deze vervalreeks.
- Het eindpunt is een stabiele kern (hier lood-206)
- Vier gekende reeksen (cfr. wikipedia : "decay chain")



© 2012 Pearson Education, Inc.

38



## 38.2 Toepassingen van Straling

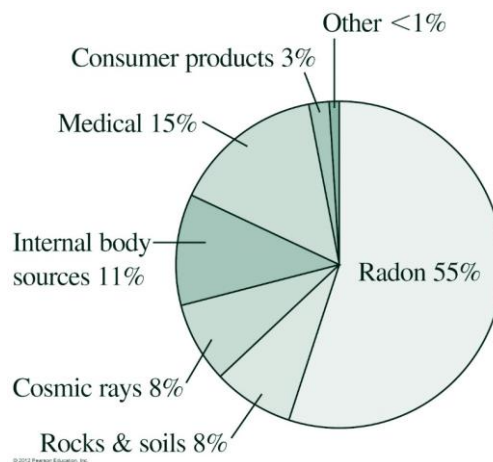
- Radioactieve straling heeft verschillende nuttige toepassingen, zoals:
  - **Tracers** voor chemische reacties, biologische research, medische diagnostiek, materiaalonderzoek en analyse van slijtage in mechanische onderdelen.
  - **Behandeling van kanker**, gebaseerd op het feit dat straling meer schadelijk is voor vlug-groeiende cellen dan gewone cellen.
  - **Bewaren van voedsel** door bacteriën en enzymen te vernietigen.
  - **Insecten bestrijding** door sterilisatie van insecten waardoor deze zich niet meer kunnen voortplanten.
  - **Rookmelders** bevatten soms radioactieve stoffen welke de rook ioniseren en op die manier een elektrisch alarm in werking stellen.
  - **Activatieanalyse** door materialen met neutronen te bombarderen waardoor bvb. radioactieve isotopen ontstaan, kenmerkend voor bepaalde materialen.

© Johan D'heer

39

## 38.2 Biologische Effekten van Straling

- Straling beschadigt selectief snelgroeiende cellen.
  - Hierdoor is straling goed als kankerbehandeling, maar tegelijkertijd schadelijk voor jongeren en voor voortplantingscellen.
  - Straling kan mutaties en kankers veroorzaken.
  - De meeste straling die mensen opnemen komt van natuurlijke bronnen.
- De grafiek toont de bronnen van straling voor de gemiddelde inwoner van de USA (natuurlijke bronnen in het grijs).
- De "other" categorie omvat kernreactoren en kernwapens.

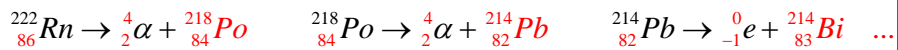


© Johan D'heer

40

## 38.2 Dosimetrie

- Radioactieve straling kan dus nuttig zijn, maar kan door haar ioniserend karakter ook schadelijk zijn voor weefsel, vooral bij hoge dosissen.
- Vb : Radon (Rn) in woningen (uit bouwmaterialen en uit de grond) is een belangrijke oorzaak van longkanker : zie vervalreeks : vertrekkend bij Rn-222 komen vier alfadeeltjes en vier beta-deeltjes vrij vooraleer we het stabiele Pb-206 bereiken.
- Vergelijk de halveringstijden voor en na Radon-222 (cfr vervalreeks)



- DOSIS: hoe druk je dit uit?
- SCHADELIJK: hoe meet je de schadelijkheid?

## 38.2 Activiteit van een Radioactieve Bron

- De *sterkte van een radioactieve bron* wordt gegeven door haar ACTIVITEIT (= aantal desintegraties per tijdseenheid).
  - SI eenheid: Becquerel (Bq)
  - 1 Bq = 1 desintegratie/s
  - Oude eenheid: Curie (Ci)
  - 1 Ci = activiteit van 1 g radium =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq
- De activiteit van een radioactieve bron vermindert met de tijd (waarom?)
- Bij vermelden van de activiteit moet men dus ook het tijdstip vermelden.

## 38.2 Geabsorbeerde Dosis

- Radioactieve straling kan schadelijk zijn wanneer ze wordt geabsorbeerd.
- De grootheid GEABSORBEERDE DOSIS (energie die per massa-eenheid wordt geabsorbeerd) wordt uitgedrukt in
  - SI eenheid: Gray (Gy)
  - $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / 1 \text{ kg}$
  - Oude eenheid: Rad (radiation absorbed dose)
  - $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$

## 38.2 Equivalente Dosis

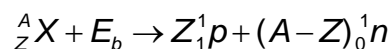
- Dezelfde hoeveelheid energie afkomstig van verschillende soorten straling kan een verschillend biologisch effect hebben. 1 Gy  $\alpha$ -straling brengt bvb. meer biologische schade teweeg dan 1 Gy  $\gamma$ -straling (Waarom?  $\alpha$ -deeltjes en andere zware deeltjes bewegen trager dan  $\beta$ - en  $\gamma$ -deeltjes met eenzelfde energie. Bijgevolg zullen ioniserende botsingen met  $\alpha$ -deeltjes dichter bij elkaar plaatsvinden, en daardoor meer blijvende biologische schade kunnen aanrichten ).
- Om dit effect in rekening te brengen gebruikt men de grootheid EQUIVALENTE DOSIS.
- $\text{equivalente dosis} = \text{geabsorbeerde dosis} \times \text{relatieve biologische effectiviteit}$

## 38.2 Stralingsziekte

- Hoge dosissen straling geven meestal permanente schade en geven aanleiding tot zgn. stralingsziekte met als mogelijke symptomen:
  - Misselijkheid
  - Vermoeidheid
  - Haaruitval
- Als je (een van) deze symptomen hebt, betekent dit nog niet dat je de stralingsziekte hebt!

## 38.3 Bindingsenergie van de Kern

- Om een kern te ontbinden in zijn nucleonen is energie nodig om de sterke kernkracht te overwinnen.



- Rekening houdend met de betrekking  $E = mc^2$ , volgt er uit behoud van energie:

$$E_b = [Zm_p c^2 + (A-Z)m_n c^2] - m_X c^2$$

$$E_b = \{[Zm_p + (A-Z)m_n] - m_X\}c^2 = \Delta mc^2$$

- De massa's van de samenstellende nucleonen is groter dan de massa van de samengestelde kern: het **massadefect**.
- De energie die dit massadefect vertegenwoordigt is de energie  $E_b$  die nodig is om de kern te ontbinden in zijn nucleonen.
- Dit is ook de energie die vrijkomt als de kern gevormd wordt uit zijn individuele nucleonen: de **bindingsenergie**.

### 38.3 Eenheden voor Massa

- Massa van kernen en nucleonen drukt men uit in de **atomaire massa eenheid  $u$** .
- $1 u = 1/12$  van de massa van een C-12 atoom  
=  $1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Dit is ongeveer gelijk aan de massa van een proton of de massa van een neutron → Vandaar dat het massagetal  $A$  de (afgeronde) massa van de kern geeft in eenheden  $u$ .
- Vermits massa en energie equivalent zijn ( $E = mc^2$ ), kan men massa's ook uitdrukken in (equivalente) energie-eenheden.
- $1 u = 931,494 \text{ MeV}/c^2$ . (reken dit na)
- Bvb.: massa van He-4 kern is 4,001506  $u$ , equivalent met 3727,38 MeV. (vgl met de massa van 2 protonen + 2 neutronen)
- Opgelet : massa kern  $\neq$  massa atoom (waarom?)
- Opgelet : tabel van Mendeljev : gewogen gemiddelde van de massagetalen van de verschillende isotopen! (kenmerkend voor chemische reacties)

52

### 38.3 Eenheden voor Massa

**Table 38.2** Selected Masses

	Mass (kg)	Mass (u)	Mass (MeV/ $c^2$ )
Electron	$9.109 39 \times 10^{-31}$	0.000 548 579	0.510 999
Proton	$1.672 62 \times 10^{-27}$	1.007 276	938.272
Neutron	$1.674 93 \times 10^{-27}$	1.008 665	939.566
$^1_1\text{H}$ atom	$1.673 53 \times 10^{-27}$	1.007 825	938.783
$\alpha$ particle ( $^4_2\text{He}$ nucleus)	$6.644 66 \times 10^{-27}$	4.001 506	3727.38
$^{12}_6\text{C}$ atom	$1.992 65 \times 10^{-26}$	12	11 177.9
Unified mass unit (u)	$1.660 54 \times 10^{-27}$	1	931.494

© 2012 Pearson Education, Inc.

He atoom = He kern + 2 elektronen →  $6,6461 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  →  $4,0026 u$  → 3728,4 MeV

$$E = mc^2$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

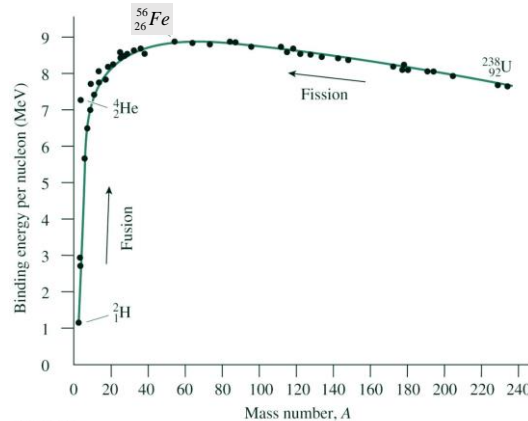
$$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad 1 \text{ V} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

© Johan D'heer

53

### 38.3 Energie uit de Kern

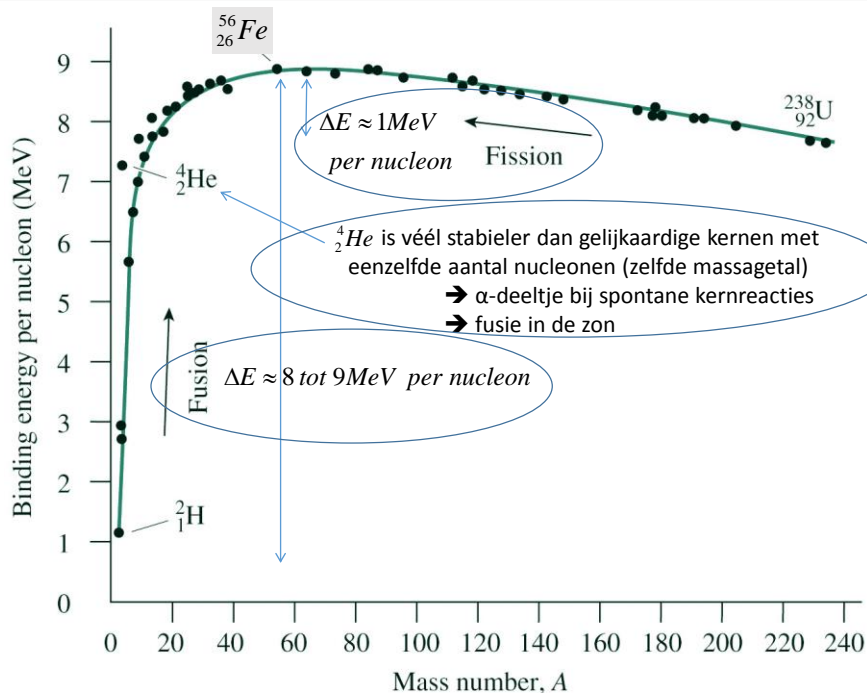
- De **bindingsenergie curve** geeft de bindingsenergie per nucleon als functie van het massagetal  $A$ .
- In kernen met een grote (kleine) bindingsenergie per nucleon zijn de nucleonen sterk (zwakker) gebonden en komt er dus veel (minder) energie vrij bij vorming van deze kernen.



© Johan D'heer

© 2012 Pearson Education, Inc.

54



© Jol © 2012 Pearson Education, Inc.

55

### 38.3 Energie uit de Kern

- De **bindingsenergie curve** toont dat de meest stabiele kernen een massa hebben die ongeveer deze van ijzer is.
  - **Kernfusie** maak energie vrij door kernen lichter dan ijzer te laten fusioneren.
    - De ontstane kern is zwaarder dan de fusionerende kernen en zal bij vorming meer energie vrijmaken dan er nodig is om de fusionerende kernen te ontbinden in nucleonen.
  - **Kernfissie** maakt energie vrij door kernen zwaarder dan ijzer te splitsen.
    - De ontstane kernen zullen bij vorming meer energie vrijmaken dan er nodig is om de splitsende kern te ontbinden in nucleonen.

© Johan D'heer

56

### 38.3 Kernsplijting

- In neutron-geactiveerde splijting van uranium-235 absorbeert een U-235 kern een neutron. Die kern wordt hierdoor onstabiel en splijt.
  - Het fissie proces produceert in het algemeen twee verschillende lichtere kernen en 2 à 3 neutronen:
 
$${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow X + Y + b{}_0^1n$$
  - Sommige van deze neutronen kunnen op hun beurt andere U-235 splijten.
  - Onder de gepaste condities kan er een **kettingreactie** ontstaan.
    - Hiervoor is een **kritische massa** van splijtmateriaal nodig.



© Johan D'heer

57



### 38.3 Kernsplijting

Vul in  $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{143}_{56}\text{Ba} + ^{90}_{36}\text{Kr} + ?\text{n} + \text{energie}$

Uranium is  $Z=92$  en Barium is  $Z=56$  (<Mendeljev); n is steeds  $Z=0$  en  $A=1$ ;

Som der ladingen  $Z$  :  $Z = 92 - 56 = 36 \rightarrow \text{Kr}$  ( $\leftarrow$  Mendeljev)

som der massa's  $A$  : aantal neutronen? =  $(235 + 1) - (143 + 90) = 3$

Resultaat :  $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{143}_{56}\text{Ba} + ^{90}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n} + \text{energie}$

Opmerkingen :

- $^{143}\text{Ba}$  en  $^{90}\text{Kr}$  zijn zelf niet stabiel en vervallen spontaan tot andere kernen
- per splijting komt ongeveer 200 MeV aan energie vrij  
(cfr curve bindingsenergie)
- wanneer een neutron invalt op een Uranium-kern kunnen ook andere "brokstukken" ontstaan
- kernreactor blijft stabiel als één van de drie neutronen opnieuw een uraniumkern laat splijten

58

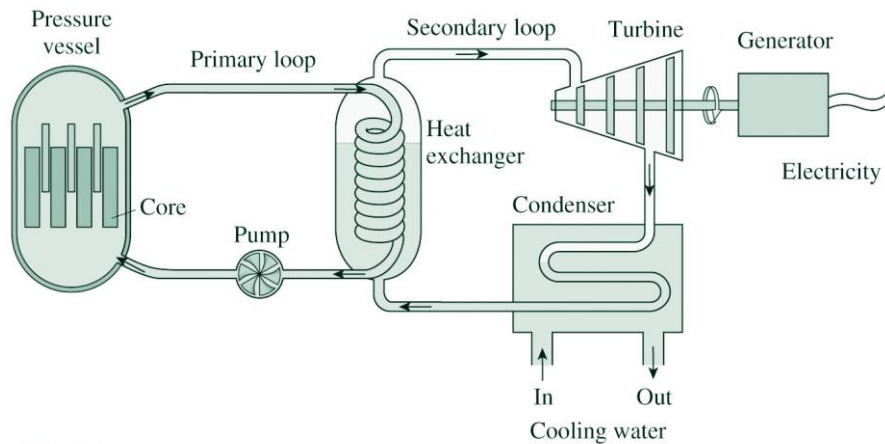
### 38.3 Fissie Reactoren

- Kernfissie reactoren voorzien momenteel in ongeveer 17% van wereldbehoefte aan electriciteit. Voor deze reactoren is nodig:
  - Uranium brandstof.
    - In de meeste reactoren moet de brandstof **verrijkt** zijn met het isotoop U-235.
  - Een **moderator**: een stof die de neutronen vertraagd zodat ze meer kans maken om een kern te splijten.
    - In veel reactoren is de moderator water.
  - Een **koelvloeistof** (meestal water) die de ontstane warmte in de reactie moet afvoeren.
  - **Controle staven** die (een teveel aan) neutronen kunnen absorberen en de reactiesnelheid kunnen controleren.
- Terminologie :
  - **Generatietijd** : gemiddelde tijd tussen 2 opeenvolgende splijtingen
  - **Multiplatiefactor k** : gemiddeld aantal neutronen van één fissie die een volgende fissie opwekken (stabiele toestand bij  $k=1$ )

© Johan D'heer

59

### 38.3 Fissie Reactoren



© 2012 Pearson Education, Inc.

A complete power plant using a pressurized-water reactor

© Johan D'heer

60

### 38.3 Fissie Reactoren

- De kerncentrale Doel 4 (stilgelegd in augustus 2014 omwille van olieverlies van de turbine) produceert in normale omstandigheden een vermogen van 1040 MW aan elektriciteit. Als je aanneemt dat het rendement (omzetting van warmte in elektriciteit) ongeveer 33% bedraagt, hoeveel kg uranium-235 is er dan per jaar nodig? (schatting op 10% nwk)
- Hoeveel kg natuurlijk uranium is dat dan?
- Hoeveel kg steenkool zou hiervoor nodig zijn? (à 28 MJ/kg; veronderstel rendement eveneens 33%)

1040 MW elektriciteit  $\rightarrow$  3100 MW warmte  $\rightarrow$  3100 MJ =  $3,1 \cdot 10^9$  J benodigde energie per seconde  $\rightarrow$  ongeveer  $10^{17}$  J per jaar

Per splijting :  $200 \text{ MeV} = 320 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$  (235 nucleonen à  $\pm 1 \text{ MeV}$ )

Dus per seconde ongeveer  $10^{20}$  splijtingen nodig. Per jaar :  $3 \cdot 10^{27}$  splijtingen

Massa van één uranium-235 atoom :  $235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$

Totale massa uranium-235 : ongeveer 1000 kg ("energieinhoud" van  $10^{14}$  J per kg)

Totale massa uranium delfstof (0,7% uranium 235) :  $140\,000 \text{ kg} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ kg}$

Equivalent steenkool : ongeveer  $10^{17}$  J per jaar :  $3 \cdot 10^9 \text{ kg}$  steenkool per jaar

61

### 38.3 Fissie Reactoren

Een kernreactor is stabiel als de multiplicatiefactor  $k=1$ .  
Stel dat  $k=1,001$ , hoelang zal het dan duren vooraleer het door de reactor ontwikkelde vermogen verdubbeld is?

- (a) Als de reactie op gang wordt gehouden door "prompt neutrons", zijnde neutronen die direct bij de splijting vrijkomen (generatietijd  $10^{-4}s$ )  
(b) Als de reactie op gang wordt gehouden door "delayed neutrons", zijnde neutronen die met "vertraging" uit de vervalproducten vrijkomen (generatietijd  $10^{-1}s$ )

$$x2 \text{ na } n \text{ multiplicatie's : } k^n = 2 \quad \text{of} \quad n \ln(k) = \ln(2) \quad \text{of} \quad n = \frac{\ln(2)}{\ln(k)}$$

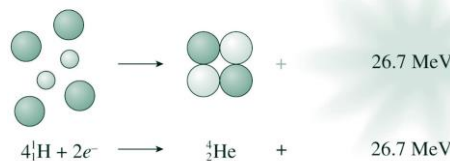
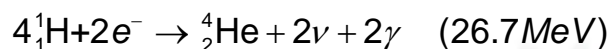
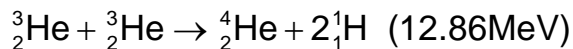
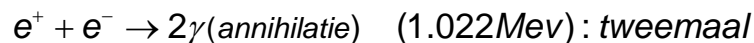
$$\text{met } k = 1.001 \rightarrow n = 693 \Rightarrow (a) \rightarrow t = 0.07s \quad (b) \rightarrow t = 70s$$

Enkel in geval b is de reactor onder controle te houden met het mechanisch inbrengen van controlestaven!

62

### 38.3 Kernfusie

- In de zon en de meeste sterren gebeurt fusie van waterstof.
  - De reacties in deze zgn. **proton-proton cyclus** zijn

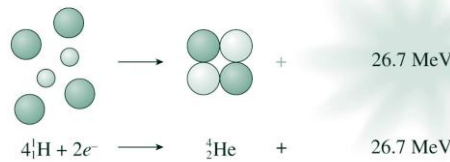


© Johan D'heer

63

### 38.3 Kernfusie

- In de zon en de meeste sterren gebeurt fusie van waterstof.  
 De energie van de fotonen samen met de kinetische energie van de reactieproducten geven een totaal vrijgekomen energie van 26,7 MeV.  
 Ga dit na aan de hand van het massadefect! (zie tabel 38.2)
- Het netto effect is de samensmelting van 4 waterstof kernen en twee electronen tot een helium-4 kern.
- De vrijgekomen energie in dit proces is 26,7 MeV.



© Johan D'heer

64

### 38.3 Moeilijkheden bij Fusie op Aarde

- Een fusie reactor moet
  - De fusiebrandstof opwarmen tot ~100 MK of hoger (geeft een zgn. plasma: mengsel van individuele protonen, elektronen en neutronen).
  - Dit hete materiaal kunnen vasthouden tijdens het onttrekken van energie. (cfr “primary loop” bij de fusiereactor)
  - In sterren gebeurt dit door hun grote gravitatiekracht.
    - Niet mogelijk op aarde!
  - De twee huidige benaderingen zijn
    - **Magnetische opsluiting:** het plasma wordt opgesloten in een “magnetische fles”. Dit zijn magnetische velden die het plasma omsluiten.
    - **Traagheidsopsluiting:** het plasma wordt gedurende zeer korte tijd samengeperst tot hoge dichtheid, waardoor de temperatuur sterk stijgt en fusie kan optreden.
      - Dit proces gebeurt in fusiebommen (H-bom).
  - Onderzoek naar gecontroleerde fusie is gestart in de jaren 50, maar een commercieel nuttige fusiereactor is nog niet in zicht!

© Johan D'heer

65