

# Medische Beeldvorming



**KLAS 5 HAVO**

# MEDISCHE BEELDVORMING

## Over deze lessenserie

In deze module worden de natuurkundige principes en technieken uitgelegd die toegepast worden bij het maken van foto's en beelden in de medische praktijk.

Het Dopplereffect en paragraaf 4.2 horen niet tot de verplichte stof voor het schriftelijk eindexamen.

---

## Colofon

|               |                                                                                   |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Project       | Nieuwe Natuurkunde                                                                |
| Auteur        | Bart Lindner                                                                      |
| M.m.v.        | Hans van Bommel, Kees Hooyman, Henk van Lubeck                                    |
| Vormgeving    | Loran de Vries                                                                    |
| NiNa Redactie | Harrie Eijkelhof, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust |
| Versie        | 20-8-2009                                                                         |

---

## Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2009

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten,
  - als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt, voor al of niet commercieel hergebruik,
- mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:
- schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, voor dit materiaal vertegenwoordigd door de Universiteit van Amsterdam (via [info@nieuwenatuurkunde.nl](mailto:info@nieuwenatuurkunde.nl)),
  - bij hergebruik of verspreiding dient de gebruiker de bron correct te vermelden, en de licentievoorwaarden van dit werk kenbaar te maken.

Delen van dit lespakket, m.n. eindopdracht 1, zijn gebaseerd op materiaal dat is ontwikkeld voor een module in het vak Natuur, Leven en Technologie, en zijn opgenomen met toestemming van de SLO te Enschede. Hiervoor geldt een Creative Commons licentie zoals omschreven in <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl/>

Voor zover wij gebruik maken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen:

[info@nieuwenatuurkunde.nl](mailto:info@nieuwenatuurkunde.nl)

De module is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, Universiteit van Amsterdam en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit (het gebruik van) deze module.

---

# INHOUDSOPGAVE

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>MEDISCHE BEELDVORMING.....</b>                 | <b>5</b>  |
| INLEIDING .....                                   | 5         |
| <b>1    RÖNTGENFOTOGRAFIE .....</b>               | <b>7</b>  |
| 1.1    DE RÖNTGENFOTO .....                       | 7         |
| 1.2    ABSORPTIE VAN RÖNTGENSTRALING .....        | 13        |
| 1.3    DE RÖNTGENFOTO IN DE PRAKTIJK.....         | 17        |
| <b>2    NUCLEAIRE DIAGNOSTIEK .....</b>           | <b>23</b> |
| 2.1    ALFA-, BÈTA EN GAMMASTRALING .....         | 23        |
| 2.2    BOUW VAN ATOOMKERN; ISOTOPEN .....         | 29        |
| 2.3    HALVERINGSTIJD.....                        | 34        |
| 2.4    NUCLEAIRE DIAGNOSTIEK IN DE PRAKTIJK ..... | 39        |
| <b>3    IONISERENDE STRALING.....</b>             | <b>44</b> |
| 3.1    EFFECTEN VAN STRALING .....                | 44        |
| 3.2    ACHTERGRONDSTRALING EN BESCHERMING .....   | 49        |
| <b>4    OVERIGE BEELDTECHNIEKEN .....</b>         | <b>55</b> |
| 4.1    ECHOGRAPHIE .....                          | 55        |
| 4.2    KEUZELES: CT-SCAN EN MRI-SCAN .....        | 61        |
| 4.3    OVER HET BEELD.....                        | 66        |
| <b>5    AFSLUITING .....</b>                      | <b>72</b> |
| EINDOPDRACHTEN .....                              | 72        |

## GLOBALE OPBOUW VAN HET LESMATERIAAL

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De *belangrijkste leerstof* is weergegeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

De tekst van ieder hoofdstuk begint met een **oriëntatieopdracht**. Deze opdrachten staan in de **paarse** tekstvakken.

In het **groene** tekstvak box **“Extra”** staat informatie die niet tot de leerstof behoort.

### 2 Nucleaire diagnostiek

| Hoofdstukvraag                                                                                                                                                                                                                                               | Wat gebeurt er met radioactief tellen de eerste 10 minuten? |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <p><b>Oriëntatieopdracht</b></p> <p>Het lesmateriaal geeft een breed overzicht van materiaal van belang voor de cursus. Het is bedoeld om de cursus te begeleiden. Het is bedoeld om de cursus te begeleiden. Het is bedoeld om de cursus te begeleiden.</p> |                                                             |
| <p><b>Extra</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk begint met een oriëntatieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p>                                                                                                                   |                                                             |
| <p><b>De vraagstelling</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p>                                                                                               |                                                             |
| <p><b>Voorbeeld - Bepaal van hoofdstuk 1.4</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p>                                                                           |                                                             |

Belangrijke nieuwe **vergelijkingen** uit de natuurkunde zijn aangegeven in **blauwe** tekstvakken. Deze heb je nodig om rekenwerk mee te kunnen verrichten.

In de **blauwe** tekstvakken **“voorbeeld”** staan uitgewerkte berekeningen van behandelde formules

In de **grijze** tekstvakken staan de **practicumopdrachten**.

De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een **reflectieopdracht**. Deze opdrachten staan in de **paarse** tekstvakken.

In het **blauwe** tekstvak **“Begrippen”** staan belangrijkste termen uit de tekst.

### Practicum - Doppler effect

De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.

| Tekstvakken                                                                                                                                               | Begrippen                                                                                                                                               | Samenvatting                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Tekstvakken</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p> | <p><b>Begrippen</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p> | <p><b>Samenvatting</b></p> <p>De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.</p> |

**Opgaven**

De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectieopdracht. Deze opdrachten staan in de paarse tekstvakken.

In het **blauwe** tekstvak **“Samenvatting”** staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

**Opgaven** staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

# Medische Beeldvorming

## Inleiding

In een ziekenhuis wordt gebruik gemaakt van medische diagnostiek. Eén methode van diagnostiek is het maken van beelden van (delen van) het menselijk lichaam. Daarbij worden met behulp van diverse vormen van elektromagnetische straling de inwendige organen zichtbaar gemaakt. Deze module gaat over mogelijkheden en gevaren van diverse technieken voor medische beeldvorming.

|                   |                                                                     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Startvraag</b> | <b>Wat weet je al van straling, radioactiviteit en diagnostiek?</b> |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|

### Oriëntatieopgave - Test je voorkennis

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- |                                                                                                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| a. Kankerpatiënten kan men soms genezen door hen te bestralen.                                                      | ja / nee |
| b. Na het maken van een röntgenfoto blijft het lichaam van de patiënt een tijdje radioactief.                       | ja / nee |
| c. Voedsel dat bestraald is, zal minder snel bederven.                                                              | ja / nee |
| d. Bij het maken van een beeld van het inwendige van een lichaam wordt naast röntgenstraling ook geluid gebruikt.   | ja / nee |
| e. Straling van een radioactieve bron is ongeschikt voor het maken van een beeld van het binnenste van een lichaam. | ja / nee |
| f. Radioactieve stoffen zitten van nature ook in de bodem, bv. in ertslagen.                                        | ja / nee |
| g. Straling is extra gevaarlijk voor kinderen en zwangere vrouwen.                                                  | ja / nee |
| h. Straling kun je tegenhouden door deuren en ramen te sluiten.                                                     | ja / nee |
| i. Een loden plaat schermt straling beter af dan een aluminium plaat.                                               | ja / nee |
| j. Radioactieve stoffen zenden in de loop van de tijd steeds minder straling uit.                                   | ja / nee |
| k. Sommige radioactieve stoffen blijven duizenden jaren straling uitzenden.                                         | ja / nee |
| l. Straling bestaat, net als licht, altijd uit kleine deeltjes met een beetje energie.                              | ja / nee |
| m. Straling heeft, net als licht, altijd een grote snelheid: de lichtsnelheid.                                      | ja / nee |
| n. De straling van een mobieltje is veel minder gevaarlijk dan de straling van een radioactieve bron                | ja / nee |

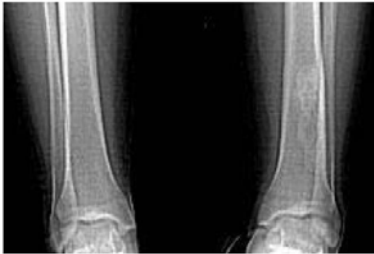


### Voorkennis

|                     |                                                  |
|---------------------|--------------------------------------------------|
| Golven:             | frequentie, golflengte, voortplantingssnelheid   |
| Atoombouw:          | kern en elektronen                               |
| Elektrische stroom: | spanning, stroomsterkte, vermogen, kilowattuur   |
| Magnetisme:         | magnetisch veld stroomspoel, noord- en zuidpool; |

## BEELDTECHNIKEN

Medische beeldvorming begon met de ontdekking van röntgenstraling en is in de loop van de 20<sup>e</sup> eeuw aangevuld met beeldvormingstechnieken waarbij de computer een onmisbare rol speelt. In een gemiddeld ziekenhuis worden per jaar meer dan 1 miljoen beeldopnamen gemaakt. In deze module worden de volgende technieken behandeld.



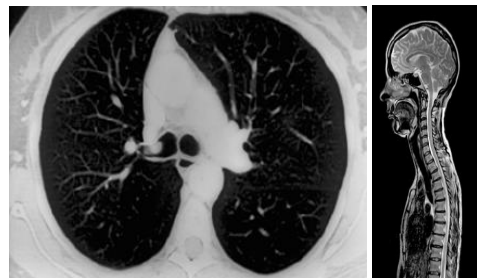
### Röntgenfoto

De oudste techniek, gebruikt bij botbreuken en het onderzoek van het gebit. Een minder bekende toepassing is het zichtbaar maken van bloedvaten.

### CT-scan en MRI-scan

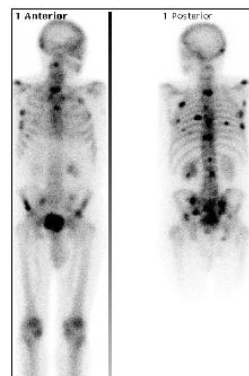
Een moderne toepassing is de CT-scan (CT = 'computed tomography'). Met röntgenstraling maakt de computer een beeld van de dwarsdoorsnede van het lichaam.

MRI ('Magnetic Resonance Imaging') berust op het feit dat protonen (waterstofkernen) zich gedragen als kleine magneetjes. In een sterk magnetisch veld zenden waterstofkernen radiogolven uit. Met ontvangers en een computer wordt een beeld gevormd. Zo onderscheidt men weefsels met verschillende hoeveelheden waterstof. De MRI-scan is nuttig om beelden van zachte weefsels te maken.



### Nucleaire diagnostiek

Deze geeft een beeld van de lichamelijke functies: waar is de stofwisseling het actiefst, hoe is de doorbloeding van weefsels, waar ontwikkelt zich een tumor. De patiënt krijgt een kleine hoeveelheid radioactieve stof toegediend, een gammacamera of andere detector legt vast waar die stof in het lichaam terecht komt.



### Echografie

Ultrageluid (= geluid met hoge frequenties) kaatst gedeeltelijk terug op het grensvlak van weefsels. Van de teruggekaatste golven maakt de computer een beeld van het inwendige. Algemeen bekend is de zwangerschapscontrole, maar je meet met echografie ook de stroomsnelheid van bloed. Voordeel is dat er geen ioniserende straling of radioactiviteit aan te pas komt.

# 1 Röntgenfotografie

## 1.1 De röntgenfoto

In 1895 ontdekte Wilhelm Conrad Röntgen bij toeval een straling die fotofilms kon belichten en bepaalde mineralen deed oplichten.

Hij noemde die stralen X-stralen (in het Engels wordt die term nog steeds gebruikt: X-ray). We noemen dit nu ook wel **röntgenstraling**.

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| Hoofdstukvraag | Hoe werkt röntgenfotografie? |
|----------------|------------------------------|

### Oriëntatieopgave - Absorptie van straling

Röntgenstraling lijkt op licht, alleen de energie van de deeltjes is veel groter dan bij licht. Bij gammastraling is de deeltjesenergie nog groter dan bij röntgenstraling.

De absorptie van straling hangt af van de dichtheid van het weefsel en de energie van de deeltjes. Omdat bij normaal licht de deeltjesenergie veel kleiner is dan bij röntgenstraling, wordt normaal licht in veel grotere mate geabsorbeerd.



Figuur 1.1 Bij deze röntgenopname ligt de fotografische plaat onder de arm.



Figuur 1.2 In het midden een röntgenopname. Welk beeld zou ontstaan als er normaal licht of gammastraling gebruikt was?

- De 'achtergrond' bij een röntgenfoto is zwart. Hoe komt dat?
- Hoe komt het dat het bot witter is dan het spierweefsel?
- Wordt röntgenstraling in bot beter of slechter geabsorbeerd dan in spierweefsel?
- Het bot op de foto is aan de randen witter dan in het midden. Waardoor wordt dit veroorzaakt?
- Stel dat bij de opname geen röntgenstraling maar normaal licht gebruikt was. Schets het beeld dat dan op de fotografische plaat zichtbaar zou zijn.
- Stel dat bij de opname geen röntgenstraling maar gammastraling gebruikt was. Schets het beeld dat dan op de fotografische plaat zichtbaar zou zijn.
- Wat is eigenlijk het verschil tussen licht, röntgenstraling en gammastraling? Lees de theorie van deze paragraaf en beschrijf het belangrijkste verschil.



## Theorie

Röntgen ontdekte dat die straling makkelijk diep in veel stoffen kon doordringen en er zelfs doorheen kon gaan. Daarmee werd het maken van röntgenfoto's mogelijk.

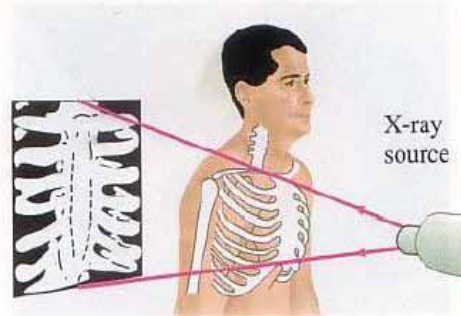
Röntgenstraling gaat door licht weefsel, dat een lage dichtheid heeft, heen, maar wordt door zwaarder weefsel, zoals botweefsel, dat een grotere dichtheid heeft, **geabsorbeerd**.

Op de fotografische plaat achter het lichaam komt een soort schaduwbeeld: de lichte weefsels laten de straling door en geven **zwarting**, botten laten weinig straling door en steken daarbij wit af. Na ontwikkeling is dit andersom (zie foto links).

De röntgenfoto werd een belangrijk middel om diagnoses te stellen. Sinds die tijd zijn er steeds technieken ontwikkeld om betere foto's te maken met kleinere hoeveelheden röntgenstraling.



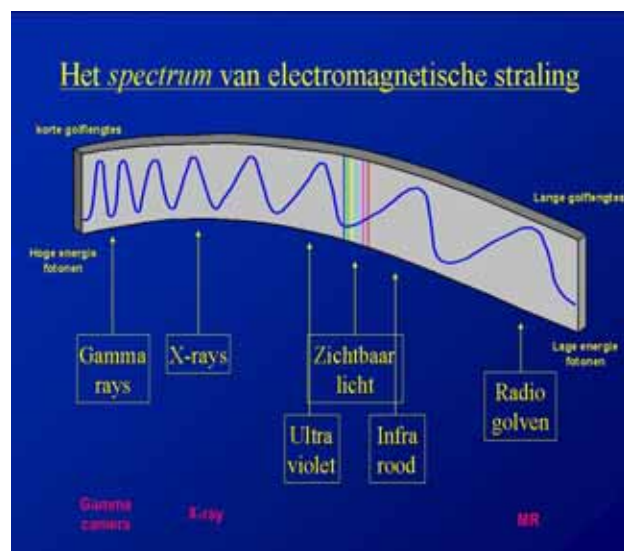
Figuur 1.3 De eerste röntgenfoto uit de geschiedenis; Röntgen maakte die van de hand van zijn vrouw in 1895



Figuur 1.4

## Elektromagnetische straling

Röntgenstraling behoort tot de **elektromagnetische golven**. Andere voorbeelden van deze straling zijn radiogolven, radargolven, licht, infrarood straling, ultraviolet straling en gammastraling. Al deze golven planten zich voort met de **lichtsnelheid** (in het luchtledige bijna 300 000 km/s).



Figuur 1.5 De verschillende vormen van elektromagnetische straling onderscheiden zich door hun golflengte (In bovenstaand plaatje zou eleCtro.. eleKtro.. moeten zijn omdat overal in de tekst een k en gen c wordt gebruikt)

Figuur 1.5 geeft een overzicht van de elektromagnetische golven. De golflengte van röntgenstraling is tussen 0,1 en 10 nanometer, veel korter dan



die van zichtbaar licht (één nanometer is  $10^{-9}$  meter = een miljoenste millimeter).

### Verband tussen golflengte en frequentie

Het verband tussen de golflengte en de frequentie van een golfverschijnsel wordt gegeven door

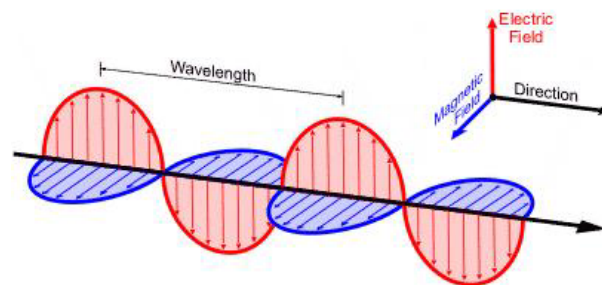
$$c = \lambda \cdot f$$

**Symbolen:**  $c$  is de voortplantingssnelheid (in m/s),  $\lambda$  is de golflengte (in m) en  $f$  is de frequentie (in Hz).

**Geldigheid:** De vergelijking geldt voor alle elektromagnetische golven. De lichtsnelheid is  $c = 299.792.458$  m/s (we gebruiken  $3,0 \cdot 10^8$  m/s). In glas en water verschilt de lichtsnelheid van die in lucht.

### Wat 'golft' er?

Men stelt zich elektromagnetische golven voor als twee loodrecht op elkaar staande golven, de elektrische en de magnetische component. Hun snijlijn geeft de voortplantingsrichting van de golf (zie figuur 1.6).



Figuur 1.6

Door elektromagnetische straling wordt energie vanuit een bron naar de omgeving overgedragen; hoe hoger de frequentie, des te groter de energie die wordt overgebracht. In het begin van de 20e eeuw bleek uit heel nauwkeurig onderzoek van elektromagnetische golven dat deze golven bestaan uit hele kleine golfdeeltjes, de zogenaamde **fotonen**. Een foton vertegenwoordigt het kleinste mogelijke brokje (licht)energie van een elektromagnetische golf. De energie van een dergelijk brokje, de **fotonenergie**, hangt af van de frequentie: hoe groter de frequentie, des te groter de energie.

### Fotonenergie

De energie van een foton volgt uit de formule:

$$E = h \cdot f$$

**Symbolen:**  $E$  is de energie van het foton in Joule (J),  $f$  is de frequentie in hertz (Hz) en  $h$  is de **constante van Planck**:  
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s

**Geldigheid:** de vergelijking is geldig voor alle elektromagnetische straling.

## Tekstvragen

- Wat heeft een hogere frequentie: zichtbaar licht of röntgenstraling?
- Wat zijn fotonen?
- Wat heeft een grotere energie: fotonen van radiogolven of van zichtbaar licht?

Fotonen kunnen reageren met geladen deeltjes, zoals de elektronen in een atoom. Zo kunnen fotonen van het zichtbare licht chemische reacties veroorzaken (denk aan de fotosynthese bij groene planten, aan zintuigcellen in het oog en de werking van fotofilm).

De frequentie van röntgenstraling is zeer hoog. De energie van röntgenfotonen is dus ook veel groter dan die van lichtfotonen. Fotonen van röntgenstraling kunnen daardoor moleculen in ons lichaam beschadigen, wat uiteraard gevaarlijk is voor de gezondheid. Dit bespreken we verder in de volgende paragraaf.

## Practicum - Lichtstralen versus röntgenstralen

- Leg zo snel mogelijk, nadat je een stuk fotopapier uit de verpakking hebt gehaald, met de handpalm naar beneden, je hand met gespreide vingers erop.
  - Houd je hand zo stil mogelijk totdat het niet bedekte stuk papier duidelijk donker kleurt. Dit kan enkele minuten duren.
  - Haal je hand van het papier en kijk wat er langzaam met de afdruk gebeurt.
- a. Geef twee overeenkomsten tussen deze foto en een röntgenfoto.
  - b. Geef twee verschillen tussen deze foto en een röntgenfoto.
  - c. Waardoor verdwijnt je handafdruk?
  - d. Wat moet je doen om je handafdruk niet te laten verdwijnen?

## Opgaven

Gebruik Binas tabel 18 of 19.

### 1 Begripstest

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

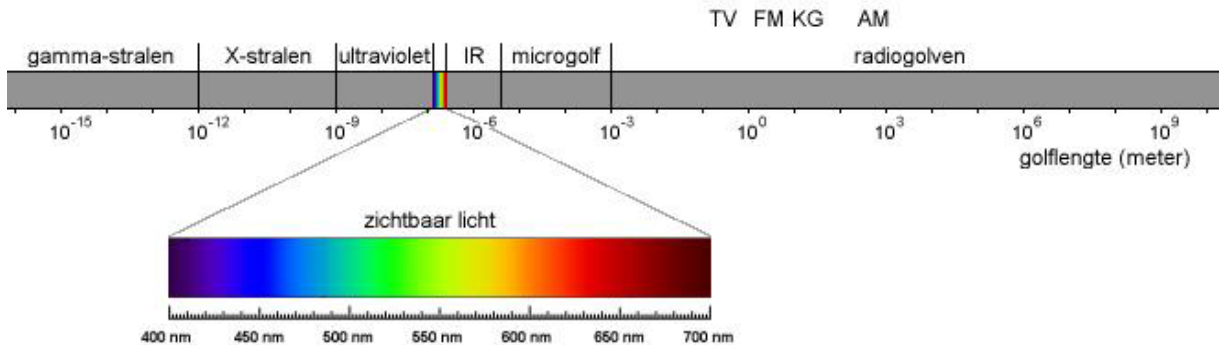
- |                                                                                                                    |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| a. Licht bestaat uit kleine deeltjes: fotonen                                                                      | ja / nee |
| b. Röntgenstraling is, net als licht, een elektromagnetische golf.                                                 | ja / nee |
| c. Bij een röntgenfoto geldt: hoe zwarter het gebied des te minder straling is op die plek door het lichaam gegaan | ja / nee |
| d. Met licht kun je geen röntgenfoto maken omdat de energie van lichtdeeltjes te klein is.                         | ja / nee |
| e. De energie van een foton is evenredig met de golflengte.                                                        | ja / nee |
| f. De golflengte van een foton is omgekeerd evenredig met de frequentie.                                           | ja / nee |
| g. Een elektromagnetische golf reist altijd met de lichtsnelheid.                                                  | ja / nee |
| h. De stralingsdeeltjes bij radiogolven (zoals bij een mobieltje) hebben veel energie.                             | ja / nee |

## 2 Elektromagnetisch spectrum (1)

In de onderstaande figuur kun je zien dat zichtbaar licht slechts een heel klein gebiedje in het elektromagnetisch spectrum is.

- Het zichtbaar licht (de regenboog) loopt van rood t/m violet. Aan welke kant zit violet in de onderstaande figuur?
- In de figuur zie je behalve zichtbaar licht nog zes gebieden. Zet in de juiste volgorde van links naar rechts:

radiogolven – gammastraling – ultraviolette straling – infrarode straling – microgolven – röntgenstraling – zichtbaar licht



## 3 Elektromagnetisch spectrum (2)

- Leg uit wat de hoogste frequentie heeft: infrarode of ultraviolette straling.
- Leg uit welk foton de grootste energie heeft: dat van ultraviolette straling of dat van röntgenstraling.
- Leg uit dat een klein beetje UV-straling meer schade kan aanrichten aan je huid dan heel veel gewoon licht.
- Een mobieltje zendt radiogolven uit. Leg uit dat de straling van een mobieltje lang niet zo gevaarlijk kan zijn als UV-straling.
- Een magnetron zendt ook radiogolven uit. De stralingsdeeltjes hebben dan weinig energie. Leg uit hoe het dan toch mogelijk is om met magnetronstraling voedsel te verwarmen.

## 4 Röntgenfoto van een olifant

Bij het maken van een röntgenfoto kan de energie van de deeltjes ingesteld worden met het röntgenapparaat.

- Gaan röntgendeeltjes met een hoge energie makkelijker of moeilijker door het lichaam?
- Zou je bij het maken van een röntgenfoto van een olifant straling met een hoe energie of straling met een lage energie gebruiken?
- Leg uit dat het maken van een röntgenfoto van een long veel schadelijker is dan een röntgenfoto van een kies. Geef twee redenen.

## 5 Rekenen met golflengte en frequentie

- Bereken de frequentie van magnetrongolven met een golflengte van 12,2 cm.
- Bereken de golflengte van röntgenstraling met een frequentie van  $2,0 \cdot 10^{18}$  Hz.
- Vergelijk de twee soorten straling met elkaar. Bij welke straling hebben de deeltjes de hoogste energie?

## **6 Rekenen met energie van een foton**

- a. Schat met behulp van Binas de energie van een röntgenfoton dat een golflengte van 5,00 nm heeft.

Omdat de energie van een foton in joule zeer kleine getallen oplevert, is het handiger om met de eenheid elektronvolt (eV) te werken.

Een foton heeft een energie van  $3,0 \cdot 10^{-19}$  J.

- b. Bereken de energie in elektronvolt ( $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).  
c. Bepaal m.b.v. Binas de kleur van het zichtbare licht waarvan hier sprake is.

## **7 Röntgen- en gammastraling**

- a. Waardoor hebben röntgen- en gammastraling een groot doordringend vermogen?  
b. Wat gebeurt er met de energie van het foton nadat het is geabsorbeerd?
-

# 1 Röntgenfotografie

## 1.2 Absorptie van röntgenstraling

Röntgenstraling wordt voor een deel geabsorbeerd, de rest gaat door het lichaam heen. De mate van absorptie hangt af van de energie van de röntgenstraling, het type weefsel en de dikte van het weefsel.

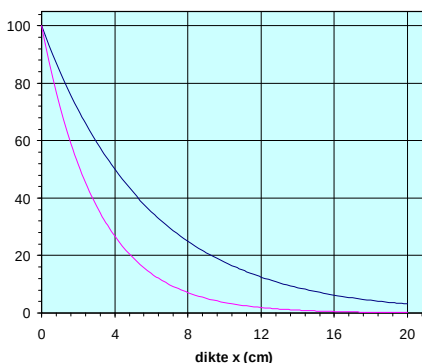
|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| Paragraafvraag | Hoe kun je de absorptie berekenen? |
|----------------|------------------------------------|



Figuur 1.8

Stralingsintensiteit en dikte

— Weefsel — Bot



Figuur 1.9 Doorlaatkromme

### Oriëntatieopgave - Rekenen aan absorptie

Bekijk de röntgenopname in figuur 1.8. Neem ter vereenvoudiging aan dat het been op de röntgenfoto overal 8,0 cm dik is. Voor weefsel (zoals spieren en huid) geldt bij deze straling dat de halveringsdikte 4,0 cm is. Dat betekent dat na elke 4,0 cm de hoeveelheid straling gehalveerd wordt. Zie ook de doorlaatkromme van figuur 1.9.

- Leg uit dat na 8,0 cm weefsel nog 25% van de straling over is.
- De halveringsdikte van bot is ongeveer 2,0 cm. Bereken hoeveel procent van de straling na 8,0 cm bot nog over is.

In de formule voor het intensiteitsverval  $I(n) = I(0) \cdot 0.5^n$  is  $n$  het aantal halveringsdiktes.

- Leg uit hoe je  $n$  kunt berekenen uit de dikte  $x$  van het voorwerp en de halveringsdikte  $d_{1/2}$ . Schrijf het antwoord op als een formule.

Stel dat je een röntgenfoto wilt maken van de poot van een olifant met een dikte van 20 cm.

- Bereken hoeveel procent van de straling doorgelaten wordt door 20 cm weefsel en 20 cm bot.
- Welk beeld zul je dan zien op de röntgenfoto? Leg uit dat er dan vrijwel niets te zien is van de structuur van het bot.
- Bij een röntgenapparaat kun je de energie van de deeltjes verhogen of verlagen. Hoe zou je de energie van de deeltjes veranderen om toch een goede röntgenfoto te kunnen maken van de poot van een olifant?

### Absorptie van straling

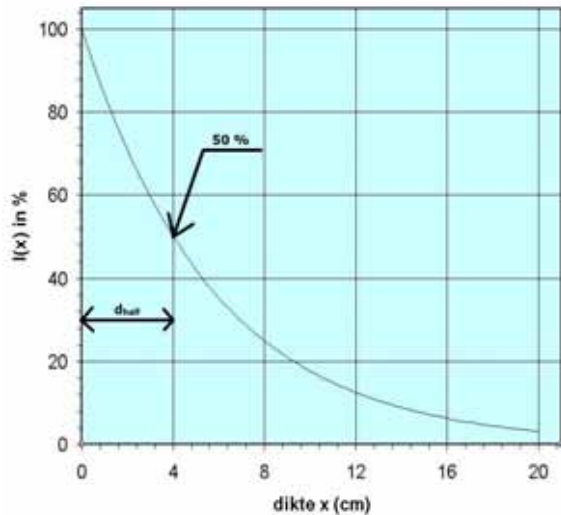
Fotonen van röntgenstraling hebben in de regel een te grote energie om een reactie met elektronen in een atoom te geven, vandaar dat deze fotonen meestal zonder te reageren dwars door atoomlagen heen gaan. Dat verklaart het grote **doordringend vermogen** van röntgenstraling. Hoe groter de energie (dus hoe hoger de frequentie) van de fotonen is, hoe groter het doordringend vermogen.

Toch bestaat er een kleine kans dat een elektron een foton absorbeert. Het foton verdwijnt dan en het elektron wordt losgemaakt van het atoom. Dat atoom wordt dan een **positief ion**.

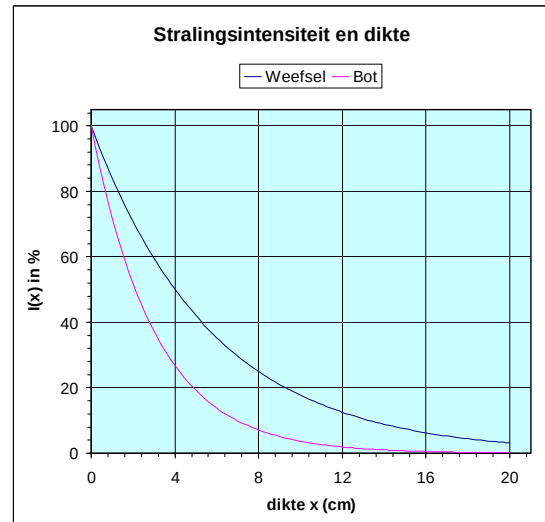
De kans op een dergelijke reactie is het grootst in stoffen met een grote dichtheid. Die bestaan uit atomen met veel elektronen om de kern (en dus

ook veel elektronen per  $\text{cm}^3$ ). Deze stoffen absorberen relatief veel röntgenstraling.

In de natuurkunde is de intensiteit van straling gedefinieerd als het vermogen dat door een vierkante meter oppervlak gaat. In figuur 1.10 zie je het verband tussen de intensiteit van de doorgelaten straling  $I(x)$  en de dikte  $x$  van een laag weefsel.



Figuur 1.10 Een **doorlaatkromme**.



Figuur 1.11 Doorlaatkromme van weefsel en bot

De intensiteit van de op het weefsel vallende straling (dus bij een dikte van 0 cm) is  $I(0)$ . Je stelt die  $I(0)$  op 100%.

De **halveringsdikte** is de dikte van het materiaal waarbij de helft van de stralingsintensiteit wordt geabsorbeerd.

Na één halveringsdikte (4 cm) is dus de helft (50%) van de oorspronkelijke intensiteit over. Na twee halveringsdiktes (8 cm) de helft van de helft, dus  $\frac{1}{4}$  (= 25%). Na drie halveringsdiktes (12 cm)  $\frac{1}{8}$  (= 12,5%), enzovoort.

### Weefsel en bot

Als röntgenstraling door een dikkere laag weefsel gaat, wordt er meer straling geabsorbeerd. Gevolg: botten absorberen meer straling dan zachte weefsels, die vooral uit water bestaan.

Figuur 1.11 geeft voor weefsel en bot het verband aan tussen de intensiteit van de doorgelaten straling en de dikte. Je ziet dat röntgenstraling in weefsels verder doordringt dan in botten. Daardoor is de röntgenfoto mogelijk. Op het fotonegatief zijn zachte weefsels donkerder dan botten, zodat de botten zichtbaar zijn.

### Tekstvragen

- Waardoor heeft röntgenstraling een groot doordringend vermogen?
- Wat is halveringsdikte?
- Röntgenstraling dringt bijna niet door lood heen. Heeft lood een grote of een kleine halveringsdikte?

### Intensiteitafname

Voor de afname van de intensiteit geldt de formule:

$$I(n) = I(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

**Symbolen:**  $I(n)$  is de intensiteit na  $n$  halveringsdiktes (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Bij dikte  $x$  geldt:  $x = n \times d_{1/2}$  (met  $x$  en  $d_{1/2}$  in gelijke eenheden)

**Geldigheid:** de vergelijking is geldig voor het verval van Röntgenstraling en voor andere hoogenenergetische straling in een stof.

---

## Opgaven

§1.2 Gebruik Binas tabel 18 of 19.

### 8 Begripstest

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- a. Röntgenstraling heeft een groter doordringend vermogen dan gammastraling. ja / nee
- b. Materiaal waarin veel straling wordt geabsorbeerd heeft een kleine halveringsdikte. ja / nee
- c. Materiaal met een hoge dichtheid heeft een grote halveringsdikte. ja / nee
- d. Na twee halveringsdiktes is 75% van de straling geabsorbeerd. ja / nee
- e. Als de energie van de stralingsdeeltjes toeneemt, dan wordt de straling makkelijker geabsorbeerd. ja / nee
- f. Bij absorptie van straling wordt de energie opgenomen door een elektron in de stof. ja / nee
- g. De eenheid van stralingsintensiteit is  $\text{W/m}^2$ . ja / nee

### 9 Halveringsdikte

- a. Geef de definitie van halveringsdikte.
- b. Hoeveel procent van de oorspronkelijke intensiteit is overgebleven nadat de straling in een stof twee halveringsdiktes heeft afgelegd?
- c. Leg uit wat röntgenstraling sterker absorbeert: een stof met grote halveringsdikte of een stof met kleine halveringsdikte.
- d. Leg uit wat een grotere halveringsdikte heeft: weefsel of bot.

### 10 Rekenen met halveringsdikte

Voor bepaald type weefsel is de halveringsdikte voor röntgenstraling 3,7 cm. Bij het maken van een röntgenfoto blijkt 12,5% van de straling door het weefsel te gaan.

- a. Leg uit dat hierbij geldt:  $0,5^n = 0,125$
- b. Bereken de waarde van  $n$ .
- c. Bereken de dikte van het weefsel.
- d. Bereken hoeveel procent van de ingevallen intensiteit geabsorbeerd wordt door een laag van 7,4 cm van dit weefsel.
- e. Bereken hoeveel procent van de ingevallen intensiteit over is na 20 cm.

### 11 Halveringsdikte bot

Volgens de tekst bij figuur 1.10 is de halveringsdikte van bot *ongeveer* 2,0 cm. In figuur 1.10 is af te lezen dat na 8,0 cm bot nog 7,0% van de straling over is

- a. Hoeveel procent van de straling zou er na 8,0 cm over zijn als de halveringsdikte precies 2,0 cm is?
- b. Is de werkelijke halveringsdikte groter of kleiner dan 2,0 cm?
- c. Benader de halveringsdikte op één decimaal nauwkeurig.



## 12 Loodbescherming

Bij het maken van röntgenfoto's gebruikt men vaak lood als afscherming tegen de straling. Voor straling met  $E = 0,1$  MeV is de halveringsdikte van lood 0,011 cm.

- a. Bereken hoeveel procent van de straling geabsorbeerd wordt door een laagje van 1,0 mm lood.

De absorptie van straling hangt sterk af van de energie van de stralingsdeeltjes. Voor straling met  $E = 1,0$  MeV is de halveringsdikte van lood veel groter: 0,86 cm.

- b. Bereken hoeveel procent van deze straling geabsorbeerd wordt door een laagje van 1,0 mm lood.

Om te zorgen dat slechts 0,2% van de straling doorgelaten wordt moet de afscherming tenminste 9 halveringsdiktes zijn.

- c. Ga dit na met een berekening.  
d. Hoe dik moet de loodplaat zijn bij straling met  $E = 1,0$  MeV?

## 13 Röntgenfoto

Leg in enkele zinnen het principe van de röntgenfoto uit

# 1 Röntgenfotografie

## 1.3 De röntgenfoto in de praktijk

In ziekenhuizen wordt nog steeds veel gebruik gemaakt van röntgenfoto's, terwijl er toch ook risico's aan verbonden zijn. Door technische verbeteringen zijn de gebruiksmogelijkheden toegenomen en de risico's afgenomen.

|                |                                                   |
|----------------|---------------------------------------------------|
| Paragraafvraag | Hoe wordt de röntgenfoto in de praktijk gebruikt? |
|----------------|---------------------------------------------------|

### Oriëntatieopgave - Beeldtechnieken

In de loop der jaren is er veel verbeterd aan de beeldtechniek. Eigenlijk is een fotografische plaat helemaal niet zo geschikt voor een röntgenfoto. Het fosforschermbetekende al een grote verbetering. Tegenwoordig wordt voor de meeste foto's een digitaal apparaat gebruikt.

- Lees de tekst over het fotobeeld. Welk nadeel kleeft er aan een normale fotografische plaat?
- Beschrijf welk voordeel een fosforschermbetekende al een grote verbetering. Tegenwoordig wordt voor de meeste foto's een digitaal apparaat gebruikt.
- Lees de tekst over het digitale beeld.
- Een digitaal apparaat levert een beter beeld, maar welk voordeel heeft het voor patiënten?
- Noem nog twee voordelen van een digitaal beeld.

### Oriëntatieopgave - Toepassingen

Naast de gewone röntgenfoto zijn er enkele bijzondere toepassingen, zoals fluoroscopie, angiografie en DSA (Digital Subtraction Angiography).

- Lees de tekst over toepassingen.
- Bij angiografie wordt een contrastvloeistof gebruikt. Neemt men daarvoor een stof die röntgenstraling sterk absorbeert of juist zo min mogelijk absorbeert?

Bij angiografie wordt het beeld eerst 'omgekeerd', dat betekent dat wit en zwart verwisseld worden. De achtergrond wordt dan wit.

- Leg uit waardoor de bloedvaten bij angiografie donker gekleurd zijn.
- Waarom moeten er bij DSA twee röntgenfoto's gemaakt worden?
- Leg uit waarom DSA alleen mogelijk is met digitale röntgenbeelden.



Figuur 1.12 Bij normale röntgenfoto's is de achtergrond donker. Bij het gebruik van een contrastvloeistof in het bloed wordt het beeld 'omgekeerd'.

### Fotobeeld

Vroeger werd voor het vastleggen van het beeld een fotografische plaat gebruikt. Maar door het grote doordringend vermogen van röntgenstraling gaan veel fotonen door een fotografische plaat heen zonder zwarting van de

fotofilm te veroorzaken. Voor een behoorlijke foto was dan een lange bestralingstijd nodig waardoor de patiënt bloot stond aan vrij veel straling.



*Figuur 1.13 Het fosforscher. De Röntgenstraling zorgt ervoor dat in het fosforscher atomen licht geven. Dat licht geeft belichting van de filmemulsie.*

Om een kortere bestralingstijd mogelijk te maken wordt een fosforscher gebruikt. Deze naam heeft niets met de stof fosfor te maken. Een stof 'fosforiseert' als die stof licht uitzendt nadat het getroffen is door snelle elektronen of bestraald is met röntgenstraling. Fosforescentie is het verschijnsel dat een stof na te zijn belicht in het donker nog een poos blijft nalichten.

Achter de dunne fotofilm zit een dikker fosforscher. In dat scherm wordt de röntgenstraling voor het grootste deel geabsorbeerd en omgezet in zichtbaar licht. Een röntgenfoton dat het fosforscher treft, geeft een uiterst klein lichtflitsje dat de fotofilm belicht waardoor uiteindelijk de foto ontstaat.

### Digitaal beeld

Modern is het zogenaamde digitale scherm, te vergelijken met een digitale foto. Uiteindelijk wordt het beeld opgeslagen in een computer.

Een digitaal scherm heeft veel voordelen: betere **beeldkwaliteit**, minder röntgenstraling nodig, geen ontwikkelprocessen, je kan het steeds opnieuw gebruiken, makkelijk te bewaren en te verzenden.

### Extra

Het digitale scherm bevat europium. Als het scherm door röntgenfotonen wordt getroffen, blijven europiumatomen wekenlang in een hogere energietoestand. Hierdoor blijft de informatie wekenlang in het digitale scherm.

Het scannen (uitlezen) van het scherm gebeurt razendsnel met een infraroodlaser. De europiumatomen 'vallen' door de infrarode straling terug naar hun oorspronkelijke energietoestand en zenden daarbij licht uit. Een gevoelige lichtsensor vangt dit licht op en zet het om in elektrische signalen die naar de computer gaan.

De computer berekent van elk beeldelementje de 'grijswaarde' (§6.1).

Als de lichtsensor veel licht opvangt wordt de grijswaarde hoog en het pixel licht. Het zo ontstane beeld wordt op een beeldscherm vertoond en op de harde schijf opgeslagen.

Het woord **pixel** is een samentrekking van de twee eerste lettergrepen van het Engelse **p**icture **e**lement en staat voor een enkele punt (Eng.: dot) op het beeldscherm van de computer of in een digitaal beeld. Veel punten bij elkaar geven een beeld. Alles wat op het scherm te zien is, bestaat uit een veelvoud van pixels.

Het aantal pixels op een scherm (uit of aan) is bepalend voor de resolutie van het beeldscherm. Hoe meer pixels beschikbaar zijn, hoe scherper het beeld is.

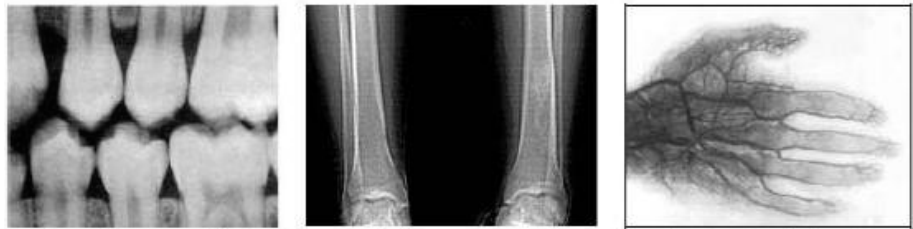
### Toepassingen

De bekendste medische toepassingen zijn onderzoek van botbreuken, van het gebit en naar borstkanker bij vrouwen.

Maar er zijn meer medische toepassingen.

Bij fluoroscopie wordt langdurig in het lichaam gekeken. Dit is nuttig om operaties te volgen zoals het verwijderen van cholesterol uit de wand van een bloedvat en het plaatselijk verwijderen van het bloedvat (dotteren) en het aanbrengen van een stent (een versterking van de wand van een bloedvat). De röntgenstraling heeft een zeer lage intensiteit en de detector is voorzien van een beeldversterker, zodat het beeld op een monitor toch goed zichtbaar is.

Bij angiografie maakt men op een röntgenfoto bloedvaten duidelijk zichtbaar met een sterk absorberende contrastvloeistof. Bloed en weefsel bestaan voor een groot deel uit water en zullen de röntgenstraling even sterk absorberen. Door aan het bloed een stof toe te voegen die de röntgenstraling in grote mate absorbeert, wordt het verschil in absorptie van röntgenstraling tussen het bloedvat en het bloed groter en zijn de bloedvaten op de foto goed zichtbaar.



*Figuur 1.14 Röntgenfoto's van het gebit (links), van botten (midden) en van bloedvaten in de hand (rechts). Bij de laatste moet het bloed van een contrastvloeistof worden voorzien.*

Een speciale techniek is de zogenaamde DSA (Digital Subtraction Angiography). Hierbij maakt men eerst een digitale röntgenfoto zonder contrastvloeistof. Dit is het maskerbeeld. Daarna maakt men een tweede foto maar nu met contrastvloeistof in het bloed, het contrastbeeld.

Vervolgens worden de grijswaarden van het maskerbeeld van die van het contrastbeeld afgetrokken. Plaatsen waar contrastbeeld en maskerbeeld dezelfde grijswaarde hebben worden zwart. Plaatsen waar contrastbeeld en maskerbeeld duidelijk verschillen krijgen een hoge grijswaarde en worden bijna wit. Dit geeft een duidelijk (negatief) beeld, doordat onduidelijke structuren worden weggefilterd. De computer maakt hiervan weer een positief beeld.

Voor een goede DSA-opname mag de patiënt tussen het maken van beide beelden absoluut niet van plaats veranderen, wat niet altijd even gemakkelijk is.

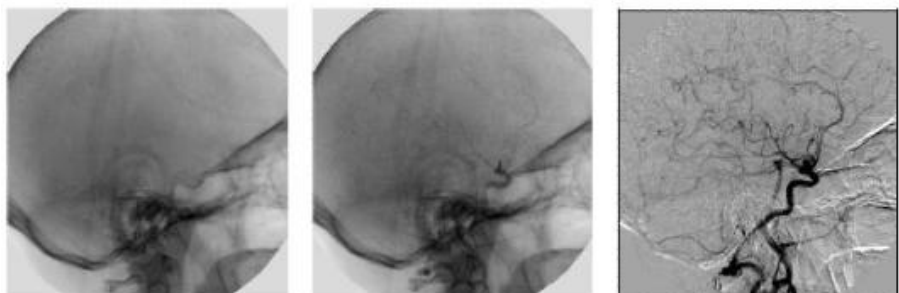
### Tekstvragen

- Hoe werkt een fosforschermer?
- Wat is fluoroscopie?
- Hoe werkt DSA?

### Extra

Röntgenstraling wordt ook gebruikt om materiaal in technische constructies (schepen, hijskranen, stoomketels etc.) te controleren op haarscheurtjes of om de kwaliteit van lasverbindingen te onderzoeken.

Bij veiligheidscontroles op luchthavens bekijkt men zo de inhoud van tassen en koffers.



*Figuur 1.15 Een DSA-opname van het hoofd. Links het maskerbeeld, midden het contrastbeeld, rechts het verschil tussen contrast- en maskerbeeld. De bloedvaten zijn nu zeer duidelijk te zien.*

### Voor- en nadelen

**Voordelen:** Röntgenapparaten zijn niet duur (zo'n 15 000 euro), maar gaan bij intensief gebruik niet lang mee (ca 8 maanden). Netto zijn de kosten per foto vrij laag, zeker vergeleken met CT-scan en MRI-scan.

De foto is snel gemaakt en het resultaat is snel zichtbaar.

*Nadelen:* De patiënt kan door de röntgenstraling schade oplopen, maar het risico is kleiner dan bij een CT-scan.

Op een röntgenfoto zijn diverse structuren door elkaar te zien. Bij een foto van de borstkas zijn de ribben, wat vager het hart of de longen en tenslotte de ruggenwervels te zien. Dit leidt soms tot verwarring.

Zachte weefsels zijn moeilijk te onderscheiden, doordat ze alle in ongeveer dezelfde mate röntgenstraling absorberen.

## Begrippen

Röntgenstraling  
Absorptie  
Zwarting  
Elektromagnetische golf  
Golflengte  
Frequentie  
Voortplantingssnelheid  
Foton  
Fotonenergie  
Doordringend vermogen  
Doorlaatkromme  
Halveringsdikte  
Beeldkwaliteit  
Ioniserende straling

## Samenvatting

- **Röntgenstraling** behoort tot de **elektromagnetische golven**. De **frequentie** van deze straling is hoog.
- **Fotonen** zijn 'brokjes' stralingsenergie. De **frequentie** bepaalt de **energie** van een foton:  $E = h \cdot f$
- De meeste röntgenfotonen worden niet geabsorbeerd door elektronen in het weefsel, daardoor heeft röntgenstraling een groot **doordringend vermogen**.
- Als elektronen in het weefsel röntgenstraling absorberen, treedt ionisatie op. Daarom noem je röntgenstraling **ioniserende straling**. Hoeveel straling er geabsorbeerd wordt, hangt af van het aantal in het materiaal aanwezige elektronen per  $\text{cm}^3$ .
- **Halveringsdikte** is de dikte van het gebruikte materiaal waarbij de helft van de straling wordt **geabsorbeerd**.

## Opgaven

### 14 Reflectieopdracht - Gaten in je kennis?

Geef aan wat bij elke letter zou moeten staan. Kies uit: absorbeert, angiografie, elektromagnetische, fosforschermer, foton, gammastraling, grote, kleine, licht, radio, spectrum, ultraviolette straling.

Een woord kan meerdere keren gebruikt worden.

Röntgenstraling is een vorm van **.a.** straling. Deze stralingsoorten vormen een heel **.b.** Als je deze soorten straling rangschikt naar opklimmende golflengte, krijg je **.c.**, röntgenstraling, **.d.**, zichtbaar **.e.**, infrarode straling en tenslotte **.f.** golven, die dus de grootste golflengte hebben.

Deze straling bestaat uit afgepaste brokjes energie, zo'n brokje noem je een **.g.** Uit de formule  $E=h \cdot f$  volgt dat een **.h.** met een hoge frequentie een **.i.** energie heeft. Een hoge frequentie betekent een **.j.** golflengte. Een **.k.** gammastraling heeft dus een **.l.** energie en een **.m.** radiostraling heeft een heel **.n.** energie. Daardoor is **.o.** schadelijk voor de gezondheid en **.p.** straling niet. Ook **.q.** magnetronstraling heeft een **.r.** energie.

Het ene materiaal **.s.** röntgenstraling beter dan het andere. Een materiaal dat goed **.t.**, heeft een **.u.** halveringsdikte. Deze verschillen maken röntgenfoto's mogelijk. Voor een afbeelding van de bloedvaten spuit men een contrastvloeistof in. Deze **.v.** veel straling. Deze techniek noem je **.w.**

Bij gebruik van een **.x.** wordt minder straling gebruikt dan bij een fotografische plaat. Zo'n **.ij.** zendt **.z.** uit als er röntgenstraling op valt.

### 15 Vastleggen van het beeld

- Waardoor is een gewone fotografische plaat voor het vastleggen van een röntgenbeeld niet zo geschikt?
- Waardoor is een 'fosforscher' in dit opzicht beter?
- Geef drie voordelen van een digitaal scherm boven een foto.

### 16 Angiografie

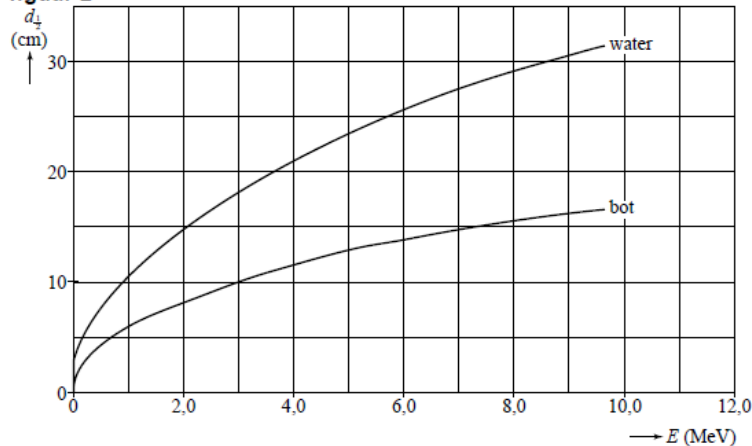
- Waardoor is voor het zichtbaar maken van bloedvaten op een röntgenfoto een contrastvloeistof nodig?
- Leg uit hoe DSA (digital subtraction angiography) werkt.
- Waarom moet de patiënt bij het maken van het maskerbeeld en het contrastbeeld op dezelfde plaats blijven?

### 17 Röntgenfoto

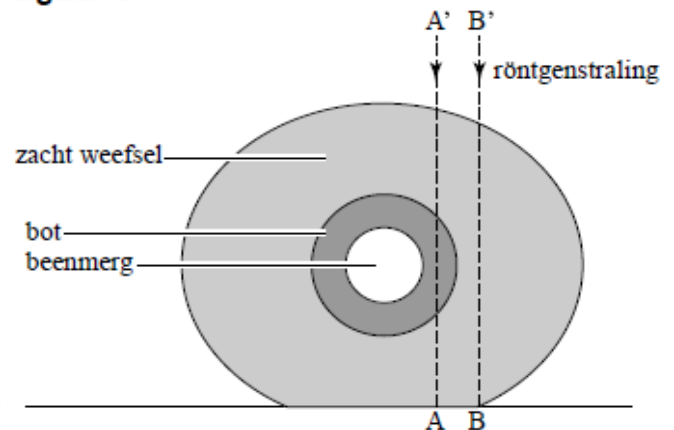
Op een röntgenfoto zijn botten van een menselijk lichaam goed zichtbaar.

Zie figuur 1. In figuur 2 is voor water en bot het verband weergegeven tussen de halveringsdikte en de energie van de röntgenstraling. De halveringsdikte voor zacht weefsel (spieren en vet) is gelijk aan de halveringsdikte van water.

figuur 2



figuur 3



figuur 1



- Leg met behulp van figuur 2 uit waarom de foto op plaatsen waar zich bot bevindt minder zwart is dan er omheen.

In figuur 3 is een doorsnede van een bovenbeen van een mens getekend.

De fotografische plaat staat loodrecht op het papier en loodrecht op de richting van de röntgenstraling. Langs de lijn B'B gaat röntgenstraling alleen door zacht weefsel heen. De röntgenfoto is gemaakt met röntgenstraling met een energie van 4,0 MeV. De tekening is op schaal; 1 cm in de tekening komt overeen met 3 cm in werkelijkheid.

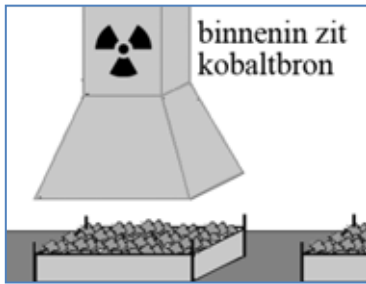
- Bepaal hoeveel procent van de straling die bij B' het lichaam ingaat bij B op de fotografische plaat komt.

Langs de lijn A'A gaat röntgenstraling niet alleen door zacht weefsel, maar ook door bot heen.

- Bepaal hoeveel procent van de straling die bij A' het lichaam ingaat bij A op de fotografische plaat komt.

In figuur 3 is te zien dat zich binnen in het bot beenmerg (zacht weefsel) bevindt.

Hoe kun je dit zien op de foto van figuur 1?

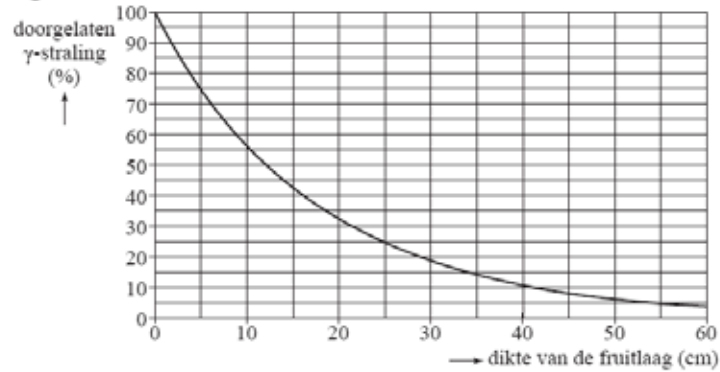


### 18 Doorstralen van fruit

De houdbaarheid van bijvoorbeeld aardbeien kan aanzienlijk vergroot worden door de vruchten na het plukken te doorstralen met  $\gamma$ -straling (gammastraling: de Griekse letter “ $\gamma$ ” wordt uitgesproken als “gamma”). Niet alleen de bacteriën die verantwoordelijk zijn voor het rottingsproces worden onschadelijk gemaakt, maar ook insecten en eitjes van insecten. Als stralingsbron wordt Kobalt-60 gebruikt.

In figuur 1 is de doorlaatkromme voor fruit bij deze  $\gamma$ -straling getekend.

figuur 1



Na 38 cm fruit is nog 12,5% van de straling over.

- Bereken daarmee de halveringsdikte van fruit voor de  $\gamma$ -straling van kobalt.
- Leg aan de hand van de grafiek uit dat de bacteriën bij fruit dat onderin de kist ligt, een grotere kans hebben om te overleven dan bacteriën bovenin de kist.



## 2 Nucleaire diagnostiek

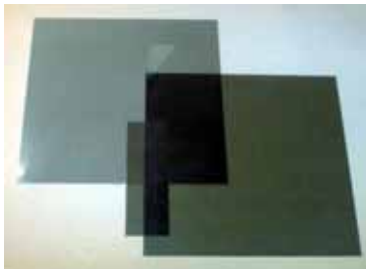
### 2.1 Alfa-, bèta en gammastraling

In ziekenhuizen wordt naast röntgenstraling ook gebruik gemaakt van andere soorten straling. Röntgenstraling wordt in een apparaat gemaakt, alfa- bèta- en gamma-straling komt uit radioactief materiaal. De term nucleaire diagnostiek houdt in dat voor diagnostische doeleinden straling wordt gebruikt die komt uit de kern (de nucleus) van een atoom.

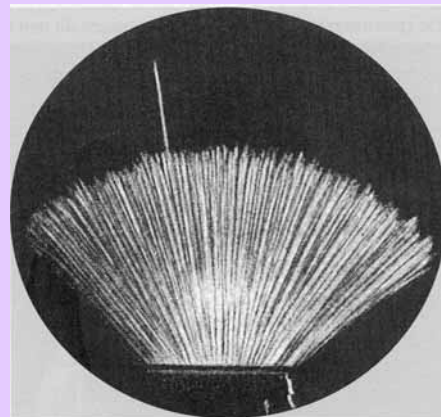
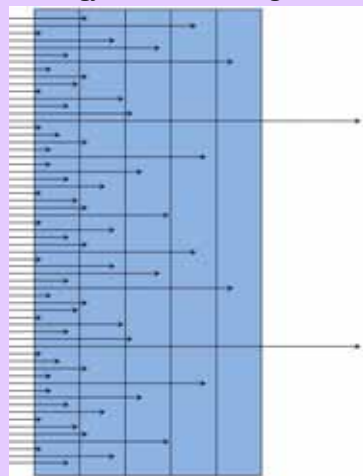
|                |                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|
| Paragraafvraag | Welke eigenschappen hebben alfa-, bèta- en gammastraling? |
|----------------|-----------------------------------------------------------|

#### Oriëntatieopgave - Dracht en halveringsdikte

De absorptie van röntgen- en gammastraling is goed te vergelijken met licht in melk of in laagjes zonnebrilfolie. De stralingsdeeltjes worden niet afgeremd maar stuk voor stuk geabsorbeerd door atomen in het materiaal. In één laagje met halveringsdikte  $d$  wordt 50% geabsorbeerd.



Figuur 2.1 Absorptie van zonlicht in laagjes folie.



Figuur 2.2 Links: Absorptie van licht, gamma- of röntgenstraling. In elk laagje wordt de helft van de lichtdeeltjes geabsorbeerd.

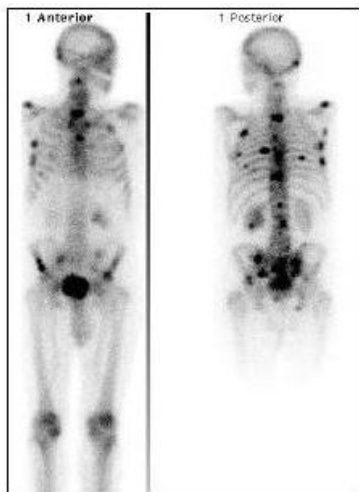
Foto rechts: Condenssporen van alfadeeltjes in onderkoelde lucht.

Bij alfa- en bètastraling treedt geen absorptie van het deeltje op. Het stralingsdeeltje botst tegen atomen en geeft daarbij steeds een beetje energie af. De snelheid van het deeltje wordt afgeremd.

In figuur 2.2 zijn rechts condenssporen van alfadeeltjes zichtbaar. De sporen bestaan uit kleine condensdruppeltjes die gevormd zijn rond een molecuul dat door de botsing geïoniseerd is.

- Hoe groot is de snelheid van het alfadeeltje aan het eind van het condensspoor?
- De condenssporen zijn (op één na) allemaal even lang. Wat betekent dat voor de snelheid waarmee de alfadeeltjes uit de bron (aan de onderzijde van de foto) zijn gekomen?





Figuur 2.3 Scan van het lichaam. De donkere vlekken duiden op tumoren

- c. Leg uit waardoor bij alfa- en bètadeeltjes de snelheid wel kan worden afgeremd door botsingen, en bij gamma- en röntgendeeltjes niet.
- d. Leg uit dat een loodschort nooit alle röntgenstraling tegen kan houden, maar wel alle alfa- en bètastraling.

De dracht van alfa- en bètastraling hangt af van de snelheid van de deeltjes en de dichtheid van de materie waar ze doorheen bewegen.

In figuur 2.3 zie je een scan die gemaakt is door radioactief materiaal in het lichaam te spuiten. Het materiaal hecht zich aan groeiplekken en dus ook aan tumoren. Om een afbeelding te kunnen maken moet het radioactief materiaal gammastraling uitzenden.

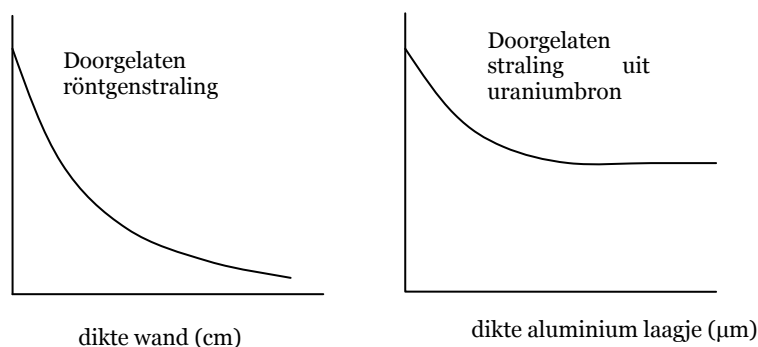
- e. Leg uit waarom radioactief materiaal dat alfa- of bètastraling uitzendt, ongeschikt is om een dergelijke opname te maken.

Bij deze scan is wel gebruik gemaakt van röntgenstraling. Het is een combinatie van een röntgenfoto en een gammascan.

- f. Wat zou je zien als er alleen een gammascan zou zijn gemaakt?

### Ontdekking van alfastraling

Het linkerplaatje geeft aan hoeveel röntgenstraling een materiaal van bepaalde dikte doorlaat.



Figuur 2.4

Rutherford voerde een experiment uit met de straling uit uranium. De resultaten staan hierboven in fig. 2.4.

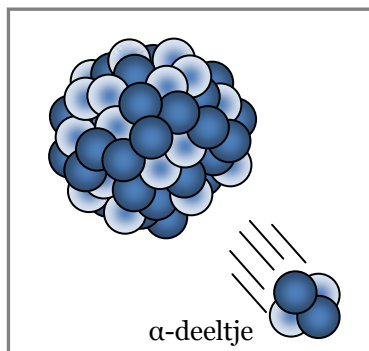
De grafiek voor de straling uit de uraniumbron heeft een ander verloop dan die van de röntgenstraling. Rutherford vroeg zich af of er sprake kon zijn van een ander soort straling. In opgaven 20 komen we er op terug.

### Nucleaire diagnostiek

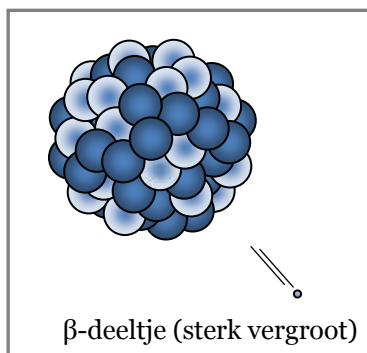
Radioactiviteit of **radioactief verval** is het proces waarbij instabiele atoomkernen energie verliezen in de vorm van deeltjes of elektromagnetische straling. Deze straling noemen we **ioniserende straling**.

In de nucleaire diagnostiek gebruikt men radioactiviteit, onder andere, om tumoren (kankergezwellen) op te sporen. Met röntgenstraling is dit moeilijk te zien omdat de absorptie in de tumor gelijk is aan die van het omringende weefsel. In de nucleaire diagnostiek krijgt een patiënt een kleine hoeveelheid radioactieve stof toegediend. Die stof zendt gammastraling (zeer energierijke straling) uit die gedetecteerd wordt, zodat duidelijk wordt waar die stof terecht gekomen is.

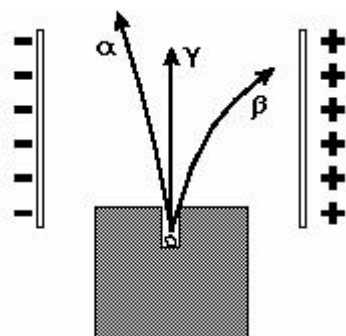
Tumoren zijn zeer actieve en snel groeiende weefsels en nemen daardoor sneller nieuw toegediende stoffen op dan gewoon weefsel. De meeste toegediende radioactieve stof komt dus in tumoren terecht en de straling komt dus vooral uit die tumoren. Met een zogenaamde gammacamera brengt men die tumoren in beeld.



Figuur 2.5 Een alfa-deeltje wordt weggestoten uit de kern.



Figuur 2.6 Een bèta-deeltje schiet uit de kern.



Figuur 2.7

## Radiotherapie

Radioactiviteit wordt ook gebruikt om tumoren te bestrijden (radiotherapie). Men injecteert in de tumor een hoeveelheid radioactieve stof zodat de straling de tumor kan vernietigen. Hier wordt verder niet op ingegaan.

Om de nucleaire diagnostiek te begrijpen is kennis over de bouw van het atoom en over radioactiviteit onmisbaar.

## Alfastraling

In het begin van de 20e eeuw werd ontdekt dat alfadeeltjes uit twee protonen en twee neutronen bestaan. Een alfadeeltje is daardoor gelijk aan een **heliumkern**.

$$\alpha = 2 \text{ protonen} + 2 \text{ neutronen} = \text{Helium-kern}$$

Bij het uitzenden van een alfa-deeltje zou je kunnen zeggen dat een stukje van de kern afbreekt. De kern die achterblijft is door het afbreken veranderd in een andere kern, met twee protonen en twee neutronen minder dan daarvoor. Het is dan ook een ander soort atoom geworden.

Een alfadeeltje is door de twee protonen positief geladen. Een alfadeeltje wordt meestal met grote snelheid uit de atoomkern gestoten. Daardoor heeft een alfa-deeltje een groot **ioniserend vermogen**. Dat wil zeggen dat een heliumkern, die hetzelfde is als een α-deeltje, makkelijk van andere atomen een elektron kan wegstoten. Die atomen vormen daardoor positieve ionen. Door die ioniserende werking is de straling op te sporen en te meten. In het menselijk lichaam kan deze straling allerlei moleculen beschadigen en dat kan tot stralingsziektes leiden.

Daarentegen is het **doordringend vermogen** van alfadeeltjes erg klein. Een blaadje papier is al genoeg om praktisch alle alfastraling tegen te houden.

Voor nucleaire diagnostiek is alfastraling ongeschikt: de straling is buiten het lichaam niet waar te nemen en is door de grote ioniserende werking schadelijk voor de patiënt.

## Bètastraling

Bètastraling bestaat uit zeer snelle elektronen:

$$\beta^- = \text{elektron}$$

Bij bèta-straling schiet er een elektron uit de kern van een atoom. Dat lijkt op het eerste gezicht vreemd, want in de kern zitten alleen protonen en neutronen. Het elektron is een product van een andere reactie in de kern. In een atoomkern met naar verhouding veel neutronen gaat een neutron namelijk over in een elektron en een proton. De kern wordt daardoor stabiel.

In die kern vindt dus de volgende reactie plaats:



De elektronen waaruit bètastraling bestaat, hebben een kleinere lading dan alfadeeltjes. Ook zijn ze veel lichter en bewegen ze met een grotere snelheid. Als ze een molecuul passeren hebben ze daardoor minder kans dat molecuul te ioniseren. Het ioniserend vermogen van bètastraling is dus kleiner dan dat van alfastraling en bètastraling is dus minder gevaarlijk. Maar, nog steeds te gevaarlijk voor de mens.

Dat maakt ook bètastraling voor nucleaire diagnostiek ongeschikt.

Bovendien is het doordringend vermogen, net als van alfastraling, te klein.

## Gammastraling

Gammastraling is elektromagnetische straling. De energie van de stralingsdeeltjes (fotonen) is veel groter dan bij röntgenstraling.

$$\gamma = \text{foton}$$

Gamma-deeltjes zijn ongeladen. Met een elektrisch veld zijn alfa-, bèta- en gammastraling van elkaar te scheiden (zie figuur 2.7)

Eén stralingssoort buigt naar de positief geladen plaat toe en de andere buigt naar de negatief geladen plaat toe.

### Extra

Merk op dat gammastraling uit de atoomkern komt, röntgenstraling is afkomstig uit de elektronenwolk. De energie van gammafotonen is hoger dan die van röntgenstraling.

Gammafotonen ontstaan als een atoomkern van een hogere energietoestand terugvalt naar de stabiele grondtoestand.

Gammastraling heeft een groot doordringend vermogen, maar het ioniserend vermogen en dus de schadelijke werking op het lichaam is klein. Dit maakt gammastraling geschikt voor nucleaire diagnostiek.

### Eigenschappen en toepassingen

Het verschil in eigenschappen van alfa- bèta- en gammastraling betekent dat voor verschillende toepassingen verschillende soorten straling gebruikt worden. De onderstaande tabel geeft een overzicht van de eigenschappen en toepassingen van de verschillende soorten straling.

|                                               | alfa                                                                                                                                                 | bèta                                                                                                                                      | gamma                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Deeltje</b>                                | Heliumkern ( ${}^4_2\text{He}$ ), positief geladen                                                                                                   | Elektron met hoge energie en negatieve lading                                                                                             | Foton (elektromagnetische straling) met hoge energie. Gammastraling lijkt veel op röntgenstraling.                                       |
| <b>Eigenschappen</b>                          | Heeft sterk ioniserende werking en kan veel schade in het lichaam aanrichten. Doordringend vermogen is zeer klein (in het lichaam minder dan één mm) | Heeft minder lading en mede daardoor dus ook minder ioniserende werking. Gering doordringend vermogen (in het lichaam enkele centimeters) | Geringe ioniserende werking en een groot doordringend vermogen. Het menselijk lichaam is voor gammastraling vrijwel doorzichtig.         |
| <b>Ontstaan</b>                               | Grote atoomkernen zenden vaak deze straling uit<br>Bijvoorbeeld:<br>${}^{226}_{88}\text{Ra} \Rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$    | Als er te veel neutronen in de kern zijn, gaat een neutron over in een proton onder uitzending van een elektron                           | De atoomkern bevindt zich in een hogere energietoestand. Als de kern terugvalt naar zijn grondtoestand, wordt een gammafoton uitgezonden |
| <b>Bruikbaarheid in nucleaire geneeskunde</b> | Schadelijk voor het lichaam en ook door gering doordringend vermogen niet bruikbaar                                                                  | Door gering doordringend vermogen niet bruikbaar (ook enigszins schadelijk)                                                               | Zeer bruikbaar door groot doordringend vermogen, richt in het lichaam weinig schade aan                                                  |

## Opgaven

### 19 Begripstest

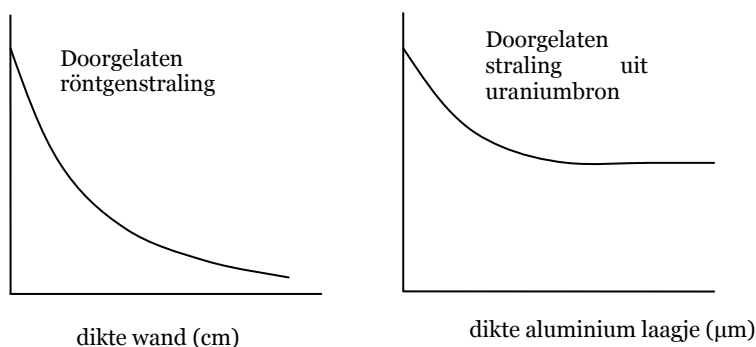
Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- De dracht van alfastraling geeft aan na hoeveel cm nog de helft van de straling over is. ja / nee
- De dracht van alfastraling is groter dan van bètastraling. ja / nee
- Alfadeeltjes zijn positief geladen, bètadeeltjes negatief. ja / nee
- Het ioniserend vermogen geeft aan hoeveel schade een deeltje kan aanrichten. ja / nee

- e. Alfadeeltjes kunnen meer schade aanrichten dan bètadeeltjes. ja / nee
- f. Gammastraling komt uit de kern van een atoom, ja / nee röntgenstraling niet.

## 20 Ontdekking van alfastraling

Het linkerplaatje geeft aan hoeveel röntgenstraling een materiaal van bepaalde dikte doorlaat.



Figuur 2.8

Rutherford deed een experiment met de straling uit uranium. Hij deed om uranium steeds dikkere laagjes aluminium. Resultaat: het rechterplaatje.

- a. De eenheden van de horizontale as zijn verschillend. Vul in:  $1 \mu\text{m} = \dots$  cm.
- b. Leg uit dat er uit de uraniumbron twee soorten straling moeten komen.
- c. Eén van de twee soorten straling is al na enkele  $\mu\text{m}$  verdwenen. Welk type straling is dat geweest? Leg uit.
- d. Wat zou de andere soort straling geweest kunnen zijn? Leg uit of je met zekerheid kunt zeggen of het bèta- of gammastraling is.
- e. Rutherford gebruikt uranium-238. Zoek in Binas tabel 25 op welke soorten straling deze stof uitzendt.

## 21 Alfa-, bèta-, gamma- en röntgenstraling

De verschillende soorten straling hebben verschillende eigenschappen.

- a. Welk stralingsdeeltje komt niet uit de kern van een atoom?
- b. Welk deeltje heeft de grootste massa?
- c. Welke deeltjes hebben de grootste snelheid?
- d. Welk deeltje heeft het grootste doordringend vermogen?
- e. Welk deeltje heeft het kleinste ioniserend vermogen?
- f. Welk deeltje is zowel voor diagnostiek (het maken van beelden) als voor het vernietigen van tumorcellen ongeschikt?

## 22 Toepassingen van straling

Hieronder staat een aantal toepassingen van ioniserende straling. Geef bij elk van deze toepassingen antwoord op de volgende drie vragen.

- a. Welke soort straling is het meest geschikt voor deze toepassing, en waarom?
- b. Waarom zijn de andere soorten straling minder of niet geschikt?
- c. Ontstaat er bij deze toepassing radioactief afval?

### Toepassingen

- 1. Inwendig onderzoek aan organen met behulp van een tracer. Dit is een radioactieve stof die aan een patiënt wordt toegediend en door actief weefsel, zoals een tumor, snel wordt opgenomen. De tracer hoopt dus snel op in een tumor. Uit de tumor komt dan dus veel straling, veel meer dan uit het omringende weefsel. Met een speciale gammacamera kan de

straling en dus de locatie en grootte van de tumor zichtbaar worden gemaakt.

2. Inwendige bestraling van een tumor in de schildklier met een jodiumisotoop.
3. Uitwendige bestraling van een huidtumor
4. Steriliseren van injectiespuiten in het ziekenhuis.
5. Diktecontrole in het productieproces van staalplaat.

## 2 Nucleaire diagnostiek

### 2.2 Bouw van atoomkern; isotopen

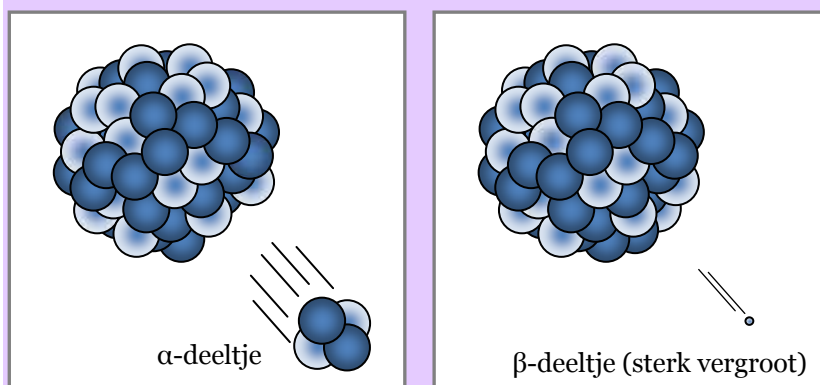
Bij radioactief verval komt er een stralingsdeeltje uit de kern van een instabiel atoom. Daardoor verandert de samenstelling van de atoomkern. Wat blijft er daarna over in de kern?

|                |                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------|
| Paragraafvraag | Wat gebeurt er in een atoomkern bij radioactief verval? |
|----------------|---------------------------------------------------------|

Veel atoomkernen zijn niet stabiel: de kern zit niet stevig genoeg in elkaar om alle deeltjes bij elkaar te houden. In dat geval is de kern **radioactief**, want deze zendt straling uit: **kernstraling**. De bekendste soorten straling zijn **alfa-** ( $\alpha$ ), **bèta-** ( $\beta$ ) en **gamma** ( $\gamma$ ) **straling**.

#### Oriëntatieopgave - Vervalreacties

Een instabiele atoomkern kan op verschillende manieren vervallen. De meest voorkomende vervalreacties zijn **alfa-verval** en **bèta-verval**. Andere vervalreacties zijn K-vangst en bèta-plus-verval en vallen buiten de leerstof.



Figuur 2.9 Bij alfa-verval en bètaverval komt een stralingsdeeltje uit de kern.

Bekijk BINAS tabel 25. Van een groot aantal isotopen is aangegeven op welke manier het verval.

- Uit welke deeltjes is een alfa-deeltje opgebouwd?
  - Alfa-verval komt voornamelijk bij zeer grote atoomkernen voor. Kun je uitleggen waardoor het bij grote atoomkernen kennelijk makkelijker is om een alfa-deeltje af te stoten?
  - Hoe veranderen het atoomnummer en het massagetal bij alfaverval?
- Bij bètaverval komt er een elektron uit de kern. Hoe verandert het aantal protonen en neutronen in de kern bij bètaverval?
- Hoe veranderen het atoomnummer en het massagetal bij bètaverval?

#### Samenstelling atoomkern

De atoomkern bevat twee soorten kerndeeltjes: **protonen** en **neutronen**. Beide deeltjes zijn ongeveer even groot, met bijna dezelfde massa. De

elektronen zijn veel lichter, praktisch alle massa van het atoom zit dus in de kern.

Een proton heeft positieve elektrische lading (evenveel als die van een elektron, maar die is negatief) en een neutron is elektrisch neutraal. Een normaal atoom bevat evenveel elektronen als protonen en is dus elektrisch neutraal.

Het aantal protonen in de atoomkern bepaalt de atoomsoort. Zo heeft waterstofkern één proton, een heliumkern twee, een koolstofkern zes en de grootste redelijk stabiele atoomkern, die van uranium, 92 protonen.

Men geeft bij een atoomkern met twee getallen aan hoe de kern is samengesteld. Het ene getal, het **atoomnummer Z**, geeft aan hoeveel protonen de kern bevat. Het andere getal, A, is het **massagetal**. Dat geeft het totaal aantal kerndeeltjes (protonen en neutronen) in de kern aan.

### Voorbeeld

Als voorbeeld de kern van kobalt:  $^{59}_{27}\text{Co}$

Het getal bovenaan is het massagetal. De kobaltkern bevat dus 59 kerndeeltjes. Onderaan staat het atoomnummer: kobalt heeft 27 protonen. Deze kobaltkern bevat dus  $59 - 27 = 32$  neutronen.

De stikstofkern  $^{14}_7\text{N}$  bevat dus 7 protonen en 7 neutronen.

De zuurstofkern  $^{16}_8\text{O}$  heeft 8 protonen en 8 neutronen.

Het aantal neutronen wordt aangegeven met de letter N. Er geldt dus:

$$A = N + Z$$

Bij kleine atoomkernen is het aantal neutronen in de kern ongeveer even groot als het aantal protonen. Bij grotere kernen komen er steeds meer neutronen ten opzichte van het aantal protonen. Voorbeelden:

De zuurstofkern  $^{16}_8\text{O}$  heeft 8 protonen en 8 neutronen.

Het loodatoom  $^{208}_{82}\text{Pb}$  heeft 82 protonen, 82 elektronen en 126 neutronen.

### Isotopen

Bij elk element komen verschillende soorten van het atoom voor, dat zijn **isotopen**. Een bekend voorbeeld is koolstof-12 en koolstof-14. Bij koolstof-14 zitten er twee extra neutronen in de kern en daardoor is het atoom een beetje zwaarder dan een 'normaal' koolstofatoom. Dat is tegelijk het enige verschil, koolstof-14 reageert bijvoorbeeld op dezelfde manier met zuurstof als normaal koolstof.

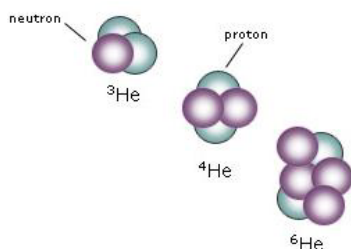
Er bestaan drie soorten heliumkernen. Dat moet aan het aantal neutronen liggen, want een heliumkern (atoomnummer 2) heeft altijd twee protonen.

Een kern  $^3_2\text{He}$  heeft één neutron,  $^4_2\text{He}$  heeft er twee en  $^6_2\text{He}$  vier.

Isotopen hebben een even groot aantal elektronen en daardoor dezelfde chemische eigenschappen. Helium is een edelgas, ongeacht de isotopensamenstelling. Verreweg het grootste deel van de elementen komt voor in de vorm van verschillende isotopen.

### Stabiel of instabiel

Sommige stabiele isotopen kunnen door beschieting met bv. neutronen instabiel worden en dan splijten.. Van de uraniumisotopen  $^{238}_{92}\text{U}$  en  $^{235}_{92}\text{U}$  is de tweede splijtbaar en daardoor bruikbaar in een kernreactor. De eerste is



Figuur 2.10

### Extra

De naam isotopen geeft aan dat zij op dezelfde plaats in het periodiek systeem staan (isos = gelijk, topos = plaats).

de meest in de natuur voorkomende uraniumisotoop en is niet splijtbaar. Men hanteert vaak een kortere schrijfwijze waarin alleen het massagetal aangegeven wordt, bijvoorbeeld U-238.

### Tekstvragen

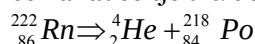
- Welke deeltjes bevat een atoom?
- Wat wordt bepaald door het atoomnummer?
- Wat wordt bepaald door het massagetal?
- Wat zijn isotopen?

### Alfa-verval

Als een alfadeeltje met grote snelheid uit de atoomkern gestoten wordt, vervalt de niet-stabiele atoomkern tot een andere, kleinere kern. Zo is bijvoorbeeld in de lucht een geringe hoeveelheid radioactief radon-222 aanwezig dat bij verval een alfadeeltje uitzendt. Een radonkern bevat 86 protonen en 222 kerndeeltjes. Na uitzending van het alfadeeltje heeft de gevormde kern 84 protonen en 218 kerndeeltjes. Die kern moet (Binas tabel 25) polonium-218 (Po-218) zijn.

### Voorbeeld - Alfaverval van radon-222

Radon-222 zendt bij verval een alfadeeltje uit. Je noteert dit als:



Je ziet dat je bij **kernreacties** een andere atoomsoort krijgt: radium wordt omgezet in polonium. We geven dit weer in de vorm van een **kernreactievergelijking**. In een dergelijke vergelijking staat welke atoomkernen verdwijnen, welke ontstaan en welk(e) stralingsdeeltje(s) daarbij uitgezonden of geabsorbeerd worden. Bij kernreacties is de som van de massagetallen en de som van de atoomnummers links en rechts van de pijl gelijk.

### Bèta-verval

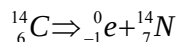
Bij bèta-verval komt er een elektron uit de kern. Het lijkt logisch om aan te nemen dat dit elektron uit de elektronenwolk komt, maar dat is niet zo. Het elektron is een product van een kernreactie. In een atoomkern met naar verhouding veel neutronen gaat een neutron namelijk over in een elektron en een proton. De kern wordt daardoor stabiel.

In die kern vindt dus de volgende reactie plaats:  ${}_0^1n \Rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$

Het proton is met  ${}_1^1p$  aangeduid, maar dat mag ook  ${}_1^1H$  zijn.

### Voorbeeld - Bètaverval van koolstof-14

Koolstof-14 heeft te veel neutronen om stabiel te kunnen zijn. Het instabiele koolstof-14 gaat over in een stabiele stikstofkern dat een proton meer en een neutron minder heeft dan de kern van koolstof-14:



### Gammastraling

Gammastraling bestaat uit fotonen ('energiepakketjes'). Massagetal en lading van het foton zijn beide 0. Meestal laat je beide nullen weg en schrijf je:

$$\gamma = {}_0^0\gamma = \text{foton}$$

De energie van deze fotonen is zeer groot, meestal groter dan die van röntgenstraling. Gammafotonen ontstaan als een atoomkern van een hogere energietoestand terugvalt naar de grondtoestand.

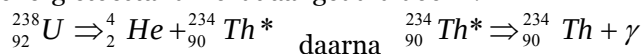
### Extra

Merk op dat gammastraling uit de atoomkern komt, röntgenstraling is afkomstig uit de elektronenwolk. De energie van gammafotonen is hoger dan die van röntgenstraling.



### Voorbeeld - Verval van uranium-238

Uranium-238 zendt eerst alfastraling. Daardoor ontstaat een kern met een hogere energietoestand, die vervalst door uitzending van een gammadeeltje. De hogere energietoestand wordt aangeduid door \*.



## Opgaven

### 23 Begripstest

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- |                                                                            |          |
|----------------------------------------------------------------------------|----------|
| a. Bij alfa-verval neemt het aantal kerndeeltjes met twee af.              | ja / nee |
| b. Bij bètaverval wordt het aantal protonen in de kern één groter.         | ja / nee |
| c. Bij bètaverval vormen een proton en een neutron samen een elektron.     | ja / nee |
| d. Het atoomnummer is gelijk aan het aantal protonen.                      | ja / nee |
| e. Het massagetal is gelijk aan het aantal kerndeeltjes.                   | ja / nee |
| f. Isotopen hebben evenveel neutronen en een verschillend aantal protonen. | ja / nee |
| g. Bij een ion is het aantal elektronen en protonen ongelijk.              | ja / nee |
| h. Een stralingsdeeltje kan een atoom ioniseren.                           | ja / nee |

### 24 Het atoom aluminium-27

- Hoeveel protonen zijn er in de kern van een atoom aluminium-27?
- Hoeveel neutronen?
- Hoeveel elektronen zijn er buiten de kern?

### 25 Symboolnotatie

- Schrijf in symbolen een atoomkern met 28 protonen en 30 neutronen.
- Voor een elektron is de symboolnotatie:  ${}_{-1}^0e$ . Leg uit waarom men voor het atoomnummer -1 schrijft.
- Geef de symboolnotatie van een neutron, een proton en een alfa-deeltje.
- Een positron (een bèta-plus-deeltje) is identiek aan een elektron, alleen de lading is positief. Geef de symboolnotatie van een positron.

### 26 IJzer ( ${}^{56}\text{Fe}$ )

Een proton en een neutron hebben bijna even grote massa,  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg. Een elektron heeft een massa van  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg.

- Bereken met deze gegevens de massa van een atoomkern van  ${}^{56}\text{Fe}$ .
- Bereken de massa van de elektronen in een atoom  ${}^{56}\text{Fe}$ .
- Hoeveel keer zo zwaar is de kern als de elektronenwolk?

Een blokje ijzer van 80,0 gram bestaat uitsluitend uit atomen  ${}^{56}\text{Fe}$ .

- Bereken uit je antwoorden op a en b het aantal atomen in dit blokje.

**27 Radium ( $^{226}\text{Ra}$ )**

- Welke soort straling zendt het radioactieve radium-226 uit?
- Schrijf de reactievergelijking op.
- Is de ontstane isotoop radioactief?
- Zo ja, geef ook de vergelijking van het verval daarvan.

**28 Vervalsreacties**

Geef de vergelijking van het verval van de volgende kernen:

- $^{99}\text{Mo}$
  - $^3\text{H}$
  - $^{210}\text{Po}$
-

## 2 Nucleaire diagnostiek

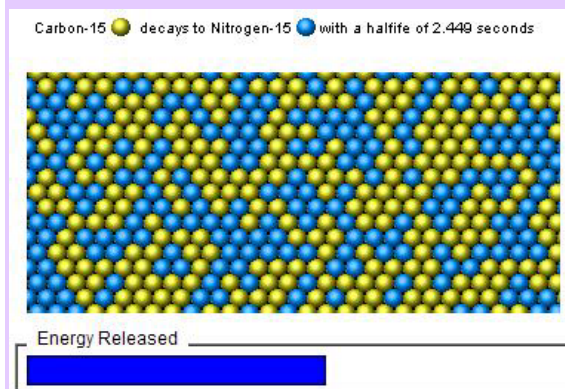
### 2.3 Halveringstijd

Bij radioactief verval komt er een stralingsdeeltje uit de kern van een instabiel atoom. Daardoor verandert de samenstelling van de atoomkern en neemt het aantal instabiele atoomkernen geleidelijk af.

|                |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| Paragraafvraag | Hoe lang blijft een stof radioactief? |
|----------------|---------------------------------------|

#### Oriëntatieopgave – Applet ‘Half-life’

In een radioactieve stof vervalt een instabiele kern naar een ander soort kern waarbij een stralingsdeeltje uitgezonden wordt. De onderstaande afbeelding komt van een applet uit het project Physics 2000 van de Colorado University (zoek op ‘Half-life’ en ‘Colorado’). Koolstof-15 vervalt naar stikstof-15 waarbij een bètadeeltje uitgezonden wordt.



Figuur 2.11 Applet die het verval van koolstof-15 tot stikstof-15 weergeeft.

- Bekijk de applet en beschrijf in je eigen woorden wat er gebeurt.  
In de applet wordt ook aangegeven hoeveel energie er per seconde wordt uitgezonden. Daarmee wordt de energie van de bètastraling bedoeld.
- Leg uit dat de energie die per seconde wordt uitgezonden veroorzaakt wordt door de activiteit  $A$  van de bron.
- Hoe komt het dat de energie die vrijkomt geleidelijk afneemt?  
Zowel het aantal instabiele kernen als de activiteit van de bron daalt.
- Leg uit waardoor de activiteit afneemt.
- Na een bepaalde tijd is de helft van het oorspronkelijke aantal instabiele atomen vervallen. Leg uit dat de activiteit  $A$  dan ook gehalveerd is.
- Wat kun je dan zeggen over de activiteit  $A$  na twee halveringstijden?  
In de formule  $A(t) = A(0) \cdot 0,5^n$  is  $n$  het aantal halveringstijden.
- Leg uit hoe je  $n$  kunt berekenen uit de verstreken tijd  $t$  en de halveringstijd  $t_{1/2}$ . Schrijf het antwoord als een formule.

- g. Bij de start van de applet is de activiteit 128 Bq. De halveringstijd van koolstof-15 is 2,45 s. Hoe lang duurt het tot de activiteit gedaald is tot 4,0 Bq?
- h. Bij de start van de applet zijn er 448 instabiele kernen. Hoe lang duurt het totdat er nog maar één instabiele kern over is? Leg ook uit waarom het eigenlijk geen zin heeft om dat precies te berekenen.
- i. Bij het verval van een stof met een grotere halveringstijd (zoals Beryllium-11 met een halveringstijd van 13,81 s) is de per seconde uitgezonden energie veel lager. Hoe zou dat komen?

## Extra

Henri Becquerel (1852-1908) is de ontdekker van de radioactiviteit. Hij ontdekte bij toeval dat uraniumzouten in een donkere kast fotografisch materiaal konden belichten.

### Halveringstijd en activiteit

Bij relatief stabiele kernen is de kans dat een kern verval, klein. De stof vervalft langzaam en vertoont weinig radioactiviteit. Een stof met zeer onstabiele kernen vervalft daarentegen in hoog tempo en vertoont grote radioactiviteit, vooral in het begin. Een maat voor de snelheid waarmee een radioactieve stof vervalft is de halveringstijd (vroeger: halfwaardetijd).

De **halveringstijd** is de tijd waarin de helft van het oorspronkelijk aantal atoomkernen vervalft.

De **activiteit** van een hoeveelheid radioactieve stof is het aantal vervalsreacties per seconde. De eenheid van activiteit is dus: 'per seconde' =  $1/s = s^{-1}$ . Die eenheid van activiteit noem je de **becquerel** (Bq).

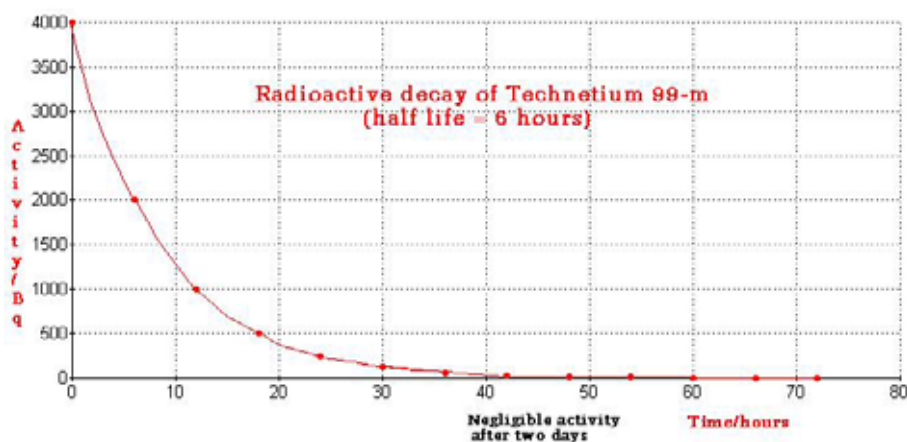
Als de halveringstijd groot is, gaat het verval van de atoomkernen langzaam, de activiteit van de stof is dan klein. Zo is de halveringstijd van U-238 ongeveer 4,5 miljard jaar. Sinds het ontstaan van de aarde is er ongeveer één halveringstijd verstreken en is dus de helft van het oorspronkelijk aanwezige uranium over.

Neptunium (Np-237) heeft een halveringstijd van 'slechts' 2,1 miljoen jaar. Die stof komt in de natuur niet aantoonbaar voor. Als het er ooit geweest is, is het sinds het ontstaan van de aarde volledig vervallen.

### Technetium

In de nucleaire diagnostiek wordt vaak technetium (Tc-99m) gebruikt. Het zendt vrijwel uitsluitend gammastraling uit en heeft een halveringstijd van 6,0 uur. Andere term voor deze methode: SPECT (Single Photon Emission Tomography).

In figuur 2.12 is de activiteit van Tc-99m uitgezet tegen de tijd.



Figuur 2.12

Na elke 6 uur is de activiteit gehalveerd: op  $t = 0$  was de activiteit 4000 Bq, op  $t = 6$  h is die 2000 Bq en op  $t = 12$  h is die 1000 Bq enz.

Na 2 etmalen = 8 halveringstijden is de activiteit  $(1/2)^8 = 1/256^e$  deel van wat het in het begin was. Dus is na twee dagen het technetium zo goed als geheel uitgewerkt.

Hoe lang een radioactieve stof na toediening in je lichaam blijft, wordt door twee factoren bepaald: de snelheid waarmee de stof op natuurlijke wijze het lichaam verlaat en de snelheid waarmee de stof vervalst. Een voordeel van technetium is dus dat het na 48 uur vrijwel geheel vervallen is. Bovendien is bij een korte halveringstijd de activiteit groot, daardoor is er minder van de stof nodig. Een andere belangrijke eigenschap van technetium is dat het alleen gamma-straling uitzendt.

### Activiteit in de tijd

De activiteit  $A(t)$  is gedefinieerd als het aantal atoomkernen dat per seconde vervalst. De activiteit is ook gelijk aan het aantal stralingsdeeltjes dat een bron per seconde uitzendt. Je kunt het verloop van de activiteit ook uitrekenen met de volgende formule:

$$A(t) = A(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Op tijdstip  $t$  geldt:  $t = n \times t_{1/2}$  ( $t$  en  $t_{1/2}$  in gelijke eenheden)

**Symbolen:**  $A(t)$  is de activiteit op een tijdstip  $t$  na  $n$  halveringstijden,  $A(0)$  is de beginactiviteit (op tijdstip  $t=0$ ).

**Geldigheid:** deze vergelijking is geldig als de stof slechts één radioactief isotoop bevat.

Het aantal instabiele atoomkernen neemt op dezelfde manier af.

### Tekstvragen

- Wat is activiteit?
- Wat is de eenheid van activiteit?
- Wat is halveringstijd?
- Welke isotoop is stabiel, die met een grote of die met een kleine halveringstijd?

### Rekenvoorbeeld

#### Opgave

De radioactieve isotoop Ac-225 heeft een halveringstijd van 10 dagen.

In het begin is de activiteit  $1,20 \cdot 10^4$  Bq

- Bereken de activiteit na 63 dagen.
- Bereken na hoeveel dagen de activiteit is gedaald tot 315 Bq.

#### Uitwerking

- 63 dagen komt overeen met 6,3 halveringstijden.  
Invullen in de formule geeft:

$$A(63) = 1,20 \times 10^4 \times \frac{1}{2}^{6,3} = 152 \text{ Bq}$$

- $A(t)$  is 315 Bq,  $A(0)$  is weer  $1,20 \cdot 10^4$  Bq,  $n$  is onbekend. Je krijgt dan

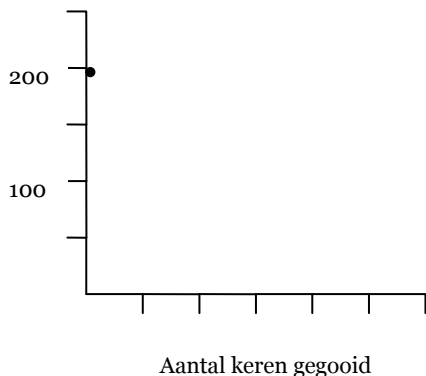
$$A(t) = 1,20 \times 10^4 \times \frac{1}{2}^n \text{ invullen } 1,20 \times 10^4 \times \frac{1}{2}^n = 315$$

Hieruit  $n$  berekenen gaat het snelst met de Grafische Rekenmachine, bijvoorbeeld via Calc → Intersect of met Math → Solver

Intersect:  $Y1 = 12000 \times 0.5^X$  en  $Y2 = 315$

Solver:  $12000 \times 0.5^X - 315 = 0$

Je vindt dan  $n = 5,3$ , dus 5,3 halveringstijden →  $5,3 \times 10$  dagen = 53 dagen



Figuur 2.13

## Practicum – Toeval bestaat

- Verzamel in een bak 200 muntjes. Gooi de inhoud over in een lege bak. Haal alle muntjes weg die ‘munt’ gaven. Zet het aantal overgebleven muntjes in het assenstelsel. Horizontale as: aantal worpen, verticale as: aantal overgebleven munten.
  - Herhaal dit op dezelfde manier met de muntjes die ‘kop’ gaven.
  - Ga door tot alle muntjes zijn afgevallen.
  - Vul de bak met 200 punaises. Gooi punaises over in een lege bak. Haal alle punaises weg die met de punt omhoog liggen. De punaises die schuin liggen blijven dus over. Zet dit aantal punaises met een sterretje in het diagram.
  - Herhaal dit op dezelfde manier met de overgebleven punaises, dus de punaises die de eerste keer schuin met de punt naar beneden zijn gevallen.
  - Ga door tot alle punaises op zijn.
  - Teken de grafiek die je verwacht als je met 200 dobbelstenen begint, een dobbelsteen valt af als je zes hebt gegoooid.
- o Welke overeenkomst zie je tussen deze grafieken en de grafieken voor de intensiteit van de straling die een bron afgeeft?
  - o Wat heeft de kleinste ‘halveringstijd’: muntjes, punaises of dobbelstenen?
  - o Leg uit of je het eens bent met de uitspraak: “Het toeval bepaalt of een kern in een bepaalde periode vervalst.”

## Opgaven

Gebruik Binas tabel 25.

### 29 Begripstest

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- |                                                                                                                                 |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| a. Na 10 halveringstijden is 99,9% van de straling verdwenen.                                                                   | ja / nee |
| b. Een grote halveringstijd zorgt voor een grote activiteit.                                                                    | ja / nee |
| c. Als een atoom na één halveringstijd nog niet vervallen is, dan is de kans om te vervallen in de volgende halveringstijd 25%. | ja / nee |
| d. De eenheid van activiteit is becquerel.                                                                                      | ja / nee |
| e. Een stof met een korte halveringstijd blijft lang straling uitzenden.                                                        | ja / nee |
| f. Het principe van halveringstijd geldt alleen voor alfa- en bèta-verval, niet voor het uitzenden van gammastraling.           | ja / nee |
| g. Bij een kleine halveringstijd hebben de stralingsdeeltjes meer energie dan bij een grote halveringstijd.                     | ja / nee |

### 30 Calcium-47

- Geef de reactievergelijking van het verval van een kern  $^{47}\text{Ca}$ .
- Hoe groot is de halveringstijd van  $^{47}\text{Ca}$ ?

Een preparaat  $^{47}\text{Ca}$  heeft op tijdstip  $t = 0$  een activiteit van 1,000 MBq.

- Bereken de activiteit op  $t = 24,0$  h.
- Bereken na hoeveel dagen de activiteit is gedaald tot 5,00 kBq.

### 31 Technetium-99m

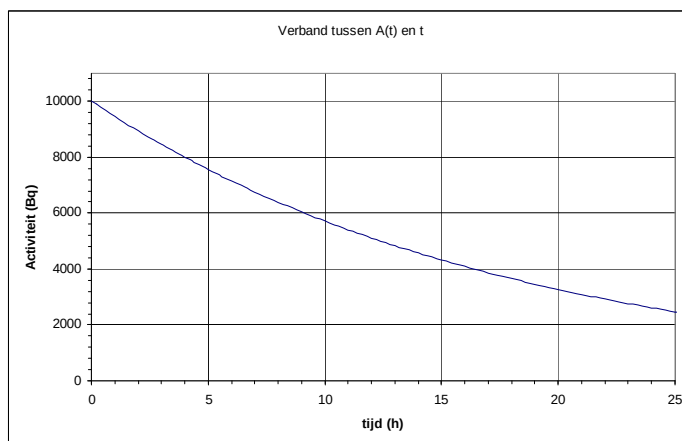
Een hoeveelheid technetium-99m, halveringstijd 6,0 h, heeft 12,0 h na toediening aan een patiënt een activiteit van 2,0 kBq.

- Bereken de activiteit op het moment van de toediening
- Bereken na hoeveel uur na toediening de activiteit gedaald is tot 100 Bq.

### 32 Halveringstijd

In figuur 2.14 is van een radioactief isotoop het verband tussen de activiteit en de tijd weergegeven.

- Bepaal uit het diagram de halveringstijd.
- Bereken na hoeveel uur de activiteit gedaald is tot 625 Bq.



Figuur 2.14

- Leg uit dat de grafiek van het aantal instabiele kernen als functie van de tijd dezelfde vorm heeft als de grafiek van de halveringstijd, maar een ander beginpunt heeft dan de grafiek van de halveringstijd.

### 33 Halveringstijd en activiteit

Men heeft op  $t = 0$  evenveel kernen van  $^{33}\text{P}$  als van  $^{35}\text{S}$ .

- Leg uit welke van de twee de grootste activiteit op tijdstip  $t = 0$  heeft.
- Leg uit welke de grootste activiteit zal hebben op tijdstip  $t = 300$  dagen.

### 34 Stralende patiënt

Een patiënt die technetium toegediend heeft gekregen, is zelf een bron van gammastraling en dus een mogelijk gevaar voor zijn omgeving.

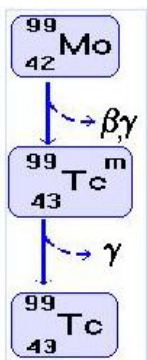
Geef een beredeneerde schatting na hoeveel uur de activiteit gedaald is tot 0,10 % van de beginactiviteit.

## 2 Nucleaire diagnostiek

### 2.4 Nucleaire diagnostiek in de praktijk

De nucleaire diagnostiek werkt niet met een beeld van een orgaan, maar laat zien hoe een orgaan functioneert: hoe actief is de stofwisseling, hoe goed is de doorbloeding, ontstaat er een tumor?

| Paragraafvraag | Hoe wordt de nucleaire diagnostiek toegepast? |
|----------------|-----------------------------------------------|
|----------------|-----------------------------------------------|



Figuur 2.15 Molybdeen-99 vervalt tot Technetium-99m dat de gewenste gammastraling uitzendt. Het Technetium-99 dat daaruit ontstaat is vrij stabiel, zodat het verval ervan weinig schade veroorzaakt.

#### Oriëntatieopgave - De ideale radioactieve bron

Nucleaire diagnostiek is niet zonder risico's. Er wordt immers een radioactieve stof in het lichaam gespoten en dat kan zowel voor de patiënt als voor de arts een extra stralingsbelasting opleveren.

Ziekenhuizen kunnen kiezen uit verschillende radioactieve stoffen. In verreweg de meeste gevallen wordt gekozen voor Technetium-99m. Dat lijkt de ideale bron te zijn voor de nucleaire diagnostiek. Wat maakt Technetium nu zo geschikt?

a. Lees eerst het artikel 'Molybdeen en Technetium'.

Bij de keuze voor de meest geschikte bron wordt gekeken naar:

1. Het type straling dat de bron uitzendt
2. De energie van de stralingsdeeltjes
3. De halveringstijd van de bron
4. De hechting van de stof aan delen van het lichaam
5. Eenvoudige beschikbaarheid in het ziekenhuis
6. Mogelijk radioactieve vervalproducten

b. Leg voor elk van bovenstaande criteria uit waarom Technetium-99m een ideale stof is voor nucleair onderzoek.

Molybdeen komt niet in de natuur voor. Het kernreactorcentrum NRG in Petten is Europa's grootste producent van Technetium-99m.

c. Beschrijf hoe Technetium-99m gemaakt wordt.



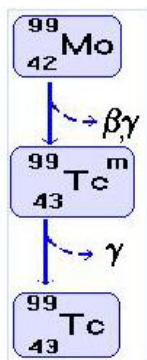
Figuur 2.16 – Kernreactor in Petten. (bron: NRG)

#### Molybdeen en Technetium (bron: NRG in Petten)

Technetium-99m is een radioactieve stof die veel gebruikt wordt voor medisch-nucleair onderzoek (in Europa miljoenen diagnoses per jaar). Technetium is zo populair omdat die stof precies de goede fysische en chemische eigenschappen bezit. De uitgezonden gammastraling heeft de juiste energie om een goede afbeelding te verkrijgen. De stralingsbelasting van de patiënt is zeer laag. Technetium laat zich gemakkelijk binden aan vele verschillende chemische stoffen zodat het voor uiteenlopende diagnoses bruikbaar is. De halveringstijd is 6 uur, lang genoeg om het medisch onderzoek goed uit te voeren en kort genoeg om de patiënt na het onderzoek niet in het ziekenhuis te hoeven houden.

Er lijkt maar één nadeel aan technetium te kleven. Hoe krijgt men een stof die na 6 uur al voor de helft verdwenen is iedere dag in elk ziekenhuis? Technetium-99m is het vervalproduct van molybdeen-99 dat zelf een halveringstijd heeft van 66 uur. En die halveringstijd laat transport wel toe, zelfs over grote afstanden.





**Figuur 2.18 - Molybdeen-99** vervalt tot Technetium-99m dat de gewenste gammastraling uitzendt. Het Technetium-99 dat daaruit ontstaat is vrij stabiel, zodat het verval ervan weinig schade veroorzaakt.

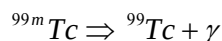


**Figuur 2.17** In de afgeschermdde fles (foto links) bevindt zich molybdeen-99. Het molybdeen vervalt naar technetium-99m. Het 'verse' molybdeen-99 is goed voor de behandeling van zo'n tienduizend patiënten.

Molybdeen-99 wordt gevormd bij de splijting van uranium en komt dus voor in 'gebruikte' splijtstof van een kernreactor. Het isoleren van molybdeen uit gebruikte splijtstof is chemisch gezien niet al te lastig, het probleem schuilt in de straling: de splijtingsproducten zijn hoogradioactief.

Tc-99m ontstaat uit het bètaverval van 99-molybdeen. Die 'm' betekent 'metastabiel'. Daarmee wordt bedoeld dat deze isotoop na vorming vrij lang in een hogere ('aangeslagen') energietoestand blijft.

Bij terugval naar de grondtoestand zendt de kern de voor medisch onderzoek bruikbare gammastraling uit:



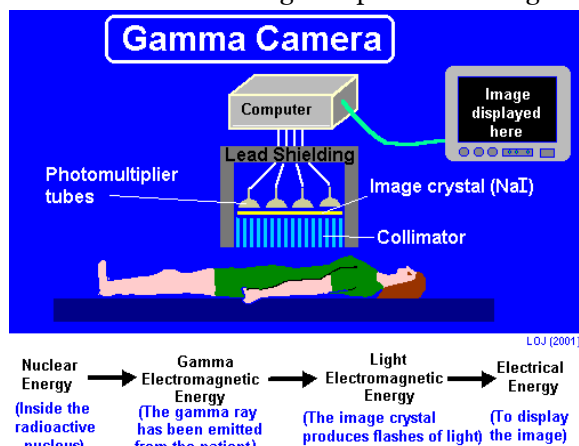
Het ontstane technetium-99 is zelf ook radioactief, het zendt bètastraling uit. Maar het heeft een zeer lange halveringstijd (ruim 200 000 jaar), zodat de schadelijke activiteit erg klein is.

De voordelen van 99m technetium zijn:

- De productie uit 99-molybdeen is vrij eenvoudig;
- de halveringstijd van 6 uur is ideaal: niet te lang, maar ook niet te kort;
- deze isotoop zendt uitsluitend gammastraling uit; er is dus geen schadelijke bijwerking van bèta- of alfastraling;
- het kan op verschillende manieren toegediend worden en is daardoor bruikbaar voor onderzoek van hersenen, botten, milt, nieren en lever.

### De gammacamera

In figuur 2.19 zie de beeldvorming bij de gammacamera. De straling uit de patiënt gaat omhoog. De collimator, een dikke plaat lood waarin verticale gaten geboord zijn, laat alleen fotonen door die verticaal omhooggaan. Daardoor is nauwkeurig te bepalen waar de gammastraling vandaan komt.



**Figuur 2.19**

Boven de collimator bevindt zich een natriumjodidekristal. Dit zet de energie van gammafotonen om in zichtbare lichtflitsen. Dat zichtbare licht wordt versterkt in zogenaamde fotomultiplicatorbuizen en omgezet in elektrische signalen die naar een computer gaan. Deze maakt er op een beeldscherm een beeld van.

### Nucleaire farmacie

Voor het onderzoek naar het functioneren van uiteenlopende organen zijn verschillende radio-isotopen nodig. Zo wordt voor het onderzoek naar de schildklier de joodisotoop I-123 gebruikt, bij botten gebruikt men strontium-89 of technetium-99m en bij rode bloedlichaampjes chroom-51 atomen.

De halveringstijd van de te gebruiken isotopen is meestal vrij kort, zodat ook nog in een behoorlijk tempo gewerkt moet worden.

### Voor- en nadelen

In de nucleaire diagnostiek spoort men allerlei defecten op: tumoren, zwakke plekken in de wanden van bloedvaten, onregelmatige of onvoldoende doorbloeding van weefsels, slecht functioneren van schildklier en longen.

De gammacamera is een kostbaar instrument. Door de grote activiteit van de radioactieve stof hoeft er maar weinig van worden toegediend en is de stof ook snel uitgewerkt. Na een paar dagen is er geen straling meer aan te tonen.

De stralingsrisico's zijn kleiner dan bij de CT-scan (§5.1). Toch past men deze techniek bij zwangere vrouwen alleen toe als het echt hard nodig is.

### Tekstvragen

- Wat is het nadeel van een te korte halveringstijd?
- Wat is het nadeel van een te lange halveringstijd?
- Waardoor is Tc-99m zeer geschikt voor nucleaire diagnostiek?
- Waarvoor dient de collimator bij een gammacamera?

### Begrippen

Radioactiviteit  
Radioactief verval  
Ioniserende straling  
Kern  
Elektron  
Proton  
Neutron  
Atoomnummer  
Massagetal  
Isotoop  
Radioactief verval  
Kernstraling  
Alfastraling  
Betastraling  
Gammastraling  
Heliumkern  
Kernreactie  
Kernreactievergelijking  
Ioniserend vermogen  
Halveringstijd  
Activiteit  
Becquerel (Bq)

### Samenvatting

- Een atoom bestaat uit een positief geladen **kern** en negatief geladen **elektronen**. Een atoom is niet geladen en heeft daardoor evenveel protonen in de kern als elektronen buiten de kern.
- De **kern** bestaat uit **protonen** en **neutronen**. De kern bevat bijna alle massa van het atoom.
- Het **atoomnummer Z** geeft het aantal protonen in de kern aan en is bepalend voor de atoomsoort.
- Het **massagetal A** geeft het totale aantal kerndeeltjes aan. Het aantal **neutronen N** is  $A - Z$ . Er geldt ook:  $A = N + Z$
- **Isotopen** zijn atomen met hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen.
- **Alfastraling** bestaat uit  ${}^4_2\text{He}$  kernen. Deze straling heeft een groot **ioniserend vermogen** en dus schadelijke werking. Het doordringend vermogen is zeer klein.
- **Betastraling** bestaat uit snelle elektronen. Betastraling heeft een groter doordringend vermogen en een tamelijk grote ioniserende werking.
- **Gammastraling** bestaat uit fotonen met hoge energie. De ioniserende werking is zeer klein en het doordringend vermogen is zeer groot.
- In een **kernreactievergelijking** is de som van de massagetallen van de aan de reactie deelnemende stoffen, die links van de pijl staan, gelijk aan de som van de massagetallen van de reactieproducten, die rechts van de pijl staan. Dit geldt ook voor de atoomnummers en de ladingen.
- De **activiteit** is het aantal vervalreacties per seconde. De eenheid van activiteit is de **becquerel** (Bq).
- De **halveringstijd** is de tijd waarin de helft van de atoomkernen verval.
- Voor de activiteit  $A(t)$  na  $n$  halveringstijden geldt:  $A(t) = A(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$   
met  $t = n \tau_{1/2}$

## Opgaven

### 35 Gammastraling in de geneeskunde

- Geef twee voordelen van het gebruik van gammastraling in de nucleaire geneeskunde.
- Waarom moet de patiënt tussen toediening van de radioactieve stof en het onderzoek met de gammacamera stil liggen?

### 36 Reactievergelijkingen

- Geef de vergelijking voor het ontstaan van  $^{99m}\text{Tc}$  uit  $^{99}\text{Mo}$ .
- Geef de vergelijking voor het verval van dit technetiumisotoop.

### 37 Reflectieopdracht – Wat volgt uit wat?

Geef bij elk van de elf onderstaande gebeurtenissen een verklaring met een of meer van de eigenschappen van radioactiviteit en straling.

| Gebeurtenissen                                                                                                                                   | Eigenschappen                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a. Als je een radioactieve bron bij een geladen voorwerp houdt, verdwijnt de lading van dat voorwerp.                                            | 1. Eén bron kan meerdere soorten straling uitzenden.                                           |
| b. Sommige stralingssoorten buigen naar een positief geladen plaat toe, andere buigt er van af en een derde soort straling wordt niet afgebogen. | 2. Er bestaat straling die negatief geladen is, straling die positief is en neutrale straling. |
| c. Als je een alfa- of bètaradioactief preparaat een tijd laat staan, vind je elementen die er eerst niet waren.                                 | 3. Straling uit radioactieve bronnen ioniseert moleculen in lucht.                             |
| d. Isotopen geven dezelfde scheikundige reacties.                                                                                                | 4. Alfastraling heeft een sterkere ioniserende werking dan bètastraling.                       |
| e. Als je isotopen in supersnelle centrifuges laat ronddraaien, komen ze op verschillende plaatsen terecht.                                      | 5. De ioniserende werking van gammastraling is zwakker dan die van bètastraling.               |
| f. In lucht komt alfastraling tien centimeter ver, bètastraling enkele meters en gammastraling honderden meters.                                 | 6. De energie van elektromagnetische straling wordt in afgestemde hoeveelheden afgegeven.      |
| g. Rutherford deed steeds dikkere laagjes aluminium om een uraniumbron en kreeg figuur 2.4 als resultaat.                                        | 7. De kernen van isotopen zijn niet even zwaar.                                                |
| h. Alfastraling gaat niet door de huid heen, bètastraling kan enige centimeter in het lichaam doordringen.                                       | 8. De aantallen protonen en elektronen van isotopen zijn gelijk.                               |
| i. 'Zwaar water' is een stof die chemisch hetzelfde reageert als gewoon water, maar waarvan de dichtheid groter is.                              | 9. Bij alfa en bèta-erval verandert de atoomkern.                                              |
| j. Als straling met een bepaalde golflengte een molecuul niet kan ioniseren, dan kan straling met een kortere golflengte dat mogelijk wel.       |                                                                                                |
| k. In het ziekenhuis gebruikt de afdeling Nucleaire Geneeskunde vooral gammastraling.                                                            |                                                                                                |

### 38 Fluor-18

Voor sommige scans wordt fluor-18 gebruikt, een positronstraler. Een positron is het zogenaamde antideeltje van een elektron: even grote massa, maar tegengestelde lading.

- Hoeveel protonen en hoeveel neutronen bevat een kern  $^{18}\text{F}$ ?
- Geef de reactievergelijking van het verval van  $^{18}\text{F}$ .

De halveringstijd van  $^{18}\text{F}$  is 110 minuten, dat is vrij lang.

- Wat is het voordeel van een vrij lange halveringstijd?
- Wat is het nadeel?

Tussen de “fabricage” van  $^{18}\text{F}$  en het toedienen aan de patiënt zit 5,5 uur.  
e. Bereken hoeveel procent van het oorspronkelijke fluor dan nog over is.

### 39 Activiteit en halveringstijd

De activiteit van een bron hangt af van de hoeveelheid radioactieve stof en de halveringstijd. De activiteit  $A(0)$  op tijdstip  $t = 0$  kan berekend worden uit het aantal instabiele kernen op  $t = 0$ :

$$A(0) = \frac{0.693}{t_{1/2}} \times N(0)$$

Hierin is  $N(0)$  het aantal atomen op tijdstip  $t = 0$  en  $t_{1/2}$  is de halveringstijd in seconden.

Aan een patiënt wordt  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  toegediend. Op tijdstip  $t = 0$  is het aantal atomen van deze isotoop  $5,0 \cdot 10^{11}$ .

a. Bereken de activiteit van  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  op  $t = 0$ .

Voor  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  is de halveringstijd 6,0 uur. Na het verval blijft er  $^{99}\text{Tc}$  in het lichaam achter. Een hoeveelheid  $^{99}\text{Tc}$  bevat op tijdstip  $t = 0$  ook  $5,0 \cdot 10^{11}$  atomen.

b. Bereken de activiteit van het  $^{99}\text{Tc}$  op tijdstip  $t = 0$ .

c. Leg uit of die hoeveelheid  $^{99}\text{Tc}$  erg schadelijk voor een patiënt is.

### 3 Ioniserende straling

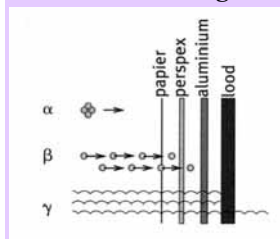
#### 3.1 Effecten van straling

Elke röntgenfoto of diagnose met gammastraling levert een zeker risico voor de patiënt. In dit hoofdstuk leer je stralingsdoses te berekenen en hoe men patiënt en ziekenhuispersoneel tegen te veel straling beschermt. Door straling kunnen positieve ionen ontstaan, dat geeft beschadigd DNA, afbraak van eiwitten en afbraak van membranen.

|                |                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------|
| Paragraafvraag | Hoe meet je de schade van ioniserende straling? |
|----------------|-------------------------------------------------|

#### Oriëntatieopgave – Schade door straling

De schade die in het lichaam ontstaat door alfa- bèta-, gamma- en röntgenstraling hangt van verschillende factoren af. Belangrijk zijn het ioniserend vermogen en het doordringend vermogen.



| soort straling  | ioniserend vermogen | doordringend vermogen |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| α-straling      | groot               | klein                 |
| β-straling      | matig               | matig                 |
| γ-straling      | klein               | groot                 |
| röntgenstraling | klein               | groot                 |

Figuur 3.1

a. Leg aan de hand van de bovenstaande tabel uit dat je niet direct kunt zeggen welk type straling het meest schadelijk is.

Bij het vaststellen van de stralingsbelasting maakt men onderscheid tussen **inwendige** en **uitwendige** stralingsbelasting. Bij inwendige stralingsbelasting bevindt de bron zich in het lichaam.

b. Welke twee typen straling zijn vrijwel alleen schadelijk bij inwendige stralingsbelasting? Leg uit waarom.

c. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen **bestraling** en **besmetting**. Leg uit waarom besmetting bij alle soorten straling een risico oplevert.

Bij het berekenen van de stralingsbelasting kijkt men naar de totale energie van de stralingsdeeltjes en naar de massa van het lichaam.

d. Waarom is de totale energie van de straling een maat voor de schade?

e. Waarom speelt ook de massa van het lichaam een rol? Leg uit dat de stralingsbelasting omgekeerd evenredig is met de massa.

#### Weegfactor

Een alfadeeltje is veel zwaarder dan een bètadeeltje. Als beide deeltjes evenveel energie hebben, dan is de snelheid van het alfadeeltje veel lager. Je kunt ook zeggen: als beide deeltjes een even grote snelheid hebben, is de energie van het alfadeeltje veel groter dan die van het bètadeeltje. Ter vergelijking: een auto met een snelheid van 80 km/h en een voetbal met een snelheid van 80 km/h.

f. Kun je je voorstellen dan een zwaar deeltje met een lage snelheid meer schade kan aanrichten dan een licht deeltje met een hoge snelheid?

Alfadeeltjes zijn 20× zo schadelijk als bètadeeltjes met dezelfde energie.

| soort straling  | weegfactor |
|-----------------|------------|
| α-straling      | 20         |
| β-straling      | 1          |
| γ-straling      | 1          |
| röntgenstraling | 1          |

Figuur 3.2

## Extra

Louis Harold Gray (1905-1965) Deze Brits natuurkundige onderzocht de effecten van straling op organismen. Een pionier op het gebied van de stralingsbiologie!

## Stralingsdosis

De schade die straling in het menselijk lichaam schade aanricht hangt af van de hoeveelheid stralingsenergie, de bestraalde massa, het soort straling en de kwetsbaarheid van het lichaamsdeel. De geabsorbeerde stralingsenergie en de massa bepalen samen de stralingsdosis of kortweg dosis.

De **stralingsdosis** is de hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram (eenheid dus joule per kg = J/kg). Deze eenheid van dosis wordt de **gray** (Gy) genoemd.

## Stralingsdosis

$$D = \frac{E}{m} = \frac{\text{geabsorbeerde energie}}{\text{bestraalde massa}}$$

**Symbolen:**  $E$  is de geabsorbeerde energie (in J),  $m$  is de bestraalde massa (in kg) en  $D$  is de dosis (in Gy).

**Geldigheid:** Altijd, het is een definitie

Ook de soort straling speelt een rol. Elke soort straling heeft een **stralingsweefactor**. Voor alfastraling is de weefactor 20, voor bèta-, gamma- en röntgenstraling straling is de weefactor 1. Je zag het eerder: alfastraling is het schadelijkst.

De **equivalente dosis** = geabsorbeerde dosis  $\times$  weefactor van de stralingssoort. De eenheid van equivalente dosis is nog steeds de J/kg, maar wordt nu de **sievert** (Sv) genoemd.

## Equivalente dosis

$$H = w_R \cdot D$$

**Symbolen:**  $D$  is de stralingsdosis (in Gy),  $w_R$  is de weefactor van de stralingssoort en  $H$  is de equivalente dosis (in Sv). Voor alfastraling is de weefactor 20, voor bèta-, gamma- en röntgenstraling straling is de weefactor 1.

**Geldigheid:** Altijd, het is een definitie

## Effecten van stralingsdosis op het menselijk lichaam

De tabel hieronder geeft de gevolgen als deze in korte tijd ontvangen wordt.

| Effecten van acute blootstelling over het gehele lichaam |                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dosis                                                    | Effect                                                                                                                                       |
| <0,05 Gy                                                 | Geen direct waarneembaar effect                                                                                                              |
| 0,15-0,25Gy                                              | Bij enkele mensen veranderingen in de bloedwaarden                                                                                           |
| 0,5 Gy                                                   | Vrijwel zeker veranderingen in de bloedwaarden                                                                                               |
| 1,0 Gy                                                   | Vaak acuut stralingssyndroom merkbaar (misselijkheid, overgeven)                                                                             |
| 1,5 Gy                                                   | Overgevoelige mensen gaan eraan dood                                                                                                         |
| 2 Gy                                                     | Ooglenzen begint troebel te worden                                                                                                           |
| 3,2-3,6 Gy                                               | De helft gaat dood binnen 30 dagen bij minimale medische verzorging                                                                          |
| 4 Gy                                                     | Permanente steriliteit bij bestraling van de geslachtsorganen                                                                                |
| 5,0 Gy                                                   | Haaruitval                                                                                                                                   |
| 4,8-5,4 Gy                                               | De helft gaat dood binnen 30 dagen bij normale medische verzorging                                                                           |
| 11 Gy                                                    | De helft gaat dood binnen 30 dagen, ook bij intensieve medische verzorging waaronder beenmergtransplantatie                                  |
| >20 Gy                                                   | Vrijwel zeker dood                                                                                                                           |
| >50 Gy                                                   | Centraal zenuwstelsel (hersenen, spieren) bestuurt lichaamsfuncties als ademen en bloedcirculatie niet meer. Zekere dood binnen enkele uren. |

Je ziet in de tabel dat er bij röntgen- en gammastraling onder 0,05 Gy (= 0,05 Sv = 50 mSv) geen direct waarneembaar effect is. Dit betekent niet dat een lage dosis straling ongevaarlijk is. Er bestaat altijd een zeer kleine kans op genetische veranderingen en kanker door straling.

Er gelden strenge regels voor de hoeveelheid toelaatbare straling op de werkvloer en in de leefomgeving. Voor mensen die niet beroepsmatig werken met ioniserende straling is de dosislimiet 1 mSv per jaar. Voor 'beroeps' is dat ongeveer 10 keer zo veel.

In Binas tabel 27G staat meer informatie over de dosislimieten.

### Hoe risicovol is medische diagnostiek?

Bij medisch onderzoek is er geen limiet voor de patiënt. Dat lijkt op het eerste gezicht misschien vreemd, maar dat is het niet. Het is aan de behandelende medicus om, in samenspraak met de patiënt, tot een bepaalde behandeling te besluiten. Uiteraard een enorme verantwoordelijkheid! Je spreekt hier over het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable).

De volgende gegevens geven een idee van de stralingsbelasting:

- Röntgenfoto van het gebit: 0,01 mSv
- Röntgenfoto van de longen: 0,1 mSv
- Nucleaire geneeskunde: gemiddeld 5 mSv
- CT-scan: 10 - 15 mSv

Het is zinnig deze waarden te vergelijken met andere risico's. De volgende tabel (gebaseerd op Amerikaans onderzoek) geeft het gemiddelde verlies van levensduurverwachting bij de vermelde situatie.

| Risicofactor                                               | Gemiddeld verlies van levensduurverwachting |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 20 sigaretten per dag                                      | 6 j                                         |
| 15% overgewicht                                            | 2 j                                         |
| Gemiddeld alcoholgebruik (US)                              | 1 j                                         |
| Ongelukken (voertuigen, thuis, verdrinking)                | 1 j                                         |
| Beroepsblootstelling straling: 10 mSv/j tijdens 18-65 jaar | 51 d                                        |
| Natuurrampen                                               | 7 d                                         |
| Medische bestralingen                                      | 6 d                                         |

### Bestraling en besmetting

Bij radioactieve stoffen worden twee begrippen duidelijk onderscheiden:

- **Blootgesteld worden aan straling:** je lichaam krijgt straling, maar je hebt de radioactieve stof niet aangeraakt. Dat is niet altijd gevaarlijk: een blokje uranium geeft wel alfastraling, maar deze dringt niet door je huid heen. Bèta- en gammastraling kan wel je lichaam binnendringen. Voor een goed begrip kun je deze straling vergelijken met zonnestraling. Als je uit de zon gaat, ben je de zonnestraling kwijt. Maar niet de gevolgen van eerder opgelopen straling!
- **Radioactieve besmetting:** je hebt contact met de radioactieve stof zelf. Dit is veel geniepiger, want je kan er ongemerkt jezelf en je omgeving mee vergiften. In je lichaam richt ook een alfastraler grote schade aan. Overigens loop je ook bij het roken een (kleine) radioactieve besmetting op; een kleine hoeveelheid polonium-210 of lood-214 komt uit de tabak in je longen terecht. De alfastraling uit deze stoffen kan in de longen gevaarlijke schade aanrichten en longkanker veroorzaken...

Met een geiger-müller telbuis is eenvoudige controle op radioactieve besmetting mogelijk. Dit apparaat geeft hoorbare tikken als er straling opgevangen wordt. Meer tikken, meer straling.



Figuur 3.3 Een Geiger-Müller telbuis



**EXTRA: Effectieve dosis (geen examenstof!)**

Bij medische beeldvorming is vaak precies bekend hoeveel straling wordt gebruikt en op welke plek in het lichaam die straling terecht komt. In die situatie kan ook rekening gehouden worden met de gevoeligheid van de verschillende organen. Elk type weefsel heeft een **weefselweegfactor**.

Belangrijke weefselweegfactoren staan in het onderstaande lijstje. Als een orgaan gevoeliger is voor straling, is de weegfactor groter. De som van de weefselweegfactoren van alle onderdelen van het lichaam is precies 1.

| Weefselweegfactor | Organen en weefsels                                                                                                                                                                            |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,20              | Testikels, eierstokken                                                                                                                                                                         |
| 0,12              | Rode beenmerg, dikke darm, longen, maag                                                                                                                                                        |
| 0,05              | Blaas, borst, lever, slokdarm, schildklier en de volgende weefsels/organen: nieren, bijnieren, hersenen, bovenste deel dikke darm, dunne darm, alvleesklier, milt, thymus, spieren, baarmoeder |
| 0,01              | Huid, botoppervlak                                                                                                                                                                             |

## Opgaven

**40 Begripstest**

Geef bij de onderstaande beweringen aan of de uitspraak klopt.

- |                                                                                            |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| a. Bij het berekenen van de stralingsdosis wordt geen rekening gehouden met de weegfactor. | ja / nee |
| b. De eenheid van stralingsdosis is gray.                                                  | ja / nee |
| c. De eenheid van de equivalente dosis is J/s.                                             | ja / nee |
| d. Een gammadeeltje richt evenveel schade aan als een röntgendeeltje.                      | ja / nee |
| e. Gammastraling is vooral gevaarlijk bij inwendige besmetting.                            | ja / nee |
| f. Bètastraling is vooral gevaarlijk bij uitwendige bestraling.                            | ja / nee |

**41 Geabsorbeerde stralingsenergie**

Voor iemand die met ioniserende straling werkt geldt een dosislimiet van 20 mSv per jaar. Een persoon van 75 kg wordt aan gammastraling blootgesteld, waardoor het gehele lichaam (vrijwel homogeen) wordt bestraald.

Bereken hoeveel energie die persoon in een jaar absorbeert als hij de equivalente dosis van 20 mSv oploopt.

**42 Straling uit kalium-40 (zie Binas tabel 25)**

Elk menselijk lichaam bevat een zekere hoeveelheid radioactief kalium-40. Stel de activiteit ervan  $4,8 \cdot 10^3$  Bq.

- Geef de vergelijking voor het bèta-verval van kalium-40.
- Bereken hoeveel energie (in joule) vrijkomt bij het verval van een kalium-40 kern ( $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ ).
- Waarom mag je aannemen dat de activiteit van  $^{40}\text{K}$  in een jaar praktisch constant blijft?

Dit kaliumisotoop is vooral aanwezig in spierweefsel. Neem voor de massa van het spierweefsel 30 kg. Neem aan dat alle energie uit het verval door het spierweefsel zelf wordt geabsorbeerd.

- Bereken de stralingsdosis die in een jaar door dit verval in het spierweefsel terecht komt.



### 43 Alfa-straling

In een kerncentrale wordt een werknemer blootgesteld aan  $\alpha$ -straling. Het lichaam absorbeert hierbij 0,15 J stralingsenergie. De werknemer heeft een massa van 70 kg. Hoe groot is het ontvangen equivalente dosis?

### 44 Radongas in buitenlucht

De radioactieve radonisotoop Rn-222 wordt in de aardkorst gevormd door het verval van andere radioactieve isotopen. Daardoor bevat de buitenlucht, en dus ook de longen van de mens, een kleine hoeveelheid radioactief radongas. Dit radongas geeft bij het radioactief verval in de longen een stralingsvermogen van  $5,3 \cdot 10^{-14}$  W af.

- Geef de vergelijking van het verval van Rn-222.
- Bereken hoeveel energie (in joule) vrijkomt bij het verval van een radon-222 kern ( $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ ).
- Bereken de activiteit van het radongas in de longen.  
De bestraalde massa van de longen is 0,15 kg.
- Bereken het equivalente dosis dat iemand per jaar in zijn of haar longen ontvangt door het radioactief verval van de radonisotoop Rn-222.
- Volgens figuur 3.2 zorgt radongas voor 32% van de gemiddelde jaarlijkse blootstelling van 2,5 mSv. Dat is veel meer dan het in vraag d. berekende equivalente dosis. Geef een verklaring voor het verschil.

### 45 Longfoto

Bij onderzoek naar de longen wordt een röntgenfoto gemaakt. De longen lopen hierbij een dosis op van 0,10 mGy. De energie van de röntgenfotonen is 0,10 MeV. De bestraalde massa is 4,0 kg.

- Bereken de geabsorbeerde stralingsenergie.
- Bereken de energie in joule van één röntgenfoton ( $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).
- Bereken hoeveel fotonen bij deze foto worden geabsorbeerd.

### 3 Ioniserende straling

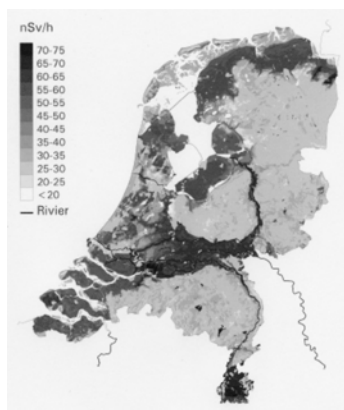
#### 3.2 Achtergrondstraling en bescherming

Volledige bescherming tegen straling is niet mogelijk. Er is altijd straling, afkomstig uit het heelal (kosmische straling) en van allerlei radioactieve stoffen. Deze bevinden zich in geringe hoeveelheid in de grond, in de atmosfeer, in bouwmaterialen en... in je lichaam. Deze onvermijdelijke straling noemt men **achtergrondstraling**.

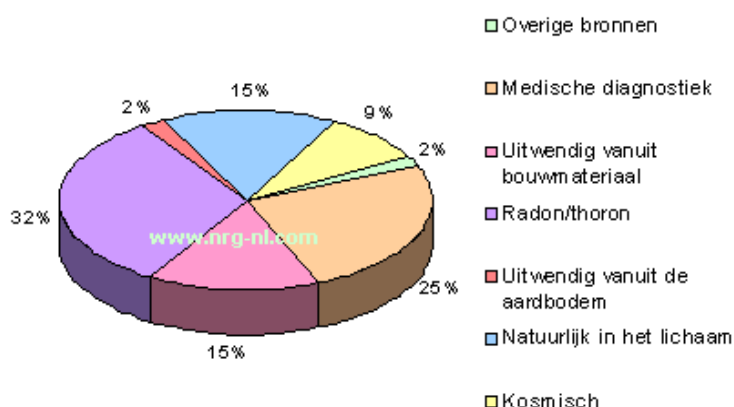
|                 |                                                                                              |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paragraafvragen | Welke stralingsbronnen zijn in de natuur aanwezig?<br>Hoe bescherm je jezelf tegen straling? |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|

In Nederland is de jaarlijkse achtergrondstraling zo'n 2,5 mSv. Die waarde varieert per plaats enorm: in New York is zij 1,4 mSv per jaar, in Poco de Caldas (Brazilië) maar liefst 70 mSv per jaar. Je lichaam is ook een beetje radioactief, vooral door kalium-40 en koolstof-14.

In de onderstaande grafiek is te zien welke bijdrage elke bron levert aan de gemiddelde jaarlijkse blootstelling van 2,5 mSv.



Figuur 3.4 Natuurlijke radioactiviteit in de bodem (bron: RIVM)



Figuur 3.5: Verdeling van de dosisbelasting vanuit diverse bronnen. In Nederland is de gemiddelde blootstelling circa 2,5 milliSievert per jaar.

#### Oriëntatieopgave – Waar komt de straling vandaan?

De blootstelling aan natuurlijke straling varieert over het aardoppervlak. In Nederland is zowel de straling uit de bodem als de straling uit de lucht (vooral radongas) lager dan in andere landen.

a. In figuur 3.4 is te zien dat de natuurlijke radioactiviteit in de bodem in Nederland niet overal even hoog is. Wat is de oorzaak van de verhoogde radioactiviteit in sommige delen van Nederland?

De concentratie radongas in de lucht is in Nederland relatief laag. Alle instabiele isotopen van radon hebben een korte halveringstijd.

b. Zoek uit hoe radon in de lucht ontstaat (lees de tekst over radongas) en verklaar daarmee waardoor de concentratie in Nederland vrij laag is.

c. Radon is een edelgas dat met geen enkele andere stof reageert. Toch levert het inademen van hoge concentraties radon een behoorlijk risico op. Leg uit waardoor dit veroorzaakt wordt.

### Koolstofdatering

In de lucht is in geringe concentraties koolstof-14 aanwezig, met een halveringstijd van 5730 jaar. Lees de tekst over C14-datering.

d. Zoek uit hoe koolstof-14 in de lucht ontstaat.

Koolstof-14 wordt gebruikt om de ouderdom van organisch materiaal zoals botten en plantenresten te bepalen.

e. Beschrijf hoe koolstof-14 in dit materiaal terecht is gekomen.

f. Beschrijf hoe de koolstofdateringsmethode werkt.

### Medische diagnostiek en achtergrondstraling

De risico's die toepassing van straling bij de medische diagnostiek opleveren moeten worden afgezet tegen de stralingsbelasting door natuurlijke bronnen. Op het aardoppervlak staan we bloot aan straling uit diverse bronnen:

- Straling uit de ruimte, de kosmische straling
- Straling uit de bodem, uit radioactieve bestanddelen in de grond
- Straling van radioactieve gasen uit de grond zoals radongas, een natuurlijk radioactief gas (inwendige belasting door inademing)
- Straling uit bouwstoffen, die weer gemaakt zijn van grondstoffen uit de bodem
- Straling van menselijke activiteiten, waarbij medische handelingen een aanzienlijke bijdrage leveren

### Radongas (bron: NRG Petten)

Radon is het zwaarste edelgas. Radon wordt in de aardkorst voortdurend geproduceerd door het verval van de langlevende isotopen van thorium en uranium die daar van nature voorkomen. Het zit in Nederland bijvoorbeeld in klei- en zandgrond, gesteenten etc. en dus ook in bouw materiaal dat hieruit gemaakt wordt. In eerste instantie hoopt het gas zich op in grondwater om uiteindelijk in de atmosfeer terecht te komen. Daardoor komt radon in lage concentraties in de lucht voor.

Het inademen van radon brengt geen risico's met zich mee. Radon is echter radioactief; het valt uiteen in andere (radioactieve) stoffen. Die stoffen hechten zich aan rondzwevende stofdeeltjes, die weer worden ingeademd. Als deze stofdeeltjes zich op longweefsel vastzetten, kan dit weefsel door de afgegeven straling worden beschadigd.

In woningen (vooral in kruipruimtes) kan radon zich in de lucht ophopen, waardoor de concentratie hier hoger is dan buiten. Door goed te ventileren daalt de radonconcentratie. Nederland heeft in Europa de laagste radonconcentratie in woningen: 23 Bq/m<sup>3</sup>.

### Koolstofdatering (bron: Wikipedia)

C14-datering is een methode om de ouderdom van organisch materiaal te bepalen. Koolstof-14 is een isotoop van koolstof die in onze atmosfeer uit stikstofkernen gevormd wordt. De methode is bruikbaar voor materialen tot circa 60.000 jaar oud.

Planten nemen deze licht radioactieve vorm van koolstof op. Hierdoor krijgen dieren die van die planten leven de isotoop binnen. Alle levende wezens hebben in hun lichaam dus nagenoeg dezelfde verhouding tussen koolstof-14 en koolstof-12. Koolstof-14 heeft een halveringstijd van 5730 jaar, ongeacht wat er chemisch met het materiaal gebeurt.

Het zou al lang van de aarde verdwenen zijn als er niet een continue aanvoer van nieuwe C14-atomen is als gevolg van de kosmische straling die stikstof uit de atmosfeer omzet in de koolstofisotoop.

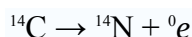
Zodra een organisme sterft houdt de uitwisseling van koolstofbevattende verbindingen op, en neemt het gehalte aan C-14 dus af.



Figuur 3.6 Radongas komt uit gesteente en grondwater in de woning. Bron: Natural Resources Canada



Figuur 3.7 De ijsmummie Ötzi werd in 1991 in de Tirolse Alpen gevonden. De ouderdom werd bepaald met C14-datering. bron: www.pbs.org



Materiaal dat erg oud is (bijvoorbeeld steenkool), zal vrijwel geen C-14 meer bevatten. Met behulp van massaspectrometrie kunnen de relatieve gehalten aan verschillende isotopen nauwkeurig worden bepaald.

### Bescherming tegen straling

Beveiliging tegen straling kan op drie manieren:

- Beperk de tijd dat je aan straling blootgesteld wordt.
- Houd de stralingsbron zo ver mogelijk op afstand. Belangrijk, want twee keer zo grote afstand betekent vier keer zo lage intensiteit.
- Scherm je af van de stralingsbron, bijvoorbeeld door een laagje lood of een betonnen muurtje.

Radiologisch personeel beschermt zich tegen straling door achter een muur te staan, een loden schort te dragen of de apparatuur vanuit een andere kamer te besturen.

Röntgenstraling met lage frequentie ('zachte' röntgenstraling) wordt door het lichaam sterk geabsorbeerd. Voor de röntgenfoto en CT-scan is zachte röntgenstraling niet goed: hij leidt tot een hoge stralingsdosis en geeft slechte beeldvorming. Bij veel röntgenapparaten filtert een filter de zachte straling eruit.

Bij mensen die werken met radioactieve materialen meet een dosimeter in de vorm van een **badge** de dosis die in een bepaalde tijd is opgelopen. Hiervan zijn verschillende uitvoeringen. In de klassieke badge zit een speciale fotofilm, gevoelig voor röntgen- of gammastraling. Bij meer straling op de film wordt deze zwarter.

Een andere uitvoering is de TLD-badge (= Thermo-Luminescentie-dosimeter). Deze badges worden om de vier weken naar een speciaal laboratorium gestuurd, waar ze worden uitgelezen. Dit gebeurt door de TLD's te verwarmen (thermo), waarna licht vrijkomt (luminescentie). Die hoeveelheid licht is een maat voor de opgevangen stralingsdosis. Tegenwoordig maakt men ook veel gebruik van een elektronische dosimeter.

### Tekstvragen

- Wat is achtergrondstraling?
- Op welke manieren kan je je beschermen tegen straling?
- Wat is halveringsdikte?
- Waarvoor dient een badge?

### Practicum - Ioniserende straling om je heen

Met een geiger-müllerteller ('GM-meter') wordt de ioniserende straling op diverse plaatsen gemeten. De meter registreert ionisaties als korte onregelmatige tikken. Houd plaatjes lood gereed. Meet indien mogelijk:

- op het schoolplein
  - in een gewoon lokaal
  - in de kelder of een kruipruimte
  - in het scheikundelokaal
  - in het scheikundepracticum
  - in de chemicaliënopslagruimte
  - vlak voor een potje natriumchloride
  - vlak voor een potje kaliumchloride.
- o Probeer bij een flinke activiteit met de loden plaatjes te ontdekken waar de straling vandaan komt.
- o Zoek op internet en/of in Binas op van welke soort straling en van welke stof sprake is.

## Begrippen

Blootstelling aan straling  
Radioactieve besmetting  
Stralingsdosis  
Gray  
Weegfactor  
Equivalente dosis  
Sievert  
Effectieve totale lichaamsdosis  
Achtergrondstraling  
Badge

## Samenvatting

- **Blootstelling aan straling** is niet hetzelfde als **radioactieve besmetting**: als je straling ontvangt, ben je nog niet besmet (= in aanraking met de radioactieve stof).
- **Stralingsdosis** is de geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram bestraalde massa. Eenheid is de gray (Gy) = J/kg
- **Equivalente dosis** = **dosis** × **weegfactor** van de soort straling.
- Bij de **effectieve totale lichaamsdosis** houd je ook rekening met de **weegfactor** van het bestraalde lichaamsdeel. Deze laatste twee doses hebben ook de eenheid J/kg, die noem je nu sievert (Sv).
- Bij medische beeldvorming varieert de dosis van 0,01 Sv tot zo'n 15 mSv.
- De gemiddelde gezondheidsrisico's bij medische beeldvorming zijn laag vergeleken met andere risico's.
- Er is altijd ioniserende straling, **achtergrondstraling**: uit het heelal, uit de grond en uit de atmosfeer.. Een belangrijke bron is radongas.
- Beveiliging tegen straling: zo kort mogelijk aan de straling blootstaan, zo ver mogelijk van de stralingsbron blijven en afscherming van de stralingsbron.

## Opgaven

### 46 Achtergrondstraling

In Nederland krijg je gemiddeld 2,5 mSv per jaar door achtergrondstraling. De vuistregel is dat bij één röntgenfoto een equivalente dosis hoort die gelijk is aan 10 dagen achtergrondstraling.

Bereken het equivalente dosis van de röntgenfoto.

### 47 Halveringsdikte

Een laag beton van 33 cm is voldoende om 87,5% van de gammastraling van kobalt-60 tegen te houden.

- a. Bereken de halveringsdikte van het beton voor deze straling.
- b. Zoek in Binas de energie van dit gammafoton op.

### 48 Stralingsbescherming

Bij het maken van röntgenfoto's beschermen de medewerkers zich met een kledingstuk waarin lood is verwerkt, het zogenaamde loodschort. De dikte van de laag lood is 0,55 mm. De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt heeft een energie van 0,10 MeV.

- a. Bereken hoeveel procent van de straling door het loodschort wordt tegengehouden.

Een medewerker wordt tijdens zijn werk per ongeluk gedurende 25 seconden blootgesteld aan deze straling. Het vermogen van de röntgenstraling is 0,15 microwatt. Van deze straling wordt 73% geabsorbeerd door een spiermassa van 12 kg.

- b. Bereken de stralingsdosis die de spiermassa ontvangt.



**Figuur 3.8** De ijsmummie Ötzi werd in 1991 in de Tiroolse Alpen gevonden. De ouderdom werd bepaald met C14-datering. bron: www.pbs.org

#### 49 Koolstofdatering

Op 19 september 1991 werd in de Tiroolse Alpen een ijsmummie gevonden door Duitse toeristen. Het ging om een neolithische man (ca 45 jaar) die de naam Ötzi kreeg. Uit een koolstof-14 datering bleek dat de mummie stamt uit 3150 v.C.

- Bereken hoeveel halveringstijden van C-14 zijn verstreken sinds het overlijden van Ötzi.
- Bereken hoeveel procent van het oorspronkelijke C-14 in zijn lichaam vervallen is.

#### 50 Natuurlijke radioactiviteit

Via voedsel en ademhaling komen met name de volgende radioactieve isotopen in het lichaam terecht: C-14, K-40, Ra-226 en Rn-222.

- Ga na of deze isotopen  $\alpha$ -,  $\beta$ - of  $\gamma$ -stralers zijn en noteer de halveringstijd.
- Welke van deze isotopen zijn in het lichaam het gevaarlijkst? Leg uit waarom.

#### 51 Kerncentrale

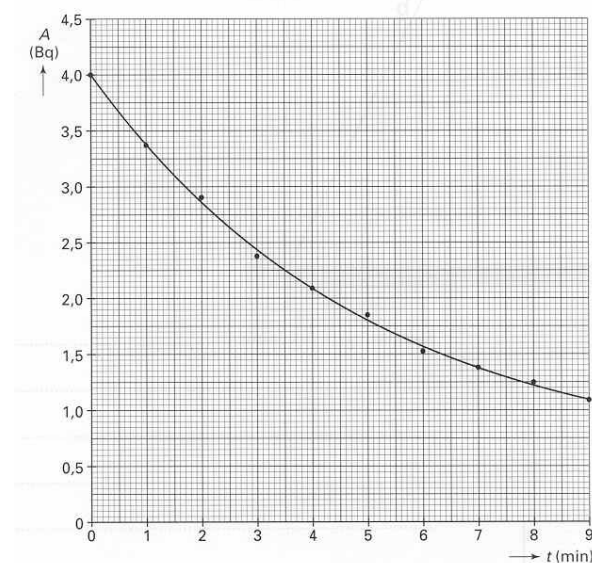
In het stalen reactorvat van een oude kerncentrale wordt kobalt-60 aangetroffen. Deze stof is ontstaan door de bestraling van het staal in de reactorwanden met neutronen. Kobalt-60 is radioactief.

Het reactorvat moet na het sluiten van de kerncentrale nog veertig jaar bewaard blijven om ervoor te zorgen dat hoeveelheid kobalt-60 tenminste met een factor 250 is afgenomen is.

Ga met een berekening na of na veertig jaar de hoeveelheid kobalt in die mate is afgenomen.

#### 52 Achtergrondstraling

Ineke wil met een GM-teller de halveringstijd van een bepaalde stof meten. Elke minuut bepaalt zij de activiteit. Van de gemeten waarden maakt zij een grafiek. Zie figuur.



Daarna haalt zij de radioactieve stof weg en meet zij de activiteit van de achtergrondstraling. Zij vindt een gemiddelde waarde van 0,50 Bq.

Bepaal, met behulp van de metingen van Ineke, de halveringstijd van de radioactieve stof. Gebruik daarbij de figuur.



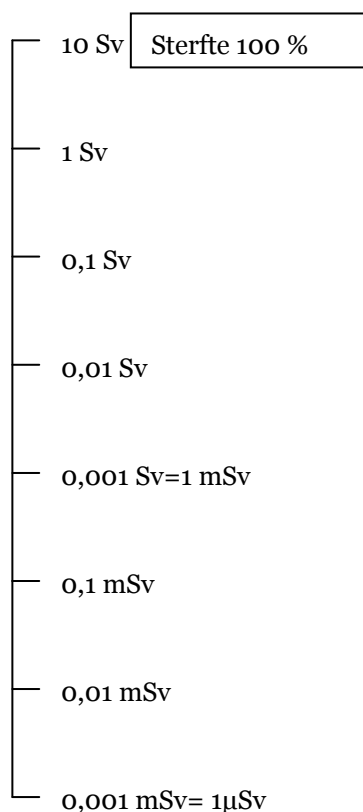
### 53 Stralingsafscherming

Een radioactieve bron zendt  $\alpha$ -,  $\beta$ - of  $\gamma$ -straling uit, of een combinatie van deze soorten straling. Welke soorten kernstraling een bron uitzendt, is na te gaan door te kijken naar de absorptie van de uitgezonden straling door verschillende materialen. Papier laat geen  $\alpha$ -straling door, een dik plaatje aluminium geen  $\beta$ -straling en een dikke plaat lood vrijwel geen  $\gamma$ -straling.

|      | Intensiteit (aantal deeltjes/m <sup>2</sup> ) bij afscherming door: |        |           |      |
|------|---------------------------------------------------------------------|--------|-----------|------|
| bron | niets                                                               | papier | aluminium | lood |
| A    | 1500                                                                | 400    | 390       | 350  |
| B    | 3600                                                                | 3580   | 1769      | 3    |
| C    | 860                                                                 | 851    | 439       | 163  |
| D    | 591                                                                 | 3      | 4         | 2    |

De afschermingsplaatjes van aluminium en lood zijn beide vrij dun. Het aluminiumplaatje laat daardoor ongeveer de helft van de invallende  $\beta$ -straling door. Het even dikke loodplaatje laat geen  $\beta$ -straling door, maar wél een groot deel van de invallende  $\gamma$ -straling.

- Leg uit dat bron D alleen alfa-straling uitzendt.
- Beredeneer welke soorten kernstraling de drie andere radioactieve bronnen uitzenden.



#### Reflectieopdracht - Wat mag, wat niet?

In figuur 3.9 zie je een schaal waarop stralingsdoses worden weergegeven. De schaal is logaritmisch. Dat wil zeggen dat de afstand tussen 1 en 0,1 op de schaal even groot is als de afstand tussen 0,1 en 0,01.

Zoek op (mogelijke zoektermen op internet 'sievert' en/of 'dosis') hoeveel straling iemand oploopt in de volgende situaties. Neem de schaalverdeling over en schijf de letter van elke situatie op de juiste hoogte erbij.

- Een röntgenfoto van je gebit laten maken.
- Een CT-scan van je hele lichaam laten maken.
- Een röntgenfoto van je longen laten maken.
- Een jaar niets bijzonders doen in Nederland.
- Een jaar niets bijzonders doen in een hooggelegen gebied in Brazilië.
- Een jaar lang vlieguren maken als stewardess.
- Een jaar rondlopen in de buurt van Tsjernobyl, waar in 1986 een kernreactor smolt en ontplofte.
- De thee opdrinken waarmee Aleksander Litvinenko is vermoord (ga er van uit dat de stoffen een maand in het lichaam blijven)

Leg ten slotte in zo'n 10 regels uit wat de verhouding tussen de gevaren van straling volgens jou is. Voorbeelden: hoe bang moet je voor een röntgenfoto, mag een röntgenlaborant zonder bescherming bij alle foto's staan en moeten zwangere stewardessen voorzichtig zijn met de aantallen vluchten?

Figuur 3.9

## 4 Overige beeldtechnieken

### 4.1 Echografie

Een van de andere technieken waarmee beelden van het inwendige lichaam gemaakt worden is de echografie. De meest bekende toepassing is de echo bij zwangere vrouwen.

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| Hoofdstukvraag | Hoe werkt echografie? |
|----------------|-----------------------|

#### Oriëntatieopgave - Auto's en baby's

Een parkeersensor in een auto waarschuwt als de achterkant van de auto te dicht bij een voorwerp komt. De sensor zendt geluidsgolven uit met een frequentie van 40 000 Hz. De weerkaatste golven worden opgevangen. Uit het tijdsverschil tussen de uitgezonden en de weerkaatste golf wordt de afstand berekend. De golflengte is bij deze frequentie ongeveer 1 centimeter. De sensor neemt objecten kleiner dan 1 centimeter niet waar.

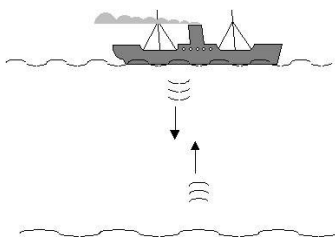
Van een website over parkeersensoren:

*Iets heel duns zoals afzetting van ijzerdraad of hekwerk geeft geen goede weerkaatsing. Bovendien geeft rond draad geen mooie weerkaatsing in één richting, maar naar alle kanten. Alles buiten zijn in een kegelvorm uitgestraalde geluidsbundel ziet de parkeersensor ook niet.*

- Leg uit of, vergeleken met de parkeermeter, men bij het onderzoek met echo van een foetus geluid met grotere of kleinere golflengte gebruikt.
- Leg met een schets uit hoe het komt dat een rond voorwerp naar alle kanten weerkaatst.
- Welke ronde voorwerpen in je lichaam weerkaatsen ook naar alle kanten?



Figuur 4.1



Figuur 4.2

#### Tekstvragen

- Leg uit wat er in figuur 4.2 uitgebeeld wordt.

#### Echoscopie en frequentie

Ook met echografie kijk je in het menselijk lichaam. Met teruggekaatste **ultrasone geluidsgolven** (onhoorbaar geluid met hoge frequentie) brengt men het beeld van een bepaald lichaamsdeel op een beeldscherm.

In figuur 4.1 zie je hoe men echografie bij zwangerschapscontrole uitvoert. Een gecombineerde zender en ontvanger van geluid wordt op de buik van de vrouw geplaatst. Op het beeldscherm ziet de arts een doorsnede van de baarmoeder en kan zo nagaan hoe de foetus zich ontwikkelt.

De transducer is een essentieel onderdeel van het echografieapparaat. De transducer zendt de geluidsgolven uit en vangt ze ook weer op, werkt dus als geluidsbron en als microfoon.

De transducer geeft een zeer korte geluidspuls en werkt direct daarna als ontvanger om de echo op te vangen. Het terugontvangen signaal wordt naar een computer gestuurd die uit het tijdsverschil tussen uitzending en ontvangst van het geluid de 'diepte' van het grensvlak berekent.

Uiteindelijk wordt alle ontvangen informatie een beeld van een dwarsdoorsnede van het lichaam geconstrueerd.





*Figuur 4.3 Een apparaat voor echoscopie. Ervoor zie je verschillende typen transducers*

### Extra

Geluid met hoge frequentie wordt sterk gedempt en dringt dus minder ver in het lichaam door. Dit is geschikt voor een ondiepe scan. Als men diep in het lichaam wil kijken zijn juist de lagere frequenties geschikt.

### Geluidssnelheid in het lichaam

Bij echografie gebruikt men dus ultrageluid, geluid met een zeer hoge frequentie (2,5 tot 10 megahertz) dat voor ons niet hoorbaar is.

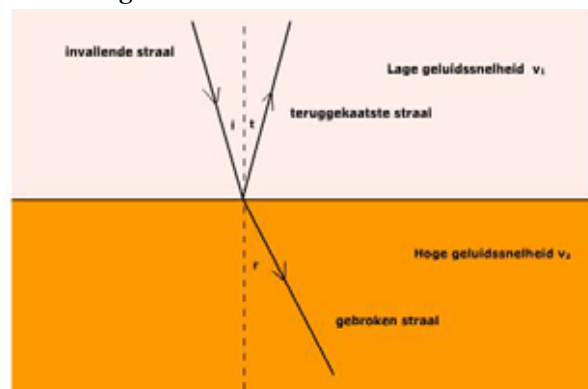
De **geluidssnelheden** verschillen in de diverse organen. Hoe groter de dichtheid en hoe steviger het weefsel, hoe hoger de geluidssnelheid.

In de longen, die veel lucht bevatten, is geluidssnelheid laag terwijl die in tanden en botten juist hoog is. De geluidssnelheden in 'natte' organen (hersenen, nieren, lever, spieren) liggen vrij dicht bij die van water. Ze verschillen vaak voldoende om de gewenste terugkaatsing te geven.

| Medium           | Geluidssnelheid in km/s |
|------------------|-------------------------|
| Lucht            | 0,34                    |
| Water (ca 37 oC) | 1,50                    |
| Longen           | 0,85                    |
| Vetweefsel       | 1,45                    |
| Lever            | 1,54                    |
| Nierweefsel      | 1,56                    |
| Spier            | 1,59                    |
| Botweefsel       | 4,0                     |

### Terugkaatsing en breking

Als geluidsgolven het grensvlak tussen twee weefsels treffen, kaatst een deel terug, de rest gaat verder. Op een volgend grensvlak is er weer terugkaatsing en breking enzovoort.



*Figuur 4.4 Geluidsstralen breken en kaatsen terug als ze het grensvlak tussen twee verschillende organen treffen. Terugkaatsing en breking gaat hetzelfde als bij licht.*

Hierbij gelden dezelfde twee wetten als bij licht:

1. Bij **terugkaatsing** geldt: hoek van inval = hoek van terugkaatsing

$$\angle i = \angle r$$

2. Bij **breking** van golven die van een medium met een lagere geluidssnelheid naar een medium met een hogere geluidssnelheid gaan geldt dat de hoek van breking groter is dan de hoek van inval. Er wordt dan van de normaal af gebroken:

$$\angle r > \angle i$$

Hiervoor kan ook een formule afgeleid worden die de wet van Snellius heet:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

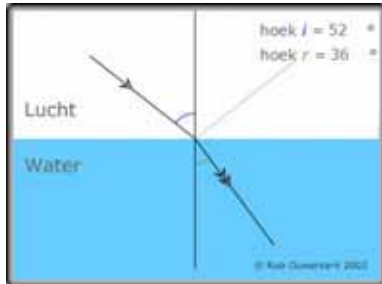
Hierin zijn  $v_1$  en  $v_2$  de geluidssnelheden in de twee media.

Op elk grensvlak treedt terugkaatsing op. Ook bij een hoek van inval van 0 graden, kaatst een deel terug en een deel gaat (recht)door.

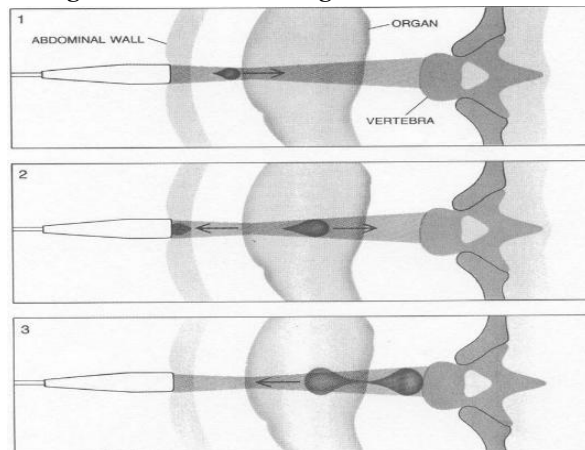
## Extra

Op de onderstaande website staat meer uitleg over de begrippen breking en grenshoek, via een applet.

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=73>

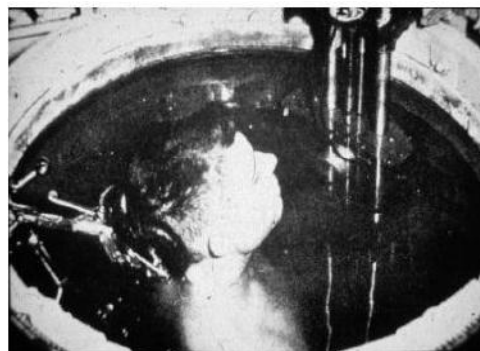


Hoe groter de verschillen in geluidssnelheden, hoe sterker de terugkaatsing. Echografie is dan ook niet geschikt voor botten en longen.



*Figuur 4.5 Principe van echografie. 1. Een geluidspuls nadert de voorkant van een orgaan. 2. Het geluid kaatst voor een deel terug en gaat voor een deel door. 3. aan de achterkant van het orgaan kaatst weer een deel van het geluid terug.*

De teruggekaatste golven worden opgevangen en omgezet in elektrische signalen. De computer bewerkt deze tot het beeld op een beeldscherm. Omdat lucht storend werkt op echografie krijgt de patiënt een laagje gel op het lichaamsdeel waar contact met de zender/ontvanger (de transducer) is.



*Figuur 4.6 De eerste experimenten met echografie in 1956. De patiënt moest plaatsnemen in een soort badkuip om lucht buiten te sluiten. Er werd een opname van de dwarsdoorsnede van de hals gemaakt. Het resultaat zie je in de foto rechts. Vaak waren de opnamen zo onduidelijk dat alleen speciaal opgeleide artsen er wijs uit konden.*

Medische toepassingen van echografie: zwangerschapsonderzoek, onderzoek naar hart en bloedvaten, opsporen van tumoren in de lever en in de prostaat en steeds meer gebruik bij spoedeisende hulp om snel diagnoses te stellen.

### Voordelen van echografie

Het grote voordeel van toepassing van ultrageluid is dat er geen gebruik wordt gemaakt van ioniserende straling (röntgenstraling en radioactiviteit). Voor zover bekend heeft echografie geen schadelijke bijwerkingen, maar het is altijd beter het niet méér toe te passen dan nodig is.

Echografie is zeer geschikt om weke delen van het lichaam zichtbaar te maken, iets wat met röntgenstralen minder goed gaat.

In tegenstelling tot bijvoorbeeld een MRI-scan (§5.2) is echografie niet duur. Echografie werkt snel, je kan ermee ca 25 beelden per seconde produceren. Dit maakt echografie ook zeer geschikt op de afdeling spoedeisende hulp.

De apparatuur is klein en dus makkelijk naar de patiënt toe te brengen.

## Tekstvragen

- Wat doet een transducer?
- Wat zijn de voordelen van echografie?
- Welke nadelen zijn er?

## Nadelen

Longen en botten zijn met ultrageluid niet te onderzoeken. Het geluid kaatst op deze lichaamsdelen praktisch geheel terug, door een te lage geluidssnelheid (longen) of een te hoge (botten). Echografiebeelden niet altijd duidelijk. Voor het lezen van een echogram heb je dan ook goed opgeleide mensen nodig.

## Echografie van bewegende lichaamsdelen

Voor een goed begrip van echografie is een onderscheid in twee situaties nodig: echografie van (vrijwel) niet bewegende lichaamsdelen en echografie van sterk bewegende lichaamsdelen, denk hierbij bijvoorbeeld aan bloed.



*Figuur 4.7 De auto rijdt naar het radarapparaat toe. Daardoor vangt de auto een hogere frequentie op en kaatst die nog eens verhoogd weer terug.*

Een bekend verschijnsel op de cartbaan en bij een ambulance: een voertuig dat op je afkomt, geeft je een hogere toon dan een voertuig dat van je weg rijdt. Je noemt dit het **dopplereffect**.

Het dopplereffect wordt, in combinatie met terugkaatsing, ook gebruikt om snelheden te meten zoals bij de radarcontrole. Een zender zendt radargolven uit die terugkaatsen op de rijdende auto. De teruggekaatste golven worden opgevangen door een antenne. De frequentie van de teruggekaatste golven is anders dan die van de uitgezonden golven. Die frequentieverandering is het dopplereffect. Hoe groter de snelheid van de auto, hoe groter die frequentieverandering. De frequentieverandering is dus een maat voor de snelheid van de auto.

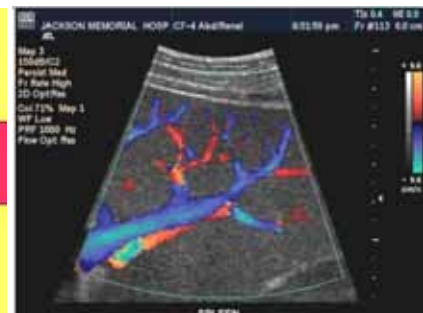
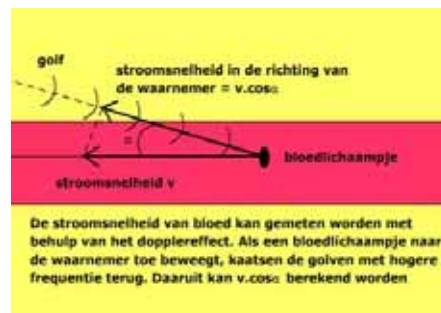
Toepassing in de echografie: men meet het verschil tussen de uitgezonden frequentie en de door de bloedlichaampjes teruggekaatste frequentie.



*Figuur 4.8*

## Extra

Bij het in beeld brengen van bloedvaten spuit men soms een contraststof in die bestaat uit microscopisch kleine belletjes lucht, opgesloten in eiwit. Die belletjes zijn ongevaarlijk en stromen met het bloed mee en de terugkaatsing van geluid op die luchtbelletjes is zeer sterk zodat die bloedvaten duidelijk in beeld komen.



*Figuur 4.9 Principe van Dopplermetingen in bloedvaten.*

*Figuur 4.10 Doppler-echo van de milt. Op het beeldscherm is de loop van bloedvaten goed te zien. De computer heeft kleuren aangebracht, waaruit de stroomsnelheid van het bloed is af te lezen. Blauw is naar de waarnemer toe en rood is van de waarnemer af.*

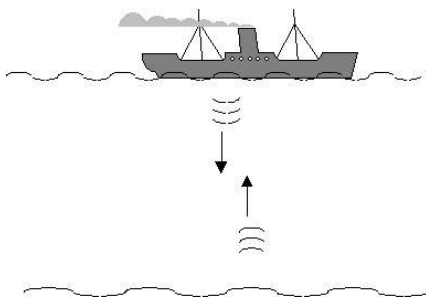
## Begrippen

Ultrasone geluidsgolven  
Geluidssnelheid  
Terugkaatsing  
Breking  
Grenshoek  
Totale terugkaatsing

## Samenvatting

- Bij echografie wordt ultrageluid met zeer hoge frequentie gebruikt.
- **Ultrageluid** kaatst gedeeltelijk terug op grensvlakken tussen twee weefsels met verschillende dichtheid en dus verschillende **geluidssnelheden**. Uit de gemeten tijd tussen uitgezonden en teruggekaatst geluid wordt de diepte berekend en zo een beeld van organen gevormd.
- Voordelen echografie: er wordt geen gevaarlijke straling gebruikt, is goedkoop, werkt snel en de apparatuur is gemakkelijk te vervoeren.
- Nadelen: niet geschikt om in longen en botten te kijken, het beeld is niet altijd gemakkelijk te interpreteren.

## Opgaven



Figuur 4.11

### 54 Varen, varen

- a. Wat heeft figuur 4.11 met medische beeldvorming te maken?  
Het schip vaart in zeewater heeft een temperatuur van  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De geluidspuls wordt 33 ms na uitzending weer opgevangen.
- b. Bereken de diepte van het water op die plek.
- c. Verderop is het water 45 m diep. Bereken hoeveel seconden na uitzending de geluidspuls daar terug is.

### 55 Ultrageluid

- a. Zoek op tussen welke grenzen de frequentie van hoorbaar geluid zit.  
De geluidsterkte (intensiteit) van het ultrageluid dat bij echografie wordt gebruikt is heel hoog en kan oplopen tot  $3 \cdot 10^4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .
- b. Zoek op met hoeveel decibel dit geluid overeenkomt.
- c. Waarom gebruikt men zo'n grote intensiteit?
- d. Welk negatief effect zou hoorbaar geluid hebben?  
Van een geluid is de golflengte 1,5 mm. De gemiddelde geluidssnelheid in het menselijk lichaam is 1,54 km/s.
- e. Bereken de frequentie van dit geluid.
- f. Bereken de trillingstijd.

### 56 Resolutie

Geluidsgolven kaatsen goed terug op voorwerpen die groter zijn dan de golflengte van het geluid. Daardoor zijn objecten die kleiner zijn dan de golflengte in het echogram niet zichtbaar.

De geluidssnelheid is 1540 m/s

- a. Bereken de afmeting van de kleinste details die op het echogram nog net zichtbaar zijn als de frequentie van het ultrageluid 2,5 MHz is.
- b. Idem als de frequentie 10 MHz is.
- c. Met welk van de twee soorten geluid kun je de kleinste details zien?
- d. Wat is het nadeel van erg hoog frequent geluid?

### 57 Pulsfrequentie

- a. Wat is het nadeel als bij echografie de geluidspulsen elkaar te snel opvolgen?

Voor een echogram wordt geluid gebruikt met een frequentie van 3,00 MHz. Elke puls bevat vier hele geluidstrillingen.

- b. Bereken hoe lang het uitzenden van zo'n puls duurt.

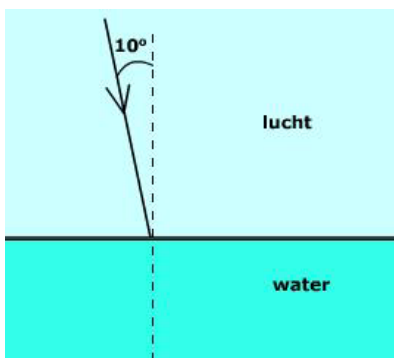
Men wil echo's opvangen van 25 cm diepte in het lichaam. De geluidssnelheid in het lichaam is gemiddeld 1,54 km/s.

- c. Bereken hoe lang de geluidspuls in het lichaam onderweg is.

De echografie werkt alleen goed als een nieuwe puls pas wordt uitgezonden als de vorige puls geheel is terugontvangen.

- d. Op tijdstip  $t = 0$  zendt de transducer het begin van een puls uit. Bereken op welk tijdstip de puls geheel terugontvangen wordt.

- e. Bereken de maximale puls-frequentie die in deze situatie mogelijk is.



Figuur 4.12

### 58 Breking van lucht naar water

Zie figuur 4.12. Geluidsgolven gaan van lucht naar water. De invallende geluidsstraal is getekend. De temperatuur is 20 °C.

- a. Bereken de brekingsindex voor de overgang van lucht naar water.

- b. Bereken de hoek van breking.

- c. Neem figuur 4.14 over en teken de gang van de geluidsstraal in het water.

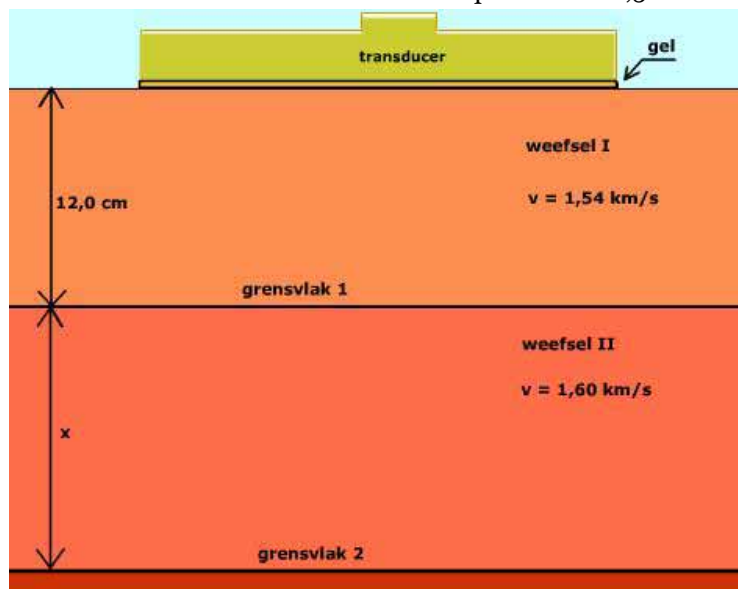
- d. Bereken bij welke hoeken van inval al het geluid wordt teruggekaatst?

- e. De golflengte van geluid in lucht is 10 cm. Bereken de golflengte in water.

- f. Leg uit waardoor een laagje lucht een echogram compleet bederft.

### 59 Echo

Een echografieapparaat zendt op tijdstip  $t = 0$  een puls ultrageluidsgolven loodrecht naar beneden uit met een frequentie van 2,50 MHz.



Figuur 4.13

Op de grensvlakken 1 en 2 kaatst het geluid terug en wordt daarna door het apparaat opgevangen. Verwaarloos de dikte van het laagje gel en houd uitsluitend rekening met terugkaatsingen op grensvlak 1 en grensvlak 2.

- a. Bereken de golflengte van het geluid in weefsel I.

- b. Bereken op welk tijdstip de eerste echo opgevangen wordt.

De tweede echo wordt opgevangen op tijdstip  $t = 0,400$  ms. Bereken  $x$ , (= de dikte van weefsel II)



## 4 Overige beeldtechnieken

### 4.2 Keuzeles: CT-scan en MRI-scan

In de vorige hoofdstukken zijn drie technieken in de medische beeldvorming besproken: de röntgenfoto, de nucleaire diagnostiek en de echografie. In deze paragraaf kijken we naar de CT-scan en de MRI-scan.

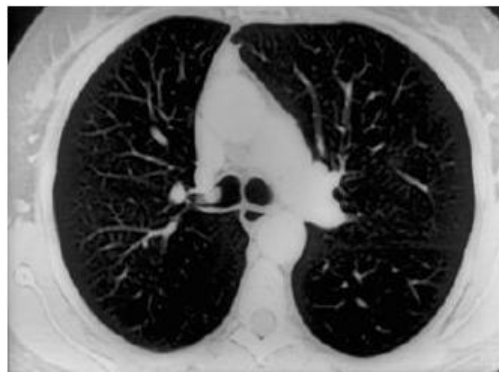
|                       |                                                                                    |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Paragraafvraag</b> | <b>Hoe werken de CT-scan en de MRI-scan?</b><br>Deze paragraaf is geen examenstof! |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|

#### CT-scan

Een CT-scanner maakt met röntgenstraling beelden van dwarsdoorsneden van het lichaam. CT staat voor Computed Tomography, het maken van een dwarsdoorsnede door de computer.



*Figuur 4.14 Een röntgenfoto van de borstholte. Als er een tumor te zien is, weet je nog niet hoe 'diep' deze zit.*



*Figuur 4.15 Een CT-scan van een dwarsdoorsnede van de borstholte.*

Bij een gewone röntgenfoto zijn inwendige structuren soms moeilijk te onderscheiden. In de röntgenfoto van de borstholte is bij een mogelijke tumor zie je niet hoe 'diep' die zit. Een foto van opzij helpt ook niet altijd: de tumor kan achter een rib verscholen zitten.

De CT-scan (zie figuur 4.15) lost dit probleem op door een beeld van de dwarsdoorsnede van de borstholte te geven. Een moderne CT-scanner bestaat uit een röntgenbron die om het lichaam draait met aan de andere kant röntgendetectoren (zie figuur 4.16). Er worden dus onder steeds verschillende hoeken röntgenopnames gemaakt.

De computer berekent de bijbehorende absorpties en zet die om in grijswaardes. Dit geeft uiteindelijk beelden van dwarsdoorsneden van het lichaam.



*Figuur 4.16 Als de detectoren een schroeflijn om het lichaam trekken, wordt het mogelijk 3D opnamen te maken.*



*Figuur 4.17. Bij een CT-scan zit de arts zit in een aparte ruimte.*



*Figuur 4.18 Een 3D-opname van de dikke darm. Zo kan men bijv. zien of er poliepen zitten. De kleur is door de computer aangebracht en stemt niet overeen met de werkelijkheid.*

### Extra

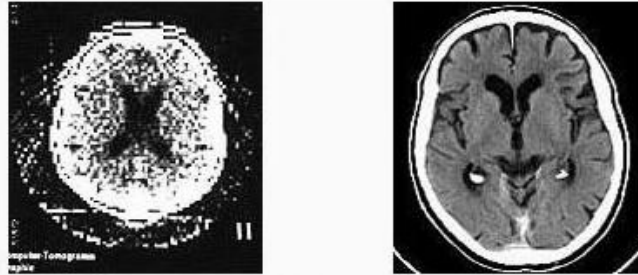
Behalve voor medische doeleinden wordt de CT-scan ook gebruikt om levenloze voorwerpen te onderzoeken. Geologen gebruiken de CT-scan om stukken rots te onderzoeken. Zo kun je ook een mummie onderzoeken, zonder de windsels los te maken. Men kan deze voorwerpen uiteraard langer en aan intensievere straling blootstellen dan mensen.



*Figuur 4.21 MRI-scan*

### Technische verbeteringen

Sinds de eerste experimenten in 1970 is de CT-scan aanzienlijk verbeterd. Betere detectoren en krachtigere computers maken nu in veel kortere tijd gedetailleerdere beelden. Bij een scan van de borstholte moet de patiënt de adem inhouden, anders wordt het beeld wazig. Als de opname 5 seconden duurt, is dat geen probleem.



*Figuur 4.19 Vergelijking tussen een scan van een schedel uit 1975 en een hedendaagse. De eerste opnamen duurden 24 uur, nu is dat vijf seconden.*

Door dwarsdoorsneden achter elkaar te plakken ontstaat een 3D-beeld. In figuur 5.7 zie je een 3D beeld van de dikke darm. Door de CT-beelden achter elkaar te leggen maakt men een 'virtuele reis' door de darm.

### Voor- en nadelen

Een belangrijk voordeel van de CT-scan boven de röntgenfoto is het veel betere contrast tussen de weefsels. De CT-scan geeft daardoor een scherpe afbeelding van de organen en wordt veel gebruikt om tumoren op te sporen en de ontwikkeling ervan te volgen. Ook bepaalt men met een CT-scan de afmetingen van de blaas en kijkt of er water in de longen zit.

Een groot nadeel is de flinke dosis straling die de patiënt oploopt. Het equivalente dosis van een scan van het hoofd is 2 mSv, van de borstkas 10 mSv en van het bekken 15 mSv, 10 tot 100 keer zoveel als bij een röntgenfoto.

### MRI-scan

MRI staat voor 'magnetic resonance imaging': het maken van een beeld door middel van magnetische resonantie (= meetrillen).



*Figuur 4.20 MRI-scanner*

Op de foto hiervoor zie je een MRI-apparaat. In het apparaat zit een stroomspoel die een uitermate sterk magnetisch veld opwekt. Om zo'n sterk veld op te wekken, gaat door de spoelen een stroomsterkte van honderden ampères. In koperdraden ontstaat dan veel te veel warmte en worden bovendien de energiekosten zeer hoog. Daarom gebruikt men supergeleiding.

Zo'n sterk magnetisch veld vraagt ook om andere veiligheidsmaatregelen. Alle ijzeren voorwerpen moeten uit de buurt blijven omdat ze met grote kracht in de magneet getrokken worden. Voorwerpen als ijzeren wagentjes, emmers, stofzuigers worden uit de ruimte van het MRI-apparaat geweerd. Ziekenhuispersoneel en patiënten mogen geen ijzer bevattende voorwerpen

zoals sleutels en horloge bij zich hebben. Een bankpasje wordt in het MRI apparaat onleesbaar. Patiënten met een ingebouwd apparaatje (als pacemaker en insulinepompje) krijgen geen MRI-scan.

Er is nog nooit aangetoond dat het sterke magnetische veld gevaarlijk voor de gezondheid zou zijn. Voor alle zekerheid ondergaan vrouwen die korter dan 12 weken zwanger zijn geen MRI-onderzoek.

### **Het principe**

De patiënt wordt dus in het magnetisch veld gebracht. Door extra spoelen (de gradiëntspoelen) krijgt elk lichaamsdeel ('volume-element') een eigen magnetische veldsterkte.

Met radiogolven gaan de protonen (kernen van waterstofatomen) in het lichaam van de patiënt in zo'n magneetveld zelf ook radiogolven uitzenden.

De MRI-scan meet dus op elke plaats de concentratie waterstofatomen, die per weefsel verschilt. De computer maakt van deze concentraties op het beeldscherm grijswaarden, die dus voor elk weefsel anders zijn.

Er ontstaat uiteindelijk een duidelijk beeld van de organen. Dat kan een doorsnede of een driedimensionaal beeld zijn.

### **Voor- en nadelen**

#### **Voordelen**

- De MRI-scan geeft een zeer goed beeld van hersenen, hart, longen, (met gebruik van contrastvloeistof) bloedvaten en gewrichten.
- MRI geeft ook andere gegevens zoals de concentratie van fosfor en natrium, de pH, de temperatuur in elk volume-element en de stroomsnelheid van bloed.
- Er wordt geen schadelijke ioniserende straling gebruikt.

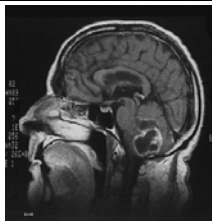
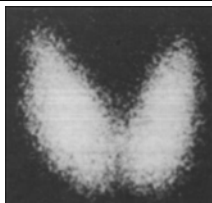
#### **Nadelen**

- De apparatuur is duur (een eenvoudig MRI-apparaat kost al gauw een miljoen euro) en het onderzoek kan vrij lang duren (een half tot twee uur). Dat maakt ook de scan duur.
- Het apparaat maakt veel lawaai.
- MRI is niet geschikt voor patiënten met ijzer, kobalt of nikkel bevattende voorwerpen in hun lichaam.

### ***Samenvatting***

- Bij een CT-scan (CT = computed tomography) draaien een röntgenbron en detectoren om het lichaam heen. De computer construeert uit de doorgelaten straling een beeld van de dwarsdoorsnede van het lichaam. Voordeel: zeer goed contrast tussen de weefsels, dus duidelijk beeld. Nadeel: hoge stralingsdosis (2 tot 15 mSv).
- Bij MRI (Magnetic Resonance Imaging) laat men waterstofatomen in een zeer sterk magneetveld radiogolven uitzenden. Voordelen: duidelijk beeld door zeer goed contrast tussen de weefsels, methode geeft ook andere informatie, geen gebruik van ioniserende straling. Nadelen: duur, langdurig onderzoek, apparatuur maakt veel lawaai en is niet geschikt voor patiënten met pacemakers of andere metalen voorwerpen.



| Techniek              | Natuurkundig principe                               | Geschikt voor                                                             | Nadelen                                                                                       | Voordelen                                                             | Beeld                                                                                 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Röntgenfoto           | Absorptie van röntgenstraling                       | Botten, gebit, bloedvaten, darmkanaal (met contraststof)                  | Zachte weefsels niet goed zichtbaar, structuren door elkaar, (geringe) stralingsdosis         | Snel, goedkoop                                                        |    |
| CT-scan               | Absorptie van röntgenstraling geeft dwarsdoorsneden | Opsporen tumoren, onderzoek naar zachtere weefsels                        | Tamelijk hoge stralingsdosis                                                                  | Goed beeld, goed contrast                                             |    |
| MRI-scan              | Uitzending van Radiogolven door protonen.           | Onderzoek naar hersenen, gewrichten, hart etc.                            | Duur<br>Maakt lawaai                                                                          | Goed beeld, veelzijdig toepasbaar<br>Geen ioniserende straling        |    |
| Echografie            | Terugkaatsing van Ultrageluid                       | Zwangerschapsonderzoek, sportblessures<br>Meting stroomsnelheid van bloed | Beeld niet erg duidelijk<br>Indringdiepte beperkt<br>Niet geschikt voor botten en longweefsel | Snel<br>Goedkoop<br>Geen ioniserende straling<br>Compacte installatie |   |
| Nucleaire geneeskunde | Radioactiviteit gammastralend.                      | Opsporen tumoren, onderzoek naar transportprocessen, stofwisseling        | stralingsdosis                                                                                | Geschikt voor onderzoek naar functioneren van organen                 |  |

## Opgaven

### 60 CT-scans

- Leg het principe van een CT-scan uit.
- Waarom verschilt de CT-scan van die van een klassieke röntgenfoto?

### 61 Een supergeleidende spoel

MRI magneten worden vaak gemaakt van een supergeleidende legering van niobium en titanium.

- Leg uit dat het laten lopen van de stroom zelf (vrijwel) niets kost.
- Waarom worden er toch energiekosten gemaakt voor het in bedrijf houden van de magneet?
- Op welke twee manieren gebruikt men radiogolven bij MRI?

## 62 Technieken voor medische beeldvorming

- Noem de technieken voor medische beeldvorming.
- Bij welke technieken wordt gebruik gemaakt van röntgenstraling?
- Bij welke wordt geen ioniserende straling gebruikt?
- Bij welke maakt men gebruik van radioactieve stoffen?
- Welke techniek is de duurste?
- Welke technieken brengen zachte weefsels goed in beeld?
- Welke technieken maken geen beeld van organen?

Men overweegt in een ambulance apparatuur voor medische beeldvorming mee te nemen om sneller eerste hulp aan te bieden.

Leg uit welke techniek daarvoor het meest in aanmerking zou komen en welke beslist niet.

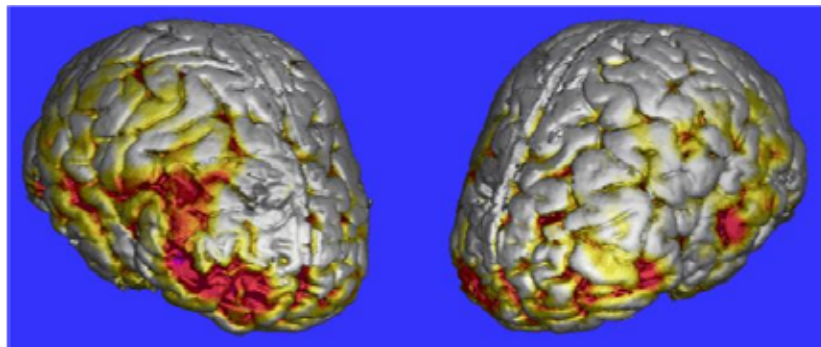
## 63 Gebruik van technieken

Hieronder volgt een aantal medische gevallen. Welke vorm van medische beeldvorming lijkt je hierbij geschikt? Verklaar je antwoord.

- Na een geslaagde operatie waarbij een kwaadaardig gezwel verwijderd is, wil men weten of er uitzaaiingen in het lichaam zijn.
- Men wil bij een zwangere vrouw weten of de foetus goed ligt.
- Men wil onderzoeken of er vocht in de longen van een patiënt zit.
- Men wil onderzoeken of de doorbloeding van het hart goed is.
- Iemand kan na een sportblessure zijn knie niet buigen zonder vreselijke pijn. Een arts wil onderzoeken wat er aan de hand is.
- Bij een patiënt wordt longkanker vermoed. Men wil onderzoeken of er een tumor is en waar die zit.
- Men wil weten waar een uitstulping van de hersenslagader precies zit.

## 64 Combinatie van technieken

Een computer kan de resultaten van twee technieken combineren voor een beter inzicht in het ziektebeeld. Op de foto hierna zie je zo'n beeld. Onderzocht werd welke delen van de hersenen bij een bepaalde taak actief zijn.



- Leg uit met welke techniek het beeld van de hersenen is gemaakt.
- Met welke techniek is de kleuring gemaakt?

## 65 Stress

De schade bij Medische Beeldvorming weegt niet op tegen de voordelen. Makkelijk gezegd, maar sommige technieken geven wel degelijk stress bij patiënten. Goede voorlichting en begeleiding is dan ook zeer belangrijk.

- Welke omstandigheden kunnen stress veroorzaken bij een MRI-scan?
- Welke bij een CT-scan?
- Welke bij de nucleaire diagnostiek?
- Wat is volgens jou de beste methode om dergelijke stress te voorkomen?

## 4 Overige beeldtechnieken

### 4.3 Over het beeld

|                |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| Hoofdstukvraag | Hoe kan men afbeeldingen verbeteren? |
|----------------|--------------------------------------|

#### Oriëntatieopgave - Downloaden en photoshopen

Misschien werk je zelf ook wel eens met beelden en beeldbewerking. In dit voorafje kijk je naar zaken die in dit hoofdstuk terugkomen.

- Soms duurt het downloaden van een filmpje van internet lang, soms kort. Waar hangt dit van af?
- Hoeveel foto's passen in een geheugenruimte van 1 gigabyte?
- Waardoor kun je een foto niet steeds verder uitvergroten?
- Met welke bewerkingen op je digitale camera kun je het beeld van een bestaande foto beter maken?

In de medische beeldvorming meet men de intensiteit van straling of geluid en maakt daarvan uiteindelijk een digitaal beeld. Een digitaal beeld biedt diverse voordelen: makkelijk te kopiëren, te verzenden en op te slaan. Een belangrijk voordeel is ook, dat je digitale beelden kunt bewerken om de kwaliteit te verbeteren.

#### Het digitale beeld

Een digitaal beeld zoals het beeldscherm van je computer is opgebouwd uit kleine rechthoekige (soms vierkante) beeldelementjes: **pixels**. Elke pixel heeft één effen kleur. Hoe meer pixels in een beeld, des te kleinere details kan dit beeld weergeven en des te beter is de kwaliteit bij vergroting.

Pixels in zwartwitbeelden kunnen allerlei tinten grijs hebben, tussen zwart en wit in. Hoe donker of licht een pixel is, ligt vast in een binair getal: de **grijswaarde**. Bestaat dat getal uit 8 bits (zoals in het veelgebruikte JPEG-formaat), dan zijn grijswaarden mogelijk van 0 tot en met 255. Het getal 0 staat voor zwart en 255 voor wit, met alle grijs tinten ertussen. In de medische beeldvorming zijn getallen van 12 bits = 4096 grijs tinten gebruikelijk.

Het menselijk oog kan slechts circa 128 grijs tinten onderscheiden, maar wel 24 miljoen kleuren. Met 24 bits (3 bytes = 16,8 miljoen kleuren) kom je een heel eind, maar 16 bits per pixel (65.000 kleuren) levert ook een goed beeld.

#### Resolutie, helderheid en contrast

Bij digitale beelden zijn belangrijke begrippen: resolutie, helderheid en contrast.

De **resolutie** (het oplossend vermogen) bepaalt de afmeting van de kleinste nog zichtbare details. In een digitale afbeelding met veel pixels is de resolutie groot, ook kleine details zijn zichtbaar. Nadeel van een hoge resolutie is dat die veel geheugenruimte nodig heeft en dat het maken en bewerken van het beeld langer duurt. In de medische beeldvorming kunnen de resoluties van de verschillende toepassingen nogal verschillen.



*Figuur 4.22 Op dit stukje röntgenfoto zie je de pixels sterk vergroot*

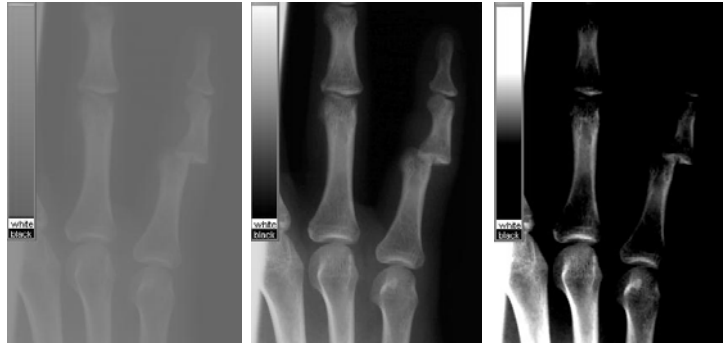
## Extra

Veel gebruikte resoluties in de medische beeldvorming (in aantal pixels in de breedte x de hoogte)::

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Echogram              | 256 x 256   |
| Nucleaire diagnostiek | 256 x 256   |
| CT-scan               | 512 x 512   |
| MRI-scan              | 512 x 512   |
| DSA-beeld (bloedvat)  | 1024 x 1024 |
| Röntgenfoto:          | 2048 x 2048 |

De **helderheid** geeft aan of beelden lichter of donkerder zijn. Je vergroot de helderheid door van alle pixels de grijswaarde te verhogen. Soms is een minder helder beeld gewenst omdat dan kleine verschillen in grijswaarde beter opvallen.

Onder **contrast** verstaat men het verschil tussen licht en donker. Bij een laag contrast wordt een deel van de grijsstinten gebruikt. Alles is ongeveer even grijs en het beeld is vaag. Bij een hoog contrast worden alle grijsstinten gebruikt, maar in een klein gebied, en daardoor is de overgang van wit naar zwart vrij plotseling. Lichte structuren zijn dan al gauw te licht en donkere te donker.



Figuur 4.23 Röntgenfoto met te weinig contrast (links), goed contrast (midden) en teveel contrast (rechts)

## Beeldbewerking

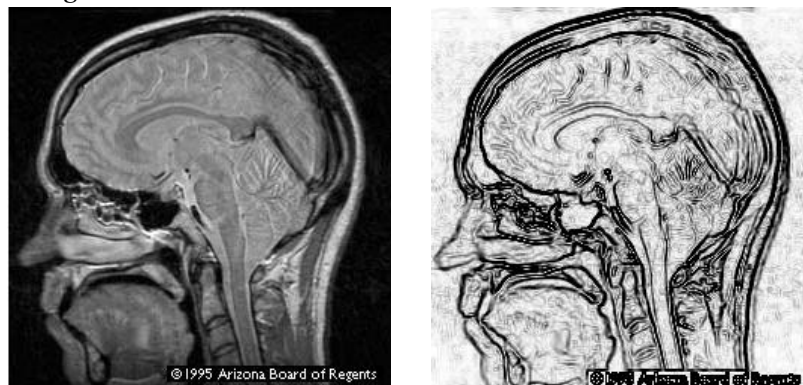
Bij het maken van foto's met digitale camera en bij het fotoshappen op de computer wordt beeldbewerking toegepast. De technieken hierbij zijn ontwikkeld voor wetenschappelijk onderzoek (satellietfoto's), medische beeldvorming en filmindustrie (speciale effecten).

In de techniek van beeldbewerking verandert de computer de grijswaarde (of kleurwaarde) van elke pixel, zodat er een bewerkt beeld ontstaat met de gewenste eigenschappen.

Bekende beeldbewerkingstechnieken zijn: **randversterking** (*edge enhancement*), **ruisonderdrukking** (*noise reduction*) en werken met **valse kleuren** (*false color*).

## Randversterking

Het kan in de medische beeldvorming belangrijk zijn een rand aan te brengen tussen organen die niet goed te onderscheiden zijn. De computer berekent dan waar de overgang tussen twee gebieden zit en tekent daar een rand. Figuur 4.24 laat een praktijkvoorbeeld zien van een MRI-scan van een hoofd, die na randversterking duidelijker de contouren van zachte weefsels weergeeft.



Figuur 4.24

### Extra

De hiernaast besproken vorm van ruis is de zogenaamde 'peper en zout' - ruis. Door storingen wijkt de grijswaarde van een pixel sterk af van die van zijn burens. Het beeld vertoont daardoor witte (of zwarte) puntjes.

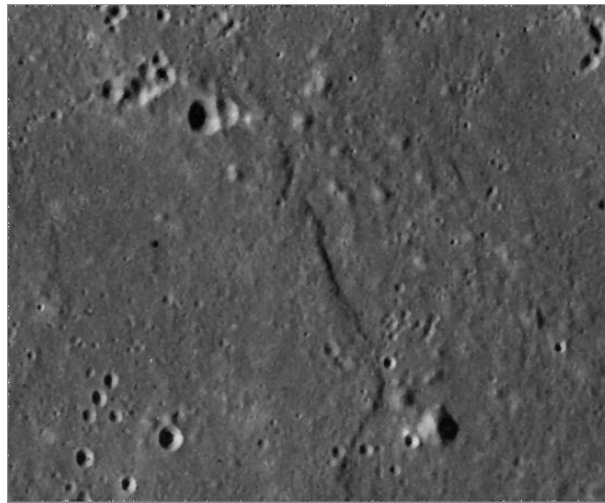
Daarnaast is er ook een 'additieve ruis': grijswaarden van de pixels wijken door storingen een beetje van elkaar af, maar het gemiddelde van alle (positieve en negatieve) afwijkingen is praktisch nul. Deze vorm van ruis wordt onderdrukt door voor elke pixel het gemiddelde van de grijswaarde van die pixel zelf en van de acht burens te nemen.

### Ruisonderdrukking

Bij satellietfoto's en bij medische beelden kan door storingen in de overbrenging van de signalen informatie over pixels verdwijnen. In de foto in figuur 4.25, van het oppervlak van de planeet Mercurius, is het beeld verstoord door de witte puntjes. In figuur 4.26 zie je het bewerkte beeld. De ruisonderdrukking gebeurt door elke pixel de waarde te geven van de mediaan van de pixel zelf en de acht omringende pixels. Een nadeel is dat het beeld daardoor wat vager wordt.



Figuur 4.25



Figuur 4.26

### Extra

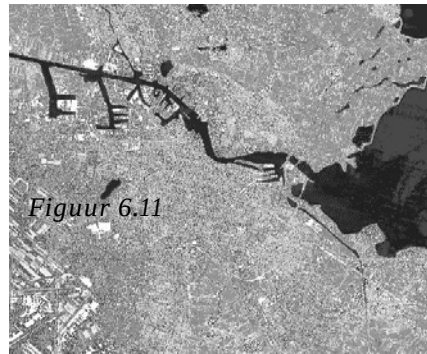
De mediaan van een aantal getallen krijg je door ze op volgorde (van klein naar groot) te leggen. Het middelste getal is dan de mediaan.

### Valse kleuren (false colors)

Je kunt een vage zwart-wit-foto duidelijker krijgen door met de computer grijswaarden te vervangen door kleuren uit het spectrum. Bovendien gebruikt men dan de voor het menselijk oog onzichtbare reflecties in het ultraviolette en infrarode deel van het spectrum als basis voor valse kleuren in het zichtbare spectrum.

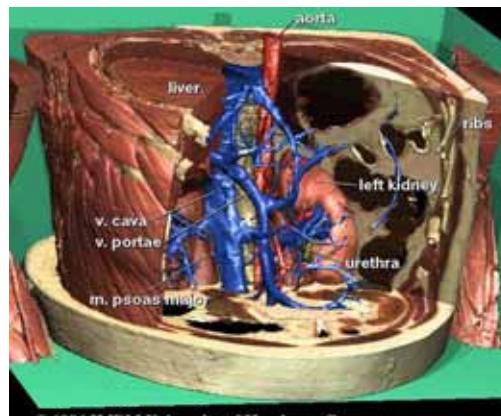
Bij röntgenopnamen beperkt men zich tot intensiteitsverschillen in het grijs. In figuur 4.27 zie je hoe een slim palet van valse kleuren het oorspronkelijke zwart-wit-beeld het aanzien van een kleuren-luchtfoto geeft. En het zijn niet de echte kleuren!





*Figuur 4.27 Een slim palet van valse kleuren maakt het oorspronkelijke zwart-wit-beeld (luchtfoto Amsterdam) duidelijker en 'net echt'.*

In figuur 4.28 van een MRI-opname, is met valse kleuren een duidelijk beeld van de buikholte verkregen. Geschikt voor een anatomische atlas, afgezien van de kleuren is het beeld realistisch.



*Figuur 4.28*

## **Begrippen**

Pixel  
Grijswaarde  
Resolutie  
Helderheid  
Contrast  
Randversterking  
Ruisonderdrukking  
Valse kleuren

## **Samenvatting**

- Een digitaal beeld is opgebouwd uit kleine egaal getinte rechthoekjes, pixels.
- Elke pixel bij een zwart-wit-beeld is voorzien van een getal: de grijswaarde.
- Bij kleurenbeelden zijn er getallen voor rood, voor groen en voor blauw.
- Resolutie geeft aan hoeveel pixels een beeld bevat.
- Helderheid geeft aan hoe licht (of hoe donker) de pixels zijn.
- Contrast is het verschil tussen licht en donker. Bij laag contrast is alles even grijs. Bij hoog contrast is de overgang van licht naar donker vrij abrupt.
- Beeldbewerking gebeurt door op de grijswaarde van elke pixel een bepaalde rekenbewerking toe te passen. Voorbeelden van beeldbewerkingen: randversterking, ruisonderdrukking, beeld vervagen of verscherpen en gebruik van valse kleuren.

---

## Opgaven

### 66 Hoeveel megabyte?

Bij röntgenfoto's gebruikt men 12 bits per pixel.

- a. Leg uit hoeveel verschillende grijswaarden hierbij mogelijk zijn.

De foto heeft een resolutie van 2048 x 2048

- b. Bereken hoeveel megabytes geheugenruimte voor deze foto minstens nodig zijn.
- c. Hoeveel van die foto's kunnen maximaal op een dvd van 4.7 GB?

### 67 Lage resoluties

Voor beelden in de nucleaire diagnostiek en echografie worden lage resoluties gebruikt (256 x 256).

- a. Waardoor zijn hogere resoluties in de nucleaire diagnostiek niet nuttig?
- b. Waardoor zijn die hogere resoluties ook bij echografie niet nuttig?

### 68 Resolutie en helderheid

De resolutie van een digitale röntgenfoto is meestal groter dan die van een beeldscherm van een computer.

- a. Leg uit of het nog nut heeft om foto's met zo'n grote resolutie te maken.
- b. Wat moet men met de grijswaarden doen om de helderheid van een computerbeeld te vergroten?

### 69 Contrast

- a. Wat is het nadeel van een te klein contrast?
- b. Waardoor wordt het beeld van een röntgenfoto van de longen beter als je het contrast vergroot?
- c. Wat is het nadeel van een te groot contrast?

### 70 Het negatief van een beeld maken

Men wil van een zwart-witfoto het negatief maken, dat wil zeggen: zwart moet wit worden en omgekeerd.

Welke rekenbewerking moet men dan op elke pixel toepassen?

### 71 Ruisonderdrukking

In figuur 4.29 zijn 9 pixels getekend. De grijswaarde van elke pixel en de daarmee overeenstemmende grijs tint zijn aangegeven. Je kunt met rekenbewerkingen de grijswaarde van de middelste pixel veranderen.

- a. Waaraan kun je zien dat de grijswaarde van de middelste pixel waarschijnlijk door ruis is veroorzaakt?

Je werkt ruis weg door het gemiddelde te nemen. De grijswaarde van de middelste pixel wordt dan vervangen door het gemiddelde van de pixels.

- b. Leg met het gemiddelde van de 9 pixels uit welke grijs tint de pixel ongeveer krijgt.

Een andere manier is de mediaan te nemen.

- c. Leg met de mediaan van de 9 pixels uit welke grijs tint de pixel nu krijgt.

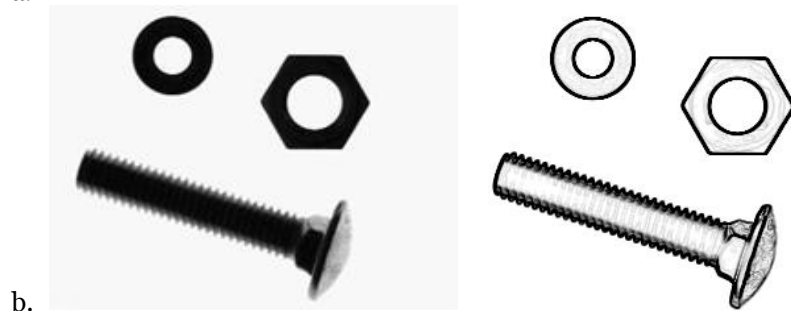
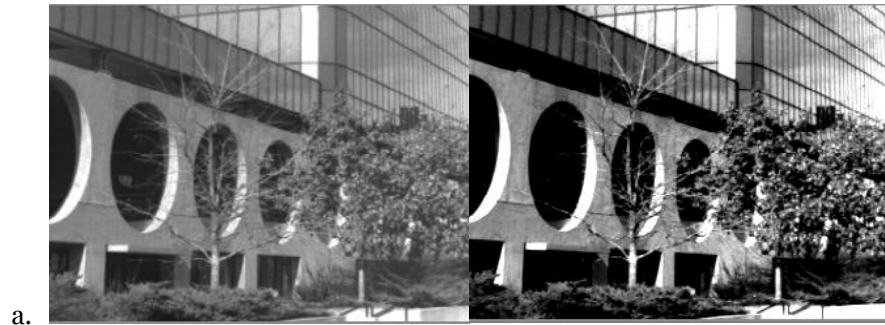
|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 100 | 120 | 140 |
| 100 | 250 | 120 |
| 90  | 80  | 70  |

Figuur 4.29



## 72 Welke bewerking?

In de onderstaande figuren is de linkerfiguur steeds het origineel, de rechter is bewerkt. Leg van elk paar uit welke bewerking mogelijk is toegepast.



## 5 Afsluiting

### Eindopdrachten

#### Eindopdracht 1 - Wie hoort bij welke foto?

Voor haar opleiding tot laborant MBRT (Medisch Beeldvormende en Radiotherapeutische Technieken), loopt Margriet stage op de afdeling Medische Beeldvorming van het St. Barbara Ziekenhuis.

Ze moet hiervoor een verslag schrijven, waarin ze de verschillende technieken uitlegt aan de hand van 20 verschillende foto's. Margriet haalt deze stapel foto's op bij de archiefmedewerker. Elke foto zit in een map, waarop kort staat wat er met de betreffende patiënt aan de hand is.

Margriet heeft haast, kijkt niet goed uit en botst bovenaan de trap met een andere medewerker. De foto's glijden uit hun map.

Paniek! Is te achterhalen welke patiënt bij welke foto hoort?

Je vindt foto's en beschrijvingen onder de volgende link:

[http://home.xmsnet.nl/vero/ng/Basisstof/fotos\\_op\\_grond.htm](http://home.xmsnet.nl/vero/ng/Basisstof/fotos_op_grond.htm)

#### Eindopdracht 2 - Applets

Voor deze module zijn uit de geweldige hoeveelheid informatie die internet biedt vooral applets erg leerzaam. Applets zijn simulaties, vaak interactief.

Medische beeldvorming

Op de volgende drie manieren kom je bij interessante applets over medische beeldvorming:

- [www.colorado.edu/physics/2000/index.pl](http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl) -> 'Einstein's legacy -> 'X-rays' en 'CAT scans'
- [http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Simplified\\_MRI](http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Simplified_MRI)
- [www.emory.edu/CRL/abb](http://www.emory.edu/CRL/abb) -> 'Radiology'(zeer uitvoerige info!) en 'Nuclear Medicine'
- [www.physics.ubc.ca/~mirg/home/tutorial/tutorial.html](http://www.physics.ubc.ca/~mirg/home/tutorial/tutorial.html) -> 'Image reconstruction'

Bekijk de applets en beantwoord de volgende vragen

- Leg uit of deze applets hebben bijgedragen tot een betere kennis van het onderwerp.
- Leg uit welke applet je het beste vond.
- Leg uit welke applet je het minste vond.

Radioactiviteit

- Vind twee geschikte applets met de zoektermen 'applet' en 'radioactive'.
- Beantwoord dezelfde bovenstaande vragen, maar nu voor deze applets.

### **Eindopdracht 3 - ISP op school?**

Er zijn bij dit onderwerp weinig proeven geschikt om op school uit te voeren. Je zult voor meer proeven buiten de school moeten kijken. Ongetwijfeld zijn er meer mogelijkheden op hbo-opleidingen (zie ook de opdracht MBRT: iets voor jou?) en in ziekenhuizen. Jij of je docent kunnen deze instituten in de buurt benaderen.

- Geef twee redenen waarom veel van deze proeven niet geschikt zijn voor school.
- Waarom zijn in de regel hbo-opleidingen 'eerder geneigd om je te helpen dan ziekenhuizen?

Maar zie! De Universiteit van Utrecht heeft een 'Ioniserend Stralen Practicum' (ISP) ontwikkeld. Er zijn twee mogelijkheden: studenten komen met een mobiel practicum op jullie school, of je groep gaat proeven op die universiteit uitvoeren.

Een en ander vereist uiteraard een uitgekiende organisatie.

Nadere informatie: [www.cdbeta.uu.nl/subw/isp](http://www.cdbeta.uu.nl/subw/isp)

Je docent vertelt je hoe je deze opdracht gaat afronden.

### **Eindopdracht 4 - Op ziekenhuisbezoek**

Sommige ziekenhuizen bieden excursies op de afdeling Medische Beeldvorming aan. Als zich in jouw buurt zo'n ziekenhuis bevindt, is dit uiteraard een uitgelezen kans om hier gebruik van te maken. Een paar punten die hier van belang zijn:

- Probeer er op informele wijze (via familielid of kennis die in dat ziekenhuis werkt) achter te komen of die mogelijkheid aanwezig is.
- Benader de geschikte contactpersoon (afdeling 'Voorlichting?') ruim van tevoren met het verzoek. Doe dit zo persoonlijk mogelijk, schriftelijk of telefonisch.
- Bereid met de klas de excursie voor, stel vast wat vragen op.

### **Eindopdracht 5 - MBRT: iets voor jou?**

De opleidingen tot laborant in de medische beeldvorming wordt verzorgd door de MBRT afdeling van hbo's.

Je gaat over deze opleidingen informatie verzamelen. Kies voor de manier waarop uit:

- een excursie naar een hbo-instelling in je buurt die deze opleiding aanbiedt
- een onderzoek van drie websites van deze instellingen.

Gebruik in beide gevallen in eerste instantie de zoekterm MBRT.

Maak van je excursie/onderzoek een verslag. Verwerk in je verslag (omvang ongeveer een A-4tje) in elk geval:

- Wat betekent de afkorting MBRT?
- Welke richtingen heb je in deze opleidingen?
- Welke richting je het meest aansprak en waarom dat juist deze richting is.
- Twee redenen voor jou om zo'n opleiding te kiezen. Twee redenen voor jou om zo'n opleiding niet te kiezen.

Bij onderzoek van websites:

- Geef twee overeenkomsten tussen die websites.
- Geef twee verschillen tussen die websites.
- Geef met argumenten aan welke website jou het meeste aansprak.

## Eindsamenvatting

### Röntgenfotografie

Röntgenstraling is een elektromagnetische golf met hoge frequentie.

Fotonen kun je voorstellen als 'brokjes' stralingsenergie.

Röntgenstraling is ioniserende straling. De halveringsdikte is de dikte waarbij de helft van de straling wordt geabsorbeerd.

Voordelen röntgenfoto: goedkoop en snel. Nadelen: straling is gevaarlijk, soms structuren door elkaar, zachte weefsels zijn moeilijk te onderscheiden.

### Nucleaire diagnostiek

Een atoom bestaat uit een positieve kern en negatieve elektronen. De kern bestaat uit positieve protonen en neutrale neutronen. De kern bevat bijna alle massa van het atoom.

Het atoomnummer  $Z$  geeft het aantal protonen in de kern aan en is bepalend voor de atoomsoort. Het massagetal  $A$  geeft het totale aantal kerndeeltjes aan. Het aantal neutronen ( $N$ ) volgt uit:  $N = A - Z$ .

Isotopen zijn atomen met hetzelfde aantal protonen, maar verschillend aantal neutronen. In een (kern)reactievergelijking staat welke atoomkernen verdwijnen, welke ontstaan en welk(e) deeltje(s) uitgezonden of geabsorbeerd worden. Bij een kernreactie blijven de som van de atoomnummers en van de massagetallen gelijk.

### Straling

Alfastraling heeft een grote ioniserende en dus schadelijke werking. Het doordringend vermogen is zeer klein.

Bètastraling bestaat uit snelle elektronen en heeft een groter doordringend vermogen en een tamelijk grote ioniserende werking.

Gammastraling bestaat uit fotonen met hoge energie. De ioniserende werking is zeer klein en het doordringend vermogen is zeer groot. Dat maakt gammastraling geschikt voor nucleaire diagnostiek: de schadelijke werking is klein en de straling is buiten het lichaam goed te detecteren.

### Radioactiviteit

De activiteit is het aantal vervallen kernen per seconde. Eenheid: becquerel (Bq). De halveringstijd is de tijd waarin de helft van het aantal atoomkernen verval. De intensiteit van straling is gedefinieerd als het vermogen per oppervlak. Hoe stabiel de atoomkern, des te langer is de halveringstijd en des te lager is de activiteit.

Een geschikte radioactieve stof moet (bijna) uitsluitend gammastraling uitzenden en een niet te lange of te korte halveringstijd hebben.

### Stralingsbescherming

De stralingsdosis is de geabsorbeerde stralingsenergie per kg bestraalde massa. Eenheid is de gray (Gy) = J/kg

Equivalent dose = dosis \* weegfactor. Eenheid sievert (Sv) = J/kg. De weegfactor hangt af van soort straling.

Bij medische beeldvorming varieert de dosis van 0,01 Sv tot ca 15 mSv.

Vergeleken met andere gezondheidsrisico's is het risico van de straling bij medische beeldvorming laag, maar men zal steeds de voordelen tegen de risico's moeten afwegen.

Er is altijd een hoeveelheid straling uit het heelal, uit de grond of de atmosfeer: de achtergrondstraling.

Beveiliging tegen straling: zo kort mogelijke tijd ondergaan, uit de buurt van de stralingsbron blijven en afscherming van de stralingsbron.

Met een badge meet men de opgelopen stralingsdosis om te controleren of deze niet te hoog geworden is.

## Eindsamenvatting (vervolg)

### Echografie

Bij echografie kaatst ultrageluid (zeer hoge frequentie) gedeeltelijk terug op grensvlakken tussen weefsels met verschillende dichtheid en geluidssnelheid.

Uit de tijd tussen uitgezonden en teruggekaatste geluidspulsen wordt de diepte van het grensvlak berekend en zo een beeld van organen gevormd.

Voordelen: geen gevaarlijke straling, goedkoop, snel en apparatuur is makkelijk te vervoeren.

Nadelen: niet geschikt voor longen en botten, beeld vrij lastig te lezen.

### Het beeld

Een digitaal beeld bestaat uit kleine egaal gekleurde vierkantjes, pixels.

Een zwart-wit-beeld ontstaat op een fotografische plaat als daar röntgenstraling op valt. Bij een zwart-wit-beeld is elke pixel voorzien van een getal: de grijswaarde. Bij kleurenbeelden zijn er drie getallen: voor rood, groen en blauw.

Resolutie geeft aan hoeveel pixels een beeld bevat (bijvoorbeeld: 512 x 512).

Helderheid geeft aan hoe licht of donker getint de pixels zijn

Contrast is verschil tussen licht en donker. Bij laag contrast is alles vrijwel even grijs. Bij hoog contrast is de overgang van licht naar donker abrupt.

Bij beeldbewerking past men op de grijswaarde van elke pixel een bepaalde rekenbewerking toe.

Voorbeelden: randversterking, ruisonderdrukking, beeld vervagen of verscherpen en gebruik van valse kleuren.

### Formules:

Lichtsnelheid:  $c = \lambda \cdot f$

Energie van foton:  $E = h \cdot f$

Stralingsabsorptie:  $I(x) = I(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$  met  $n = \frac{x}{d_{1/2}}$

Essentieel: bij hoge frequentie (en dus kleine golflengte) hoort grote energie.

Activiteit:  $A(t) = A(0) \times \frac{1}{2}^n$  met  $n = \frac{t}{t_{1/2}}$

Stralingsdosis:  $D = \frac{E}{m} = \frac{\text{geabsorbeerde energie}}{\text{bestraalde massa}}$

Equivalente dosis:  $H = w_R \times D$ ,  $w_R$  is de weegfactor die afhangt van de soort straling

Halveringsdikte :  $I(n) = I(0) \times \frac{1}{2}^n$   $n$  = aantal halveringsdiktes.