

11 Elektromagnetische straling havo

11.0 Inhoud

11.1	Licht als golf	2
	– Eigenschappen van golven	2
	– Het elektromagnetisch spectrum	3
11.2	Licht als deeltje: fotonen	4
	– Warmtestraling	4
	– Fotonen	6
11.3	Röntgenstraling	7
	– Het opwekken van röntgenstralen	7
	– Medische toepassingen van röntgenstralen	7
	– Veiligheid	9
11.4	Samenvatting	10
	– Grootheden en eenheden	10
	– Weten	10
	– Formules	10
	– Figuren	11

11.1 Licht als golf

Eigenschappen van golven

Licht vertoont alle eigenschappen van golven en daarom mag je licht behandelen als een golf. Zo heeft licht een frequentie, een amplitude, een golfsnelheid en een golflengte. Alle formules die je hebt geleerd bij het hoofdstuk golven gelden ook voor licht.

Trillingstijd (T), frequentie (f) en amplitude (A)

De **trillingstijd** van zichtbaar licht is ongeveer $T = 2 \cdot 10^{-15}$ s en dit is veel kleiner dan de trillingstijd van bijvoorbeeld watergolven en geluidgolven. De **frequentie** van zichtbaar licht bereken je met $f = 1/T$. Voor $T = 2 \cdot 10^{-15}$ s vind je $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz. Dit betekent dat er iedere seconde bijna een miljoen keer een miljard trillingen plaatsvinden. De frequentie van het licht bepaalt de kleur. Rood licht heeft een lage frequentie en violet licht heeft een hoge frequentie. Het verschil tussen de laagste en de hoogste frequentie van het licht dat wij kunnen zien is niet groot. De frequentie van rood licht is $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz en de frequentie van blauw licht $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz. De **amplitude** van een lichtgolf bepaalt de intensiteit (felheid) van het licht. Hoe groter de amplitude is, hoe intenser (feller) het licht.

De frequentie f bepaalt de kleur van een lichtgolf. De amplitude A bepaalt de intensiteit van het licht.

$$f = \frac{1}{T} \quad \Leftrightarrow \quad T = \frac{1}{f}$$

Lichtsnelheid (c)

De golfsnelheid is de snelheid waarmee een golf zich uitbreidt en is een eigenschap van het medium waarin de golf zich bevindt. In het geval van licht is er iets bijzonders aan de hand, want als licht zich verspreidt in een lege ruimte is het medium de lege ruimte. De golfsnelheid van licht in lege ruimte noem je de lichtsnelheid en dit is dus een eigenschap van lege ruimte. De lichtsnelheid is $3,0 \cdot 10^8$ m/s en dit is de grootst mogelijke snelheid waarmee een voorwerp kan bewegen. We geven deze snelheid aan met de letter c. In lege ruimte is de golfsnelheid niet afhankelijk van de frequentie en ook niet van de amplitude.

Lichtgolven verplaatsen zich door de lege ruimte met een vaste snelheid c.

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

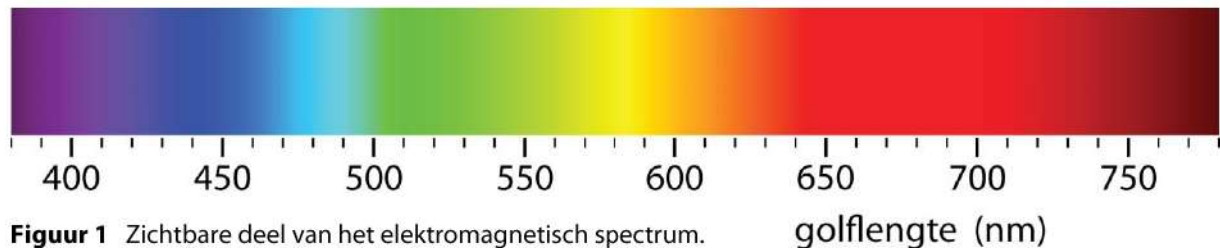
Golflengte (λ)

Voor golven geldt $v_{\text{golf}} = f \cdot \lambda$ en als je de frequentie weet kun de golflengte uitrekenen met $v_{\text{golf}} = c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s in vacuüm. Voor $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz vind je een golflengte van $\lambda = c / f = 3,0 \cdot 10^8 / 5,0 \cdot 10^{14} = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 600 \text{ nm}$.

$$c = f \cdot \lambda$$

Het elektromagnetisch spectrum

Zoals we hebben gezien wordt de kleur van licht bepaald door de frequentie van de EM-straling. In figuur 1 zie je het deel van de EM-straling dat mensen kunnen zien. Omdat de frequentie en de golflengte aan elkaar zijn gerelateerd ($\lambda = c/f$) wordt meestal de golflengte gebruikt om een kleur aan te geven. In Tabel 1 staan de golflengtes, de frequenties en de energieën van een aantal kleuren.

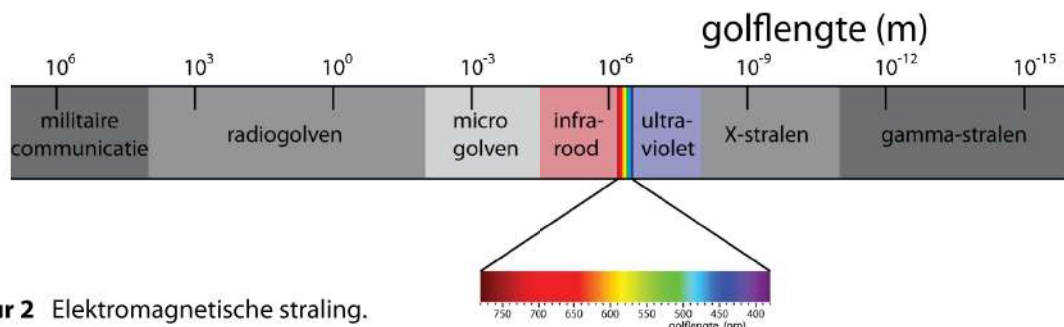


Figuur 1 Zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum.

Tabel 1 Het zichtbare deel van EM-straling.

Naam	Golflengte (nm)	Frequentie (Hz)	Energie (eV)
diep rood	700	$4,3 \cdot 10^{14}$	1,77
rood	650	$4,6 \cdot 10^{14}$	1,91
oranje	580	$5,2 \cdot 10^{14}$	2,14
geel	560	$5,5 \cdot 10^{14}$	2,21
groen	530	$5,7 \cdot 10^{14}$	2,34
groen/blauw	500	$6,0 \cdot 10^{14}$	2,48
blauw	480	$6,3 \cdot 10^{14}$	2,58
paars	460	$6,5 \cdot 10^{14}$	2,70
violet	440	$6,8 \cdot 10^{14}$	2,82
diep violet	400	$7,5 \cdot 10^{14}$	3,10

Niet alleen zichtbaar licht maar ook radiogolven, microgolven, infrarood, ultraviolet, röntgenstraling en gammastraling zijn elektromagnetische straling. Zie figuur 2. EM-straling met een lage frequentie, zoals microgolven, hebben weinig energie en zijn onschadelijk. Alleen bij hoge intensiteit, zoals in een magnetronoven, kunnen microgolven schade veroorzaken door verhitting. EM-straling met een hoge frequentie, zoals röntgenstraling en gammastraling, bevatten veel energie en zijn daarom schadelijk.



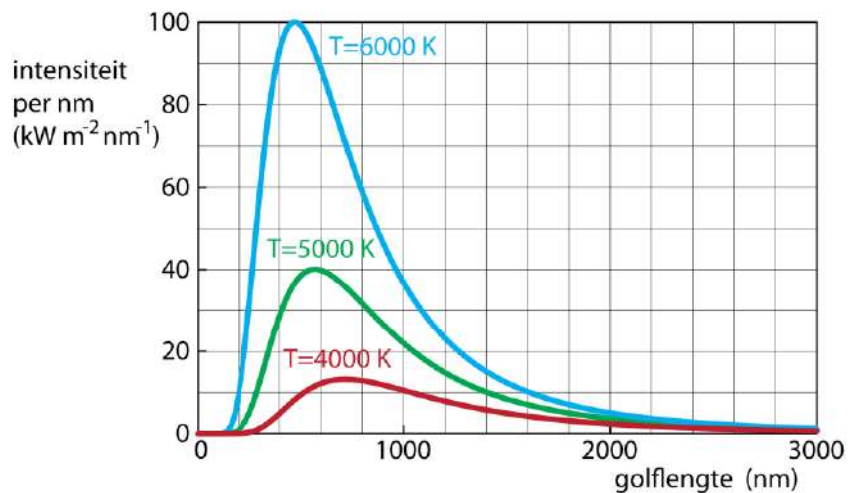
Figuur 2 Elektromagnetische straling.

11.2 Licht als deeltje: fotonen

Warmtestraling

Als je een straalkachel aanzet voel je dat het verwarmingselement een hoge temperatuur krijgt nog voordat je de kleur van het element ziet veranderen. Na korte tijd krijgt het element een rode kleur en uiteindelijk gaat het oranje-geel licht uitstralen. De oorzaak van deze straling is het trillen van de atoomkernen en de elektronen in het materiaal. Omdat deze elektrische geladen deeltjes trillen ontstaat er elektromagnetische straling. In figuur 3 zie je hoe de intensiteit van de uitgezonden straling afhangt van de golflengte en van de temperatuur. De grafieken zijn berekend voor een **zwart lichaam** (Eng. black body) wat een geïdealiseerd voorwerp is dat alle elektromagnetische straling absorbeert. In figuur 3 staat op de verticale as de uitgestraalde intensiteit (vermogen per vierkante meter) per nanometer en op de horizontale as de golflengte.

Figuur 3 Uitgestraalde intensiteit per nm als functie van de golflengte.



De golflengte van de straling die het meest wordt uitgestraald geef je aan met $\lambda_{\max}$ en zoals je ziet in figuur 3 verschuift $\lambda_{\max}$ naar een kleinere waarde (hoge energie) als de temperatuur toeneemt. Bij 3000 K wordt het meeste licht uitgestraald bij 966 nm en bij 5000 K ligt $\lambda_{\max}$ bij 580 nm. De **wet van Wien** geeft het verband aan tussen de ligging van $\lambda_{\max}$ en de temperatuur.

$$\lambda_{\max} \cdot T = k_W$$

- $\lambda_{\max}$ is de golflengte die het meest wordt uitgestraald in meter (m)
- k_W is de constante van Wien | $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$
- T is de temperatuur in kelvin (K)

In figuur 3 zie je dat bij een hogere temperatuur ook veel meer licht wordt uitgestraald. De **wet van Stefan-Boltzmann** geeft aan dat de hoeveelheid uitgestraalde energie per seconde recht evenredig is met de oppervlakte én met de vierde macht van de temperatuur.

VOORBEELD energieverlies door uitstraling

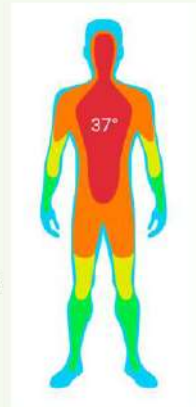
De temperatuur van je lichaam is 37 °C. Hierdoor verlies je continu energie omdat je elektromagnetische straling uitzendt.

Bereken de golflengte die bij 37 °C het meest wordt uitgestraald.

- $T = 37\text{ °C} \rightarrow T = 37 + 273,15 = 310,15\text{ K}$
- $\lambda_{\max} \cdot T = k_W$ met $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
- $\lambda_{\max} \cdot 310,15 = 2,89777 \cdot 10^{-3} \rightarrow \lambda_{\max} = 9,34312 \cdot 10^{-6} = 9,3 \cdot 10^{-6}\text{ m}$

Bereken de frequentie die bij 37 °C het meest wordt uitgestraald.

- $v_{\text{golf}} = f \cdot \lambda$ met $v_{\text{golf}} = c = 2,99792 \cdot 10^8\text{ m/s}$
- $2,99792 \cdot 10^8 = f \cdot 9,34312 \cdot 10^{-6} \rightarrow f = 3,20869 \cdot 10^{13} = 3,2 \cdot 10^{13}\text{ Hz}$



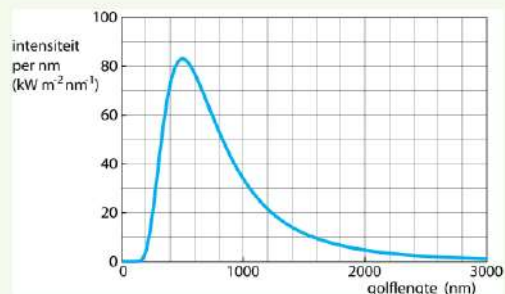
Omdat de temperatuur van je huid lager is dan 37 °C is de golflengte die je het meest uitstraalt anders dan die bij 37 °C.

Beredeneer of de uitgestraalde $\lambda_{\max}$ van je huid groter of kleiner is dan $\lambda_{\max}$ bij 37 °C.

- $\lambda_{\max} \cdot T = k_W$ met $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
- k_W blijft gelijk $\rightarrow T$ wordt kleiner $\rightarrow \lambda_{\max}$ wordt groter

VOORBEELD zonlicht

Vanwege de hoge temperatuur van het oppervlak straalt de zon zichtbaar licht uit. In figuur 4 zie je de uitgestraalde intensiteit per nm als functie van de golflengte.



Figuur 4

Bepaal de temperatuur van het oppervlak van de zon.

- aflezen $\lambda_{\max} = 501\text{ nm} = 501 \cdot 10^{-9}\text{ m}$
- $\lambda_{\max} \cdot T = k_W$ met $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
- $501 \cdot 10^{-9} \cdot T = 2,89777 \cdot 10^{-3} \rightarrow T = 5,78 \cdot 10^3\text{ K}$

In het centrum van de zon vinden kernfusiereacties plaats en is de temperatuur $1,55 \cdot 10^7\text{ K}$.

Bereken de golflengte van de straling die ontstaat in het centrum van de zon.

- $\lambda_{\max} \cdot T = k_W$ met $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
- $\lambda_{\max} \cdot 1,55 \cdot 10^7 = 2,89777 \cdot 10^{-3} \rightarrow \lambda_{\max} = 1,86953 \cdot 10^{-10} = 1,87 \cdot 10^{-10}\text{ m}$

Hoe heet elektromagnetische straling met deze golflengte?

- opzoeken in Binas tabel 19B $\rightarrow$ röntgenstraling

Fotonen

Het verloop van de grafieken in figuur 3 kun je niet verklaren met de golftheorie van licht. In plaats daarvan moet je aannemen dat EM-straling wordt uitgezonden in pakketjes licht-energie in plaats van als golf. Als je een lichtbron heel zacht zet verwacht je bij een golf dat er continu EM-golven worden uitgezonden met een kleine amplitude. Maar dit gebeurt niet. Af en toe wordt er een pakketje licht uitgezonden. Hoe intenser het licht is hoe vaker een lichtpakketje wordt verstuurd. Een pakketje licht noem je een **foton** (lichtdeeltje). Een voorwerp kan alleen hele fotonen uitzenden. Halve fotonen bestaan niet. De energie van een foton is afhankelijk van de frequentie, hoe groter de frequentie is hoe meer energie een foton bevat. Het idee dat licht bestaat uit een stroom van deeltjes (fotonen) lijkt in tegenspraak te zijn met het idee dat licht een elektromagnetische golf is. Deze tegenspraak is de start geweest van de kwantumtheorie en heeft de natuurkunde ingrijpend veranderd. Voor de energie van een foton geldt:

$$E_f = h \cdot f$$

- E_f is de energie van een foton uitgedrukt in joule (J)
- h is de constante van Planck | $h = 6,62607 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- f is de frequentie in Hertz (Hz)

Je kunt deze formule ook combineren met $c = f \cdot \lambda$ en dan vind je **$E_f = h \cdot c / \lambda$** .

Vaak wordt de fotonenergie uitgedrukt in elektronvolt eV. Er geldt **$1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$** .

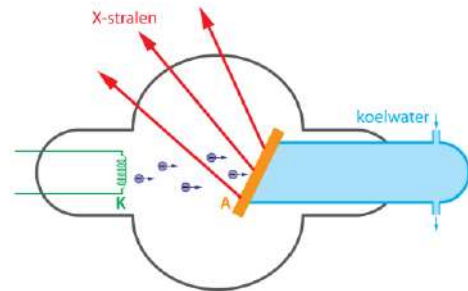
Als startpunt gebruik je dus altijd $E_f = h \cdot f$ en daarna ga je de formule aanpassen, waarbij je de frequentie f vervang door de golflengte en waarbij je de energie E_f in joule omrekent de energie in elektronvolt (eV).

11.3 Röntgenstraling

Het opwekken van röntgenstralen

In 1894 ontdekt Wilhelm Conrad Röntgen (Duitsland, 1845–1923) bij toeval röntgenstralen. Zelf sprak hij van x-stralen, waarbij de letter x staat voor iets dat onbekend is. In het Engels wordt "x-rays" nog steeds gebruikt. Röntgenstralen ontstaan als elektronen met hoge snelheid op een metaal botsen. Ze dragen hun kinetische energie over op de metaalatomen die hierdoor röntgenstraling gaan uitzenden.

In figuur 5 zie je een röntgenbuis waarin dit gebeurt. De energie van een röntgenfoton zit tussen 1000 en 100.000 eV en is dus veel groter dan de 1,5 – 3 eV van zichtbaar licht. De golflengte van röntgenstraling is 10^{-9} tot 10^{-11} m.



Figuur 5 Vacuümbuis waarin röntgenstralen worden opgewekt.

VOORBEELD opwekken van röntgenstraling

Als elektronen met grote snelheid op koper botsen ontstaat er röntgenstraling. De röntgenfotonen die het meest worden uitgezonden is koper- $K\alpha$ straling met een golflengte van 0,154 nm.

Bereken de fotonenergie van koper- $K\alpha$ straling.

- $c = f \cdot \lambda$ met $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s c in Binas tabel 7A
- $2,99792 \cdot 10^8 = f \cdot 0,154 \cdot 10^{-9} \rightarrow f = 1,9467 \cdot 10^{18}$ Hz
- $E_{\text{foton}} = h \cdot f$ met $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js h in Binas tabel 7A
- $E_{\text{foton}} = 6,62607 \cdot 10^{-34} \cdot 1,9467 \cdot 10^{18} = 1,28990 \cdot 10^{-15} = 1,30 \cdot 10^{-15}$ J

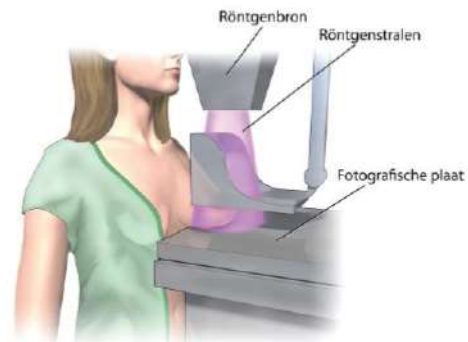
Met welke minimale snelheid moeten de elektronen tegen het koper botsen?

- de kinetische energie van één elektron moet minimaal de fotonenergie zijn
- $E_K = E_{\text{foton}} \rightarrow \frac{1}{2} m \cdot v^2 = 1,28990 \cdot 10^{-15}$ J
- $\frac{1}{2} \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot v^2 = 1,28990 \cdot 10^{-15}$ rustmassa elektron in Binas tabel 7B
- $v^2 = 2,832026 \cdot 10^{15} \rightarrow v = 5,32168 \cdot 10^7 = 5,32 \cdot 10^7$ m/s

Medische toepassingen van röntgenstralen

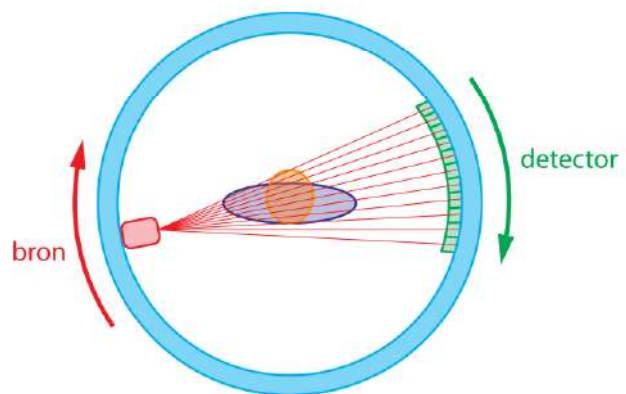
Röntgenstralen hebben een groot doordringend vermogen. Weefsel bestaat voornamelijk uit de waterstof, koolstof, stikstof en zuurstof, en absorbeert minder straling dan botten, die opgebouwd zijn uit zware elementen zoals calcium. Als een röntgenstralen door het lichaam gaan ontstaat achter het lichaam een schaduw van de botten. Een fotografische plaat blijft wit als er geen of weinig röntgenstraling op valt en kleurt zwart als er wel röntgenstraling is. Botten worden hierdoor zichtbaar.

Met speciale apparatuur kunnen ook zachte weefsels worden onderzocht, zoals gebeurt bij onderzoek naar borstkanker "mammografie". Zie figuur 6.



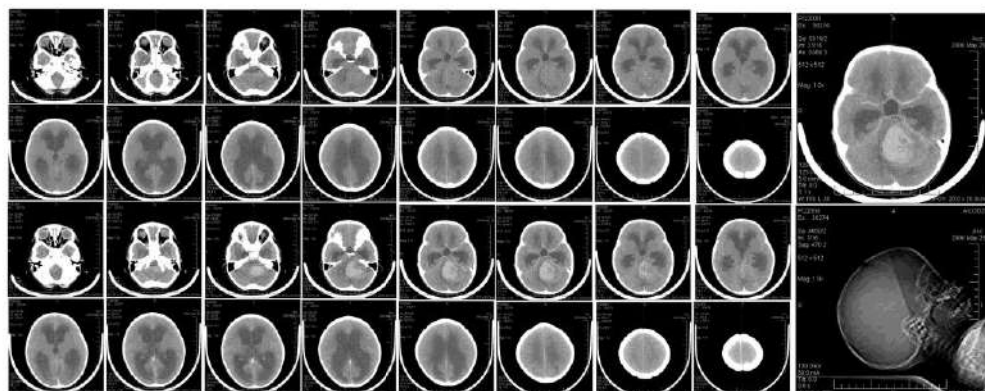
Figuur 6 Links, röntgenfoto van een gebroken schouder. Rechts: onderzoek naar borstkanker "mammografie".

Vanaf 1970 is een nieuwe röntgentechniek beschikbaar: **Computer Tomografie, CT**. Een **CT-scanner** heeft een röntgenbron en een detector, die tegelijkertijd om de patiënt heen draaien. Zie figuur 7. Er wordt een serie röntgenfoto's onder een steeds andere hoek gemaakt. Langzaam wordt de patiënt door de scanner geschoven, zodat een CT-scan een driedimensionaal beeld oplevert. Dit beeld kan je weergegeven als een serie plakjes, zoals te zien in figuur 8.

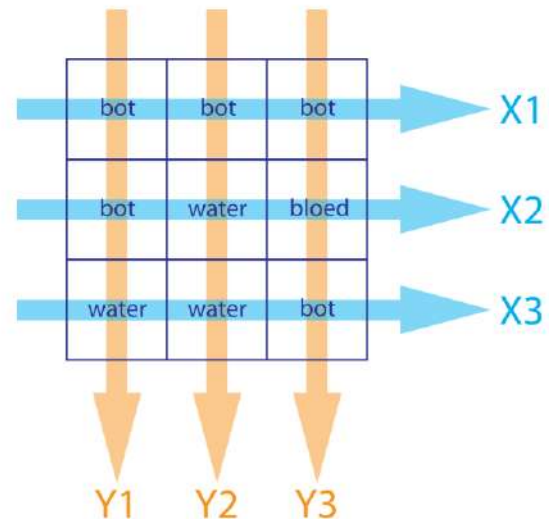


Figuur 7 CT-scanner. Een röntgenbron en de detector draaien tegelijkertijd om de patiënt van verschillende kanten te fotograferen.

Figuur 8 CT-scan van een kinderhoofdje.



Doordat de röntgenfoto's onder verschillende hoeken worden gemaakt kun je de samenstelling van het bestraalde weefsel bepalen. Zie figuur 9. Het signaal X1 gaat door 3 stukjes bot en is daarom zwak. Dit geeft een witte plek op de foto. Het signaal Y2 gaat door 1 stukje bot en 2 stukjes water en is daarom sterker dan X1. Op de plaats Y2 is de röntgenfoto donkerder dan op X1.



Figuur 9 Röntgenstraling gaat in verschillende richtingen door de patiënt, zodat een 3-dimensionaal beeld kan worden berekend.

Veiligheid

De energie van een röntgenfoton is 1000 tot 100.000 eV. Eén röntgenfoton heeft daarmee ruim voldoende energie om een elektron van een atoomkern los te slaan, zodat positieve ionen ontstaan. Röntgenstraling heeft ioniserende werking en wordt daarom **ioniserende straling** genoemd. Weefsel dat in aanraking komt met röntgenstraling wordt beschadigd. Eén röntgenfoton is in staat om een groot aantal chemische bindingen kapot te maken, waardoor radicalen (kapotte bindingen) ontstaan. Als radicalen worden gevormd in het DNA-molecuul kan een cel zich ongeremd gaan delen. Het organisme krijgt dan kanker. Blootstelling aan ioniserende straling moet daarom zoveel mogelijk worden vermeden.

De hoeveelheid geabsorbeerde straling per kilogram wordt de **stralingsdosis** genoemd en wordt uitgedrukt in de eenheid **sievert (Sv)**. Ook bij kernfysica gebruik je de sievert als eenheid van de equivalente stralingsdosis.

Eén sievert is één joule geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram.

Een mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling. Per jaar ontvang je ongeveer 1,7 mSv aan ioniserende straling door natuurlijke bronnen uit de omgeving. Daar bovenop ontvang je gemiddeld zo'n 1,1 mSv per jaar door röntgenstraling voor medische diagnostiek. Het totaal van 2,8 mSv per jaar is zo weinig dat je lichaam in staat is om de opgelopen schade te repareren. Een gezond lichaam heeft immers een goed ontwikkeld herstellend vermogen. Als de stralingsdosis veel groter is, bijvoorbeeld duizend keer zo groot, dan is je lichaam niet meer in staat om alle schade te repareren en heb je een grote kans dat je afweermechanisme onherstelbaar wordt beschadigd en je na enige tijd overlijdt. Bij een stralingsdosis van 50 sievert overlijdt je al na enkele uren of dagen.

11.4 Samenvatting

Grootheden, eenheden en constanten

- T is de trillingstijd in seconde (s)
- f is de frequentie in hertz (Hz)
- λ is de golflengte in meter (m)
- c is de lichtsnelheid $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ Binas tabel 7A
- h is de constante van Planck $h = 6,62607 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ Binas tabel 7A
- k_W is de constante van Wien $k_W = 2,89777 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$ Binas tabel 7A
- $\lambda_{\max}$ is de golflengte die het meest wordt uitgestraald in meter (m)
- T is de absolute temperatuur in kelvin (K)

Weten

- T en f bepalen de kleur van een lichtgolf.
De amplitude bepaalt de intensiteit van het licht.
- Elektromagnetische golven verspreiden zich in vacuüm met de lichtsnelheid.
- Zichtbaar licht heeft een golflengte tussen 400 nm (violet) en 750 nm (rood).
- Het elektromagnetische spectrum gaat van radiogolven (grote golflengte) naar gammastralen (kleine golflengte).
- De golflengte die het meest wordt uitgezonden $\lambda_{\max}$ is omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur. [wet van Wien](#)
- Fotonen zijn pakketjes lichtenergie. De hoeveelheid energie is recht evenredig met de frequentie.
- Röntgenstralen ontstaan als elektronen met hoge snelheid op metaal botsen.
- Röntgenstralen hebben een kleine golflengte en dus veel fotonenergie. Het is ioniserende straling en is daarom gevaarlijk.
- Röntgenstraling wordt meer geabsorbeerd door bot dan door zacht weefsel. Op een röntgenfoto zijn vooral botten goed te zien. Zwarte delen op een foto hebben veel röntgenstraling doorgelaten.
- Bij een CT-scan worden veel röntgenfoto's onder verschillende hoeken gemaakt.

Formules

$$f = \frac{1}{T} \quad \leftrightarrow \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{trillingstijd en frequentie}$$

$$c = f \cdot \lambda$$

c is de lichtsnelheid in vacuüm

$$\lambda_{\max} \cdot T = k_W$$

de wet van Wien

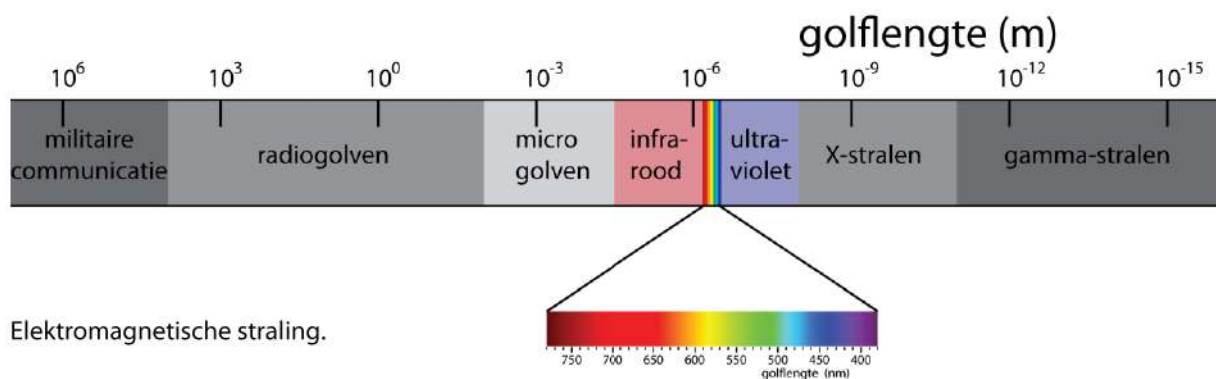
$$T (\text{kelvin}) = T (^\circ\text{C}) + 273,15$$

de absolute temperatuur

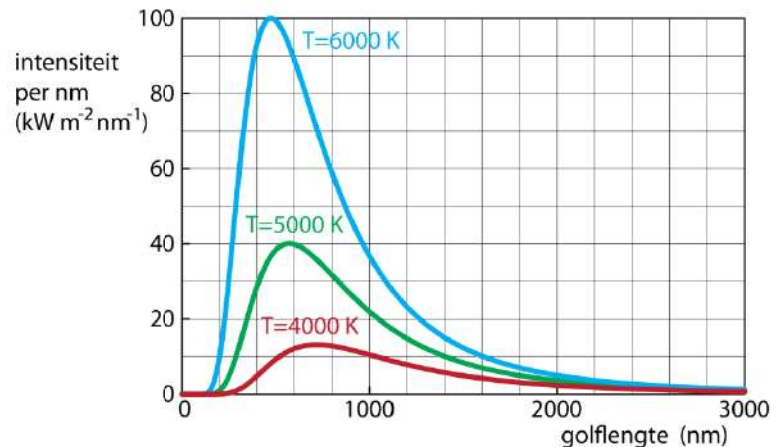
$$E_f = h \cdot f$$

de energie van een foton

Figuren



Als de temperatuur toeneemt verschuift de grafiek. De golflengte met de grootste intensiteit per nanometer $\lambda_{\max}$ wordt kleiner en er wordt veel meer straling uitgezonden.



CT-scanner. De röntgenbron en de detector draaien tegelijkertijd om de patiënt van verschillende kanten te fotograferen.

