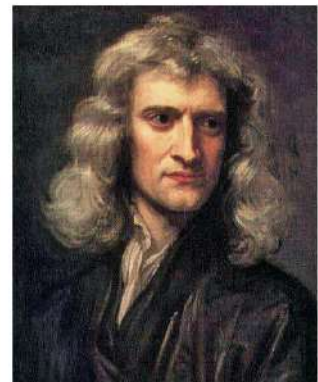


13 Elektromagnetische straling vwo

13.0 Inleiding

Isaac Newton (1643–1727) heeft niet alleen de wetten van de mechanica ontdekt, zijn interesse ging ook uit naar licht. Volgens hem bestaat licht uit een stroom van deeltjes. Een lichtbron zendt "lichtdeeltjes" uit en lichtstralen zijn de banen van deze deeltjes. Newton kan hiermee de rechtlijnige voortplanting en de terugkaatsing van licht verklaren. Ook het splitsen van wit licht in kleuren, zoals in een prisma of bij een regenboog, verklaart Newton door aan te nemen dat er verschillende soorten lichtdeeltjes bestaan. Maar het breken van licht aan een oppervlak volgens de wet van Snellius is minder goed te begrijpen met het **deeltjesmodel**.



Isaac Newton

Christiaan Huygens (1629–1695) denkt er anders over. Volgens hem is licht een golf. Net als geluidsgolven door de lucht, verspreidt licht zich in de ruimte. Volgens Huygens is een lichtbron een trillingsbron en zijn lichtstralen de banen waarlangs de golf zich uitbreidt. Met het golfmodel kan de terugkaatsing en breking van licht goed worden verklaard. De rechtlijnige voortplanting van licht en schaduwvorming, die daarvan het gevolg is, past minder goed in het **golfmodel**, want als een golf een voorwerp ontmoet dat niet veel groter is dan de golflengte buigt de golf om dit voorwerp heen.



Christiaan Huygens

Na ruim honderd jaar discussie wordt in 1803 de zaak opgehelderd door **Thomas Young** (1773–1829). Hij toont aan dat licht, net als watergolven en geluidsgolven, **interferentie** vertoont. Als twee lichtstralen met dezelfde sterkte en golflengte worden gecombineerd ontstaat er een staande golf met buiken en knopen. Bij een knoop is het donker en bij een buik is er extra veel licht. Interferentie is met een deeltjesmodel onmogelijk te verklaren en dus moet licht een golf zijn.



Thomas Young

Maar wat beweegt er als een lichtgolf zich door de ruimte verplaatst? Bij watergolven beweegt het water en bij geluidsgolven de lucht, maar wat beweegt er bij licht? Er moet een medium zijn dat de hele ruimte vult en dit medium wordt de **ether** genoemd. Opnieuw brandt er een discussie los, dit keer over de ether. Wat zijn de eigenschappen van de ether en hoe kan het zijn dat de aarde en de planeten zonder wrijving door de ether bewegen?

Om de werking op afstand van elektrische en magnetische krachten te begrijpen introduceert **Michael Faraday** (1791–1867) het idee van een veld. Er is een elektrisch veld (E-veld) en een magnetisch veld (B-veld). Dit is een gouden greep, want hiermee stelt **James Clerk Maxwell** (1831–1879) vier vergelijkingen op waarmee alle elektrische en magnetische verschijnselen op overzichtelijke wijze wiskundig worden beschreven. Uit deze vergelijkingen volgt ook dat velden zich verspreiden met de lichtsnelheid en dat licht een elektromagnetisch verschijnsel is. Dit is één van de grootste natuurkundige ontdekkingen die ooit is gedaan.

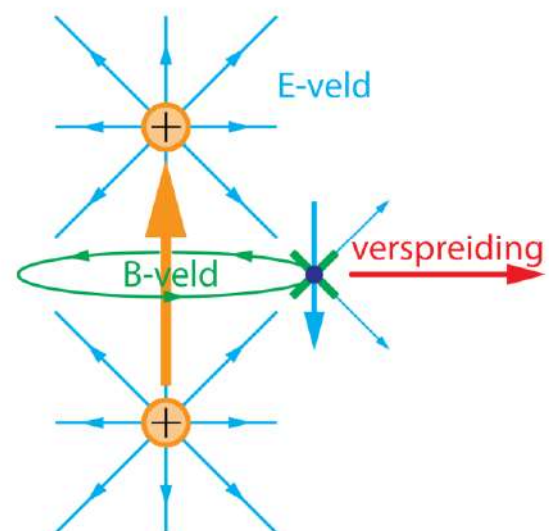


James Clerk Maxwell

Om te begrijpen hoe licht tevoorschijn komt uit de vergelijkingen van Maxwell heb je wiskunde nodig die je nog niet hebt gehad. Het is daarom onmogelijk om de vergelijkingen te snappen, maar omdat je ze af en toe tegenkomt op T-shirts en koffiemokken sta ik er toch even bij stil.

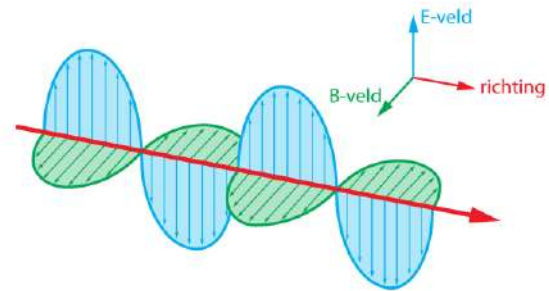
vergelijking	Betekenis
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Elektrische lading ρ veroorzaakt een elektrisch veld $\mathbf{E}$.
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Een verandering van het B-veld veroorzaakt een E-veld.
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Magnetische lading bestaat niet. Magnetische veldlijnen gaan in een kring.
$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	Elektrische stroom $\mathbf{J}$ en een verandering van het E-veld veroorzaken een B-veld. μ_0 en ϵ_0 zijn getallen.

Om je voor te stellen hoe licht ontstaat kijken we naar een positieve lading die op en neer trilt. In de figuur hiernaast zie je een positieve lading die omhoog beweegt. Doordat de lading beweegt verandert in punt P (paarste stip) de richting van het E-veld (blauw). Deze verandering is omlaag gericht. De beweging van de lading veroorzaakt ook een B-veld en die is naar achteren gericht (het papier is, aangegeven met $\times$). Als de lading heen en weer trilt wisselen het E-veld en B-veld steeds van richting.



Verandering van het E-veld en B-veld door het trillen van lading.

De veranderingen in het E-veld en B-veld verspreiden zich in de ruimte. De richting van deze verspreiding staat loodrecht op de richting van het E-veld en loodrecht op de richting van het B-veld. De snelheid van deze verspreiding is $v_{\text{golf}} = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ en als je ϵ_0 en μ_0 invult vind je $v_{\text{golf}} = 3,00 \cdot 10^8$ m/s.



Verspreiding van een elektromagnetische golf.

In 1849 bepaalt **Hippolyte Fizeau** (1819–1896) met een snel roterend tandwiel de lichtsnelheid en meet $3,15 \cdot 10^8$ m/s. In 1862 verbetert **Léon Foucault** (1819–1868) de nauwkeurigheid door met een roterende spiegel te werken en hij vindt $2,98 \cdot 10^8$ m/s. Maxwell realiseert zich dat licht hetzelfde is als de door hem berekende elektromagnetische golf.

In 1887 wekt **Heinrich Hertz** (1857–1894) met wisselstroom elektromagnetische straling op die hij verderop in zijn laboratorium kan waarnemen en demonstreert dat de snelheid van deze straling gelijk is aan de lichtsnelheid. Ook andere door de Maxwellvergelijkingen voorspelde eigenschappen van elektromagnetische straling komen overeen met de resultaten van Hertz. Hij denkt dat zijn ontdekking geen enkel nut heeft maar daarin vergiste hij zich, want draadloze communicatie is niet meer weg te denken uit ons dagelijks leven.



Heinrich Hertz

De ontdekking van Hertz wordt snel opgepikt door verschillende mensen. In 1890 begint **Guglielmo Marconi** (1874–1937) te experimenteren met radiogolven, in 1899 zendt hij de eerste radioberichten tussen Engeland en Frankrijk en in 1901 lukt het hem om morsesignalen over de Atlantische oceaan te zenden, waarmee hij bewijst dat radiogolven zich tot achter de horizon kunnen voortplanten.

Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) onderzoekt in 1895 het gedrag van kathodestralen. Dat zijn elektronen die door vacuüm bewegen, maar dat was toen nog niet bekend. Bij toeval ontdekt hij dat kathodestralen een ander type straling opwekt die door de glazen wand van de vacuümbuis en door de lucht een fotografische plaat kan laten verkleuren. Kathodestralen (elektronen) kunnen niet door een glazen wand en door de lucht en dus moet er nieuwe onbekende straling zijn ontstaan. Röntgen noemt deze straling x-straling, omdat x gebruikt wordt als onbekende variabele in de wiskunde. Voor zijn ontdekking ontvang hij in 1901 de allereerste Nobelprijs in de natuurkunde.



Wilhelm Conrad Röntgen

Door al deze ontdekkingen wordt de theorie van Maxwell door velen aanvaard, maar er is nog wel iets dat niet klopt. Het uitstralen van licht door een voorwerp met een hoge temperatuur kan niet door de Maxwells theorie worden verklaard. Het waargenomen spectrum wijkt sterk af van wat de theorie voorspelt. Er moet dus iets mis zijn met de theorie.

Max Planck (1858–1947) toont in 1900 aan dat het waargenomen spectrum wel verklaard kan worden als je aanneemt dat licht wordt uitgezonden in energiepakketjes. Dit resultaat past niet bij de golftheorie van licht maar meer bij Newtons idee van lichtdeeltjes. Planck denkt dat zijn berekeningen toevallig het juiste spectrum voorspellen maar dat ze natuurkundig onjuist zijn. **Albert Einstein** (1879–1955) is het daar niet mee eens. Want met het idee van Planck kan hij in 1905 ook het foto-elektrische effect verklaren. Het opvatten van licht als deeltje is de eerste stap op weg naar de kwantummechanica, waarin de golftheorie en de deeltjestheorie met elkaar zijn verenigd.



Max Planck

Inhoud

13.1	Licht als golf	6
	– Eigenschappen van golven	6
	– Buiging (diffractie) van licht	7
	– Lichtmicroscop	7
	– Fotolithografie	8
	– Interferentie van licht	8
	– Een tralie	9
	– Het maken van een kleurenspectrum met een tralie	11
	– Het elektromagnetisch spectrum	12
13.2	Licht als deeltje: fotonen	13
	– Warmtestraling	13
	– Intensiteit van elektromagnetische straling	15
	– De (omgekeerde) kwadratenwet	16
	– Fotonen	17
13.3	Absorptie en emissie van licht	18
	– Lichtbronnen	18
	– Spectroscopie	19
	– Atoomspectroscopie	19
	– Gestimuleerde emissie in een laser	21
13.4	Röntgenstraling	22
	– Het opwekken van röntgenstralen	22
	– Medische toepassingen van röntgenstralen	24
	– Veiligheid	25
13.5	Magnetische resonantie: MRI	26
	– De spin van elektronen en protonen	26
	– MRI als diagnostische methode	27
	– De T1 tijd	28
	– De T2 tijd	28
	– MRI vergeleken met Röntgen	29
13.6	Samenvatting	30
	– Grootheden en eenheden	30
	– Weten	30
	– Formules	31
	– Figuren	32

13.1 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 verplaatst. 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 c niet afhankelijk van de frequentie en ook niet van de amplitude.

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

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

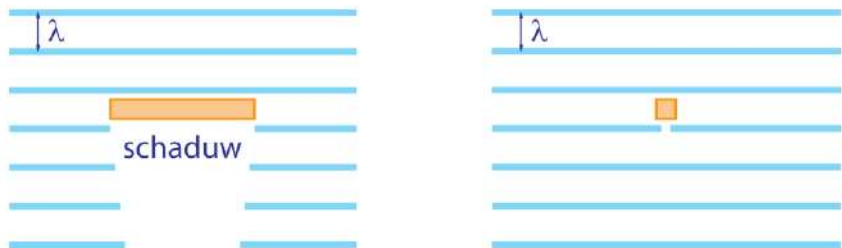
Golflengte (λ)

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 $\lambda = c / f = 3,0 \cdot 10^8 / 5,0 \cdot 10^{14} = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 600 \text{ nm}$.

$$c = f \cdot \lambda$$

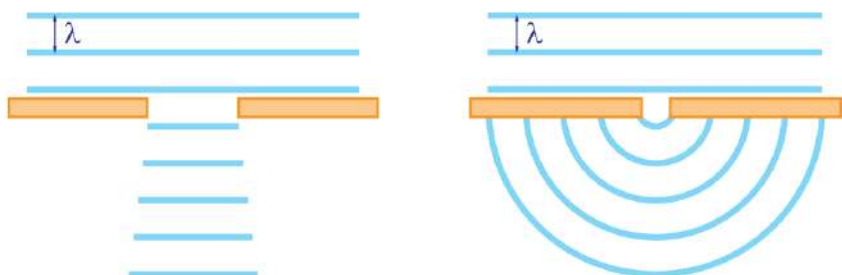
Buiging (diffractie) van licht

Als een golf een object tegenkomt dat groter is dan de golflengte wordt deze teruggekaatst of geabsorbeerd. Achter het object ontstaat een gebied zonder golven, de schaduw. Maar als het object kleiner is dan de golflengte gebeurt dit niet. De golf trekt zich dan niets aan van het object en buigt er omheen. Zo buigen watergolven om de pijlers van een brug en gaan daarna ongestoord verder. Lichtgolven buigen ook om voorwerpen die kleiner zijn dan de golflengte, maar omdat de golflengte van licht zo klein is merk je daar in het dagelijks leven niets van. Alleen als je met een microscoop naar kleine objecten kijkt ga je wel merken dat licht om voorwerpen heen kan buigen. Zie figuur 1.



Figuur 1 Het buigen van een lichtgolf om kleine objecten.

Een vergelijkbaar verschijnsel treedt op als licht door een opening gaat. Zie figuur 2. Is de opening groter dan de golflengte van het licht dan gaat het licht zonder waarneembare afbuiging er doorheen. Maar als de opening kleiner is dan de golflengte gaat het licht er niet gewoon doorheen. De opening gaat dan als nieuwe lichtbron (trillingsbron) fungeren en uit deze nieuwe lichtbron ontstaat een nieuwe lichtgolf die alle kanten uitgaat. Dit is het principe van **Christiaan Huygens** (1629 – 1695).



Figuur 2 Het buigen van een lichtgolf bij een kleine opening.

Lichtmicroscoop

Dat licht om kleine voorwerpen heen buigt is merkbaar in een lichtmicroscoop. Voorwerpen kleiner dan de golflengte kun je niet scherp waarnemen. Als het licht waarmee je kijkt een golflengte van 500 nm heeft worden voorwerpen kleiner 500 nm vaag. Zo is een virus 30 tot 300 nm groot en daarom onzichtbaar in een lichtmicroscoop.

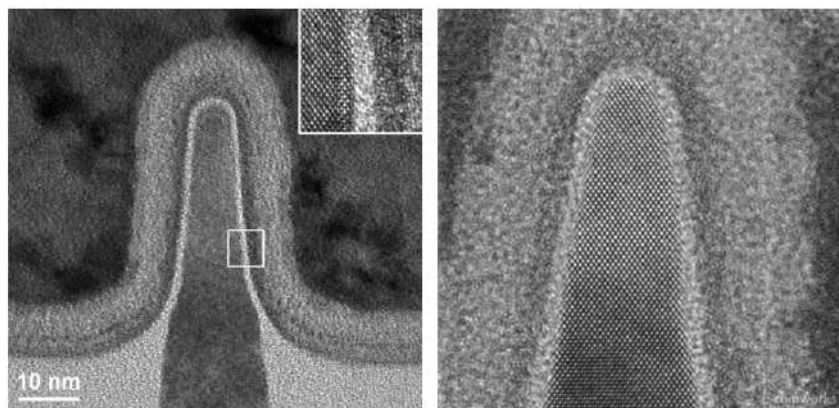
Om kleinere voorwerpen toch waar te kunnen nemen moet je licht gebruiken met een kleinere golflengte, zoals blauw of ultraviolet licht. Maar je kunt ook röntgenstraling gebruiken of elektronen die ook golfeigenschappen hebben. In een elektronenmicroscoop versnel je elektronen tot bijna de lichtsnelheid, waardoor ze een golflengte krijgen van bijvoorbeeld 1,0 nm. Je kunt virussen dan wel waarnemen. Zie figuur 3.



Figuur 3 Een virus waargenomen met een elektronenmicroscoop.

Fotolithografie

Afbuiging van licht speelt ook een rol in de **fotolithografie**. Bij de fabricage van chips worden afbeeldingen op een plakje silicium gemaakt om elektronische componenten, zoals transistoren, te vervaardigen. Hierbij wordt fotolithografie gebruikt. Een dia waarop de elektronische schakeling is getekend wordt zo klein mogelijk op een plakje zuiver silicium geprojecteerd. Doordat componenten steeds kleiner worden speelt de golflengte van het licht een grote rol. Voor gewone chips wordt ultraviolet licht van 193 nm gebruikt waarmee je niet kleiner dan 50 nm kunt projecteren. Maar voor betere en snellere chips is dit niet meer voldoende en heb je licht van een kleinere golflengte nodig. De beste technologie die nu beschikbaar is, is ontwikkeld door het Nederlandse bedrijf ASML. Het is hen gelukt om extreem ultraviolet licht (EUV) met een golflengte van 13,5 nm te maken waarmee je details van 5 nm op een chip kunt aanbrengen. In figuur 4 zie je een 22 nm 3D transistor. De afmeting van deze transistor is zo klein dat je de siliciumatomen kunt zien.

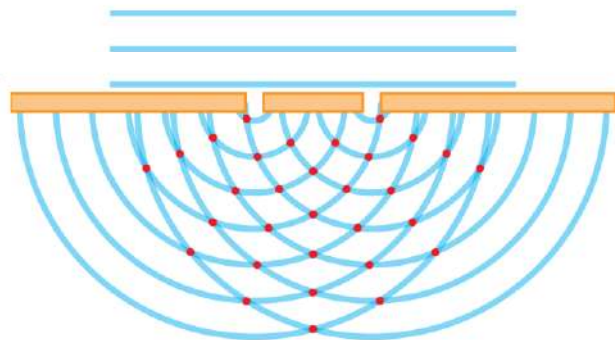


Figuur 4 Een 22 nm transistor gemaakt met EUV lithografie.

Interferentie van licht

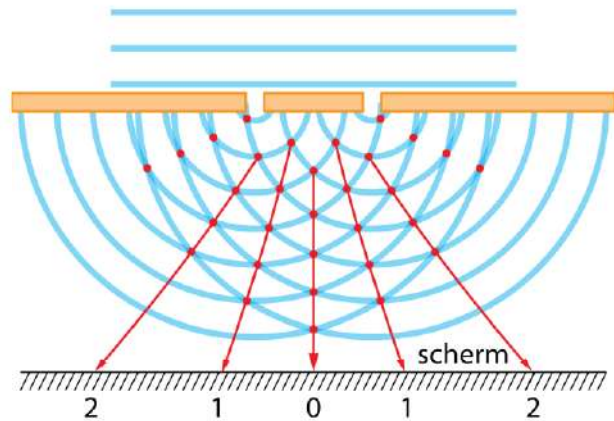
Een bekende eigenschap van golven is dat ze met elkaar kunnen **interfereren** en dit geldt dus ook voor lichtgolven. Voor interferentie van licht heb je twee of meer **coherente lichtbronnen** nodig. Dit zijn lichtbronnen met precies dezelfde frequentie en die op hetzelfde tijdstip aan een nieuwe trilling beginnen. Het licht uit deze bronnen verspreid zich door de ruimte. Op plaatsen waar de lichtgolven dezelfde gereduceerde fase hebben versterken ze elkaar, waardoor de amplitude (lichtintensiteit) extra groot wordt. Op plaatsen waar de lichtgolven een tegengestelde fase hebben doven ze elkaar uit. De amplitude (lichtintensiteit) is op deze plaatsen nul.

Stuur je licht afkomstig uit één lichtbron door twee vlak naast elkaar gelegen spleten, dan worden deze spleten coherente lichtbronnen. Het licht uit deze lichtbronnen interfereert, waardoor heldere en donkere gebieden ontstaan. In figuur 5 zie je een dubbele spleet en zijn de plaatsen waar versterking optreedt aangegeven met rode stippen.



Figuur 5 Bij de rode stippen is er constructieve interferentie.

Als je het licht op een scherm laat vallen zie je plaatsen met veel licht en plaatsen waar weinig licht komt. In figuur 6 zie je de lichtbundels die door constructieve interferentie ontstaan. Waar ze op het scherm komen zie je plaatsen met veel licht. De cijfers onder aan het scherm geeft de orde van de interferentie aan.



Figuur 6 Waar de rode pijlen op het scherm komen zie je lichtvlekken. Tussen de rode pijlen is het donker.

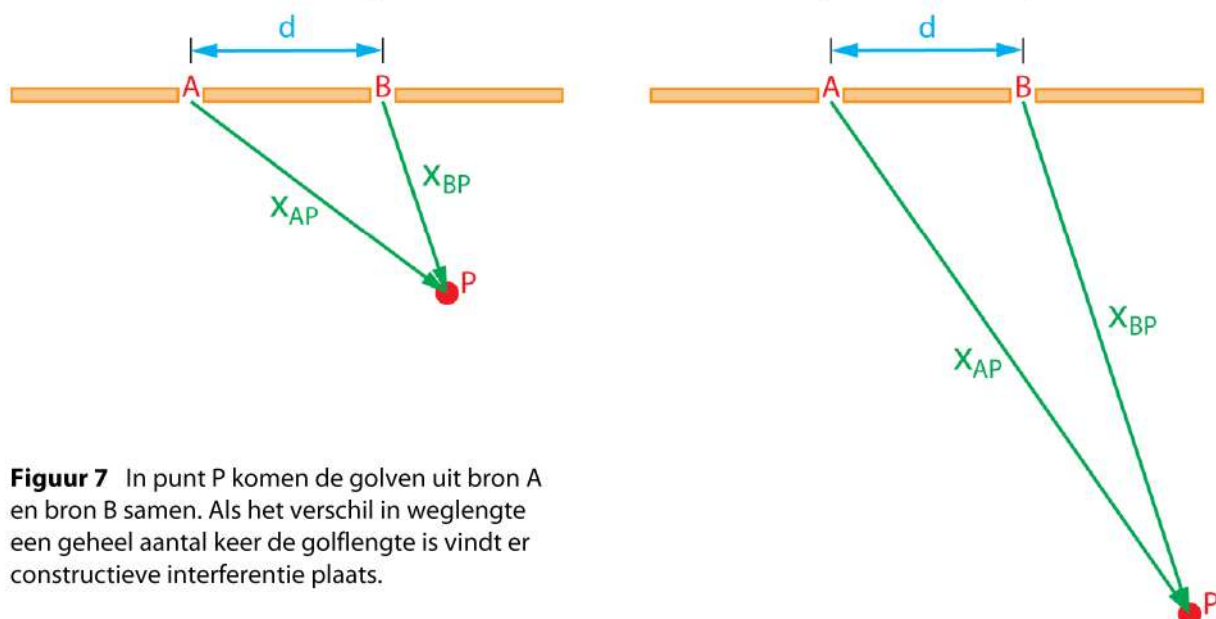
Een tralie

Bij een tralie gaat het licht niet door twee spleten, maar door een groot aantal smalle evenwijdige spleten op regelmatige afstand van elkaar. Omdat nu veel coherente lichtbronnen samenwerken is het interferentie-effect sterker. Op een scherm zie je heldere strepen op plaatsen waar de lichtstralen elkaar versterken. De lichtstraal midden achter de tralie heeft de grootste intensiteit en wordt de 0^e orde genoemd. Daarnaast komen aan weerszijden de 1^e orde stralen, dan de 2^e orde etc. Zie figuur 6. Wat je bedoelt met de orde van interferentie wordt zo meteen duidelijk.

In het hoofdstuk Golven heb je geleerd je dat constructieve interferentie in punt P optreedt als het verschil in weglengte tussen P en de bronnen A en B een geheel aantal keer de golflengte is. In figuur 7 zie je twee spleten A en B en punt P. De afstand tussen A en P is x_{AP} en de afstand tussen B en P is x_{BP} . Constructieve interferentie treedt op als:

$$x_{BP} - x_{AP} = n \cdot \lambda \quad \text{met} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

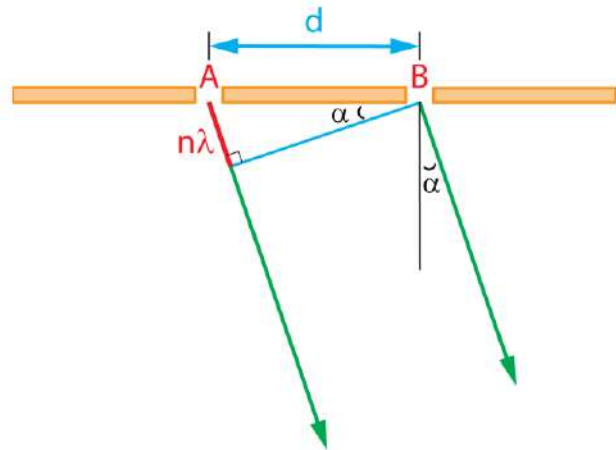
Links in figuur 7 ligt punt P vlakbij de spleten A en B. De groene pijlen geven aan hoe lichtstralen uit de spleten naar punt P gaan. Maken we de afstand tussen P en de spleten groter dan gaan de lichtstralen steeds meer parallel lopen. Zie figuur 7 rechts. Hoe groter de afstand tussen P en de spleten is hoe meer de lichtstralen parallel gaan lopen.



Figuur 7 In punt P komen de golven uit bron A en bron B samen. Als het verschil in weglengte een geheel aantal keer de golflengte is vindt er constructieve interferentie plaats.

In figuur 8 zie je een situatie waarbij de afstand tussen P en de spleten A en B zo groot is dat de lichtstralen vrijwel parallel lopen. Voor deze situatie kunnen we een formule afleiden waarmee je het verschil in weglengte kunt uitrekenen. Deze formule heet de **tralieformule**.

Figuur 8 Op grote afstand van de spleten A en B treedt constructieve interferentie op als geldt: $\sin \alpha = n \cdot \lambda / d$.



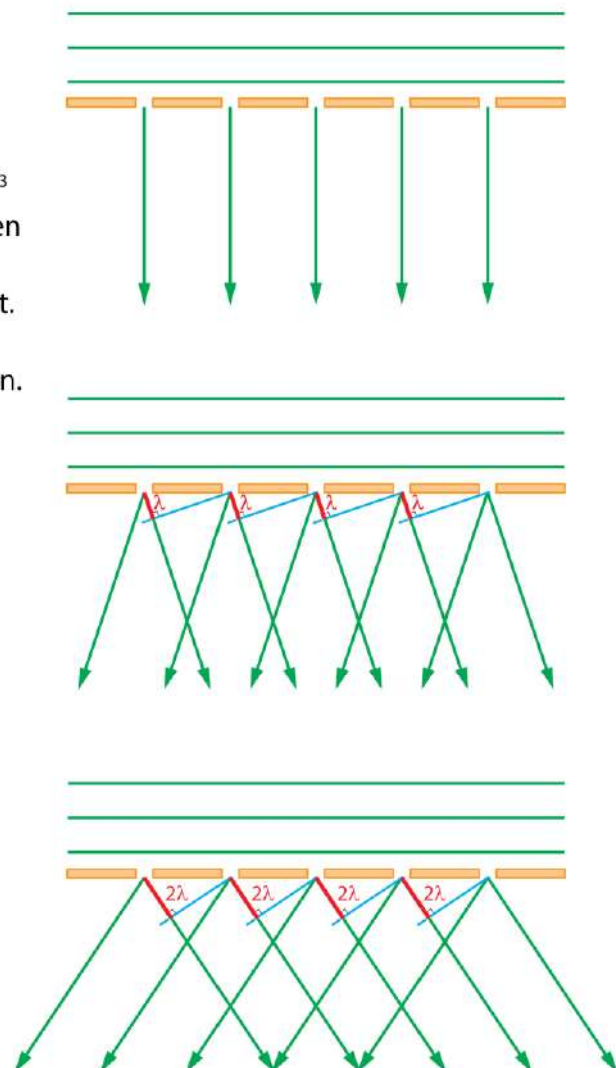
$$d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda \quad \text{met } n=0,1,2,3,\dots$$

- α is de hoek waaronder de lichtstraal wordt afgebogen in graden ($^{\circ}$)
- n is de orde van de interferentie (geen eenheid)
- λ is de golflengte in meter (m)
- d is de tralieconstante (de afstand tussen de spleten) in meter (m)

In de tralieformule is d de afstand tussen de spleten. Deze afstand noem je de **tralieconstante**. Vaak wordt de tralieconstante aangegeven in lijnen per mm. Stel dat een tralie 800 spleten per mm heeft dan zijn er $800 \cdot 10^3$ spleten per meter waardoor de afstand tussen de spleten $1 / 800 \cdot 10^3 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ meter is. In figuur 9 zie je hoe licht door een tralie gaat. De nulde orde (boven) eerste orde (midden) en tweede orde lichtbundels zijn aangegeven.

Figuur 9

Boven: tralie met $n = 0 \rightarrow 0^{\text{e}}$ orde.
Midden: tralie met $n = 1 \rightarrow 1^{\text{e}}$ orde.
Onder: tralie met $n = 2 \rightarrow 2^{\text{e}}$ orde.

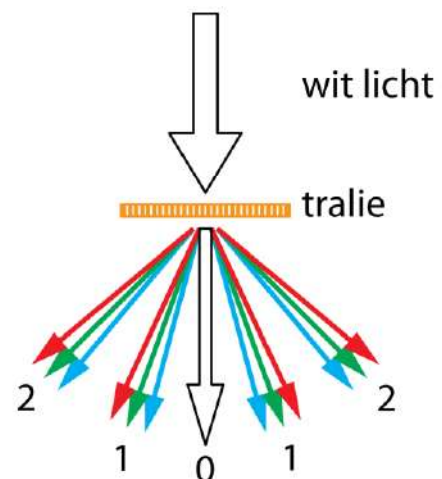


De hoek waaronder een bundel de tralie verlaat is afhankelijk van de afstand tussen de spleten én van de golflengte van het licht. Hoe kleiner de afstand tussen de spleten is hoe groter de spreiding wordt. Licht met een grotere golflengte wordt meer verspreid dan licht met een kleinere golflengte. Bij de tralie van figuur 9 gaat het licht door evenwijdige spleten. Dit zijn **transmissietralies**. Maar er zijn ook tralies waarbij het licht wordt weerkaatst door evenwijdige spiegels. Dit zijn **reflectietralies**. Het werkingsprincipe van beide type tralies is hetzelfde.

Het maken van een kleurenspectrum met een tralie

Zoals je kunt zien aan de traliefomule en in figuur 9 is de hoek waaronder een bundel de tralie verlaat afhankelijk van de golflengte van het licht. Bij de 1^e orde bundel past precies één keer de golflengte op het aangegeven lijnstuk, enz. Iedere kleur wordt onder een andere hoek doorgelaten. Met een tralie kan je daarom een kleurenspectrum maken, waarbij licht wordt gesplitst in de kleuren waaruit het is samengesteld. Een prisma kan hiervoor ook worden gebruikt, maar bij een tralie is de hoek waarmee rood en violet licht van elkaar worden gescheiden veel groter.

Met een **monochromator** en een **spectrometer** kun je licht splitsen in kleuren. Dit gebeurt meestal met een **reflectietralie**, omdat die de hoogste lichtopbrengst hebben. De hoek waarmee de verschillende kleuren van elkaar worden gescheiden is afhankelijk de **tralie-constante**. Hoe kleiner de afstand tussen de spleten is hoe groter de splitsing wordt. Tralies hebben 300 tot 3000 spleten per millimeter. In figuur 10 zie je dat wit licht uit verschillende kleuren bestaat, die met een tralie zichtbaar worden.



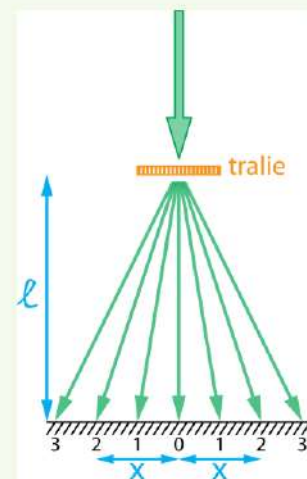
Figuur 10 Wit licht wordt door een tralie gesplitst in kleuren.

VOORBEELD de golflengte meten met een tralie

Je schijnt met een groene laser op een tralie met 250 lijnen per millimeter. Op 50,0 cm afstand van de tralie staat een scherm waarop je groene stippen ziet. Zie figuur 11. De afstand tussen de 0^e orde en 2^e orde stip is 13,8 cm.

Bepaal de golflengte van de laser.

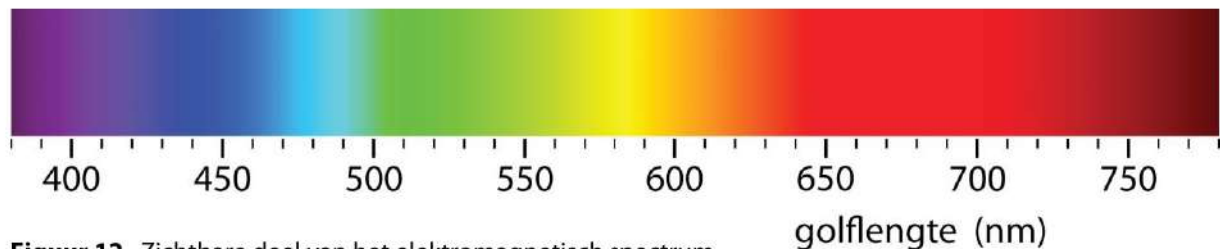
- $\tan \alpha = \frac{x}{\ell} \rightarrow \tan \alpha = \frac{13,8}{50} = 0,276 \rightarrow \alpha = 15,4295^\circ$
- $d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$
- $d = \frac{10^{-3}}{250} = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- $4,0 \cdot 10^{-6} \cdot \sin 15,4295 = 2 \cdot \lambda \rightarrow \lambda = 5,321 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 532 \text{ nm}$



Figuur 11

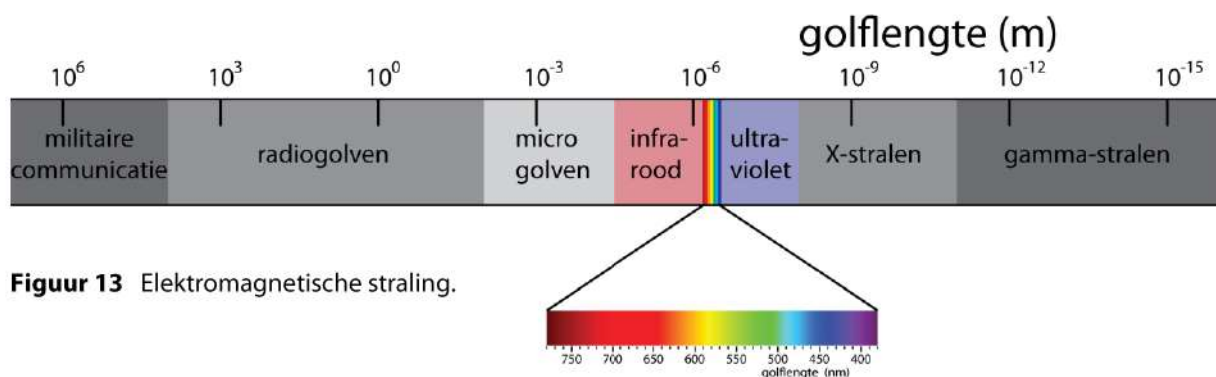
Het elektromagnetisch spectrum

Zoals we hebben gezien wordt de kleur van licht bepaald door de frequentie van de EM-straling. In figuur 12 zie je het deel van de EM-straling dat mensen kunnen zien. Een frequentiegebied noem je een **spectrum**. Omdat de frequentie en de golflengte aan elkaar zijn gerelateerd ($\lambda = c/f$) wordt meestal de golflengte gebruikt om een kleur aan te geven. I



Figuur 12 Zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum.

Zichtbaar licht is maar een klein deel van het elektromagnetisch spectrum. Behalve zichtbaar licht bevat het EM-spectrum ook radiogolven, microgolven, infrarood, ultraviolet, röntgenstraling en gammastraling. Zie figuur 13. 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. In tabel 1 staan verschillende soorten EM-straling.



Figuur 13 Elektromagnetische straling.

Tabel 1 Verschillende soorten EM-straling.

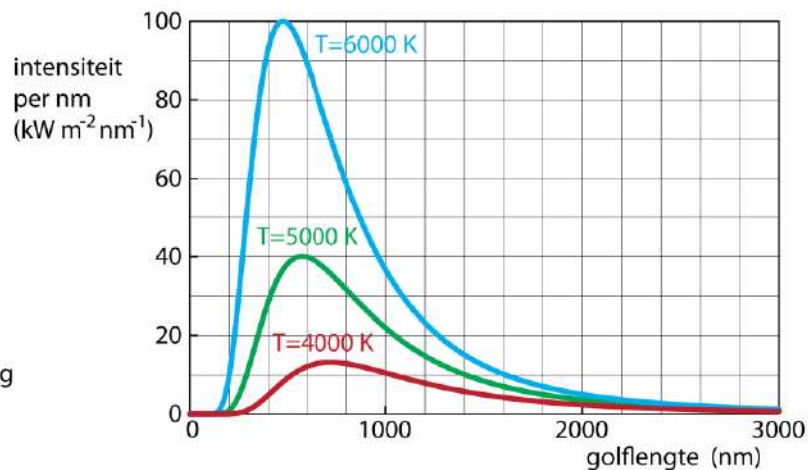
Naam	Golflengte (m)	Frequentie (Hz)	Energie (eV)
radio lange golf	10^3	10^5	10^{-9}
radio midden golf	10^2	10^6	10^{-8}
radio korte golf	10^1	10^7	10^{-7}
microgolven magnetron	10^{-1}	10^{10}	10^{-4}
microgolven radar	10^{-2}	10^{11}	10^{-3}
infrarood	10^{-4}	10^{13}	10^{-1}
nabij infrarood	10^{-6}	10^{14}	10^0
zichtbaar licht	$4 - 7 \cdot 10^{-7}$	$4 - 8 \cdot 10^{14}$	$1,7 - 3,1$
ultraviolet	10^{-7}	10^{15}	10^1
zachte röntgen	10^{-9}	10^{17}	10^3
harde röntgen	10^{-11}	10^{19}	10^5
zachte gamma	10^{-12}	10^{20}	10^6
harde gamma	10^{-14}	10^{22}	10^8

13.2 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. Snel daarna 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 14 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. Omdat een zwart lichaam geen EM-straling teruggekaatst heeft het geen kleur, wat de naam verklaart.

In figuur 14 staat op de verticale as het uitgestraalde vermogen per vierkante meter per nanometer. Op de horizontale as staat de golflengte.



Figuur 14 Warmtestraling door een zwart-lichaam.

De golflengte van de straling die het meest wordt uitgezonden geef je aan met $\lambda_{\max}$ en zoals je ziet in figuur 14 verschuift $\lambda_{\max}$ naar een kleinere waarde (hoge energie) als de temperatuur toeneemt. Bij 3000 K is 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 in kelvin.

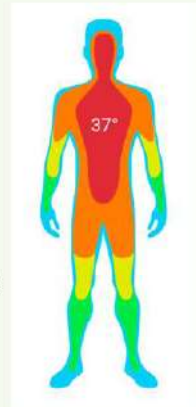
$$\lambda_{\max} \cdot T = k_W$$

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

De temperatuur in kelvin is de absolute temperatuur en is gelijk aan de temperatuur in °C plus 273,15. Het absolute nulpunt ligt bij nul K wat gelijk is aan -273,15 °C.

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.

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

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

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

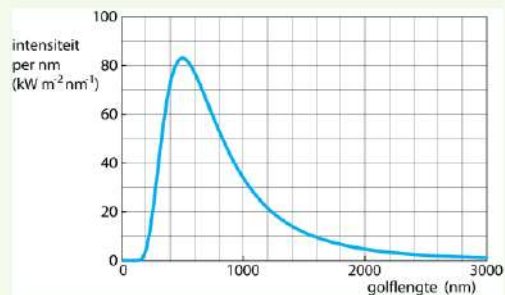
Omdat de temperatuur van je huid lager is dan 37 °C is de golflengte die je het meest uitstraalt anders dan die bij 37 °C.

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

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

VOORBEELD zonlicht

Vanwege de hoge temperatuur van het oppervlak straalt de zon zichtbaar licht uit. In figuur 15 zie je de uitgestraalde intensiteit per nm als functie van de golflengte.



Figuur 15

Bepaal de temperatuur van het oppervlak van de zon.

- aflezen $\lambda_{\text{max}} = 501\text{ nm} = 501 \cdot 10^{-9}\text{ m}$
- $\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_W$ 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.

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

Hoe heet elektromagnetische straling met deze golflengte?

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

In figuur 14 zie je dat bij een hogere temperatuur meer licht wordt uitgestraald dan bij een lagere temperatuur. De hoeveelheid uitgestraalde energie per seconde bereken je met de **wet van Stefan-Boltzmann**.

$$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A_{\text{bron}} \cdot T^4$$

- P_{bron} is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- A_{bron} is de oppervlakte van de stralingsbron in vierkante meter (m^2)
- σ is de constante van Stefan-Boltzmann | $\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- T is de temperatuur van de stralingsbron in kelvin (K)

VOORBEELD energieverlies door uitstraling

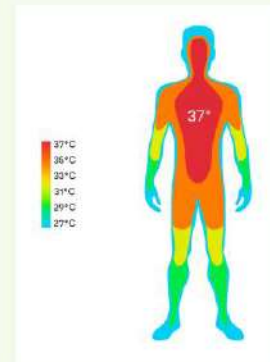
De temperatuur van je lichaam is 37°C . Hierdoor straal je elektromagnetische straling uit. Bij een volwassene heeft de huid een gemiddelde temperatuur van 35°C en een oppervlakte tussen $1,5$ en $2,0 \text{ m}^2$

Bereken hoeveel energie een volwassene met $2,0 \text{ m}^2$ huidoppervlak in één dag (24 uur) uitstraalt.

- $T = 35 + 273,15 = 308,15 \text{ K}$
- $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A_{\text{bron}} \cdot T^4$
- $P_{\text{bron}} = 5,67037 \cdot 10^{-8} \cdot 2,0 \cdot (308,15)^4 = 1,02256 \cdot 10^3 \text{ W}$
- in 24 uur $\rightarrow E = P \cdot t \rightarrow E = 1,02256 \cdot 10^3 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 8,83494 \cdot 10^7 = 8,8 \cdot 10^7 \text{ J}$

Leg uit waarom het energieverlies per dag veel minder is dan $8,8 \cdot 10^7 \text{ J}$.

- je lichaam neemt warmte uit de omgeving op
- het energieverlies is het verschil tussen de uitgestraalde en de opgenomen warmte
- dit wordt bepaald door het verschil in temperatuur tussen je huid en de omgeving



Intensiteit van elektromagnetische straling

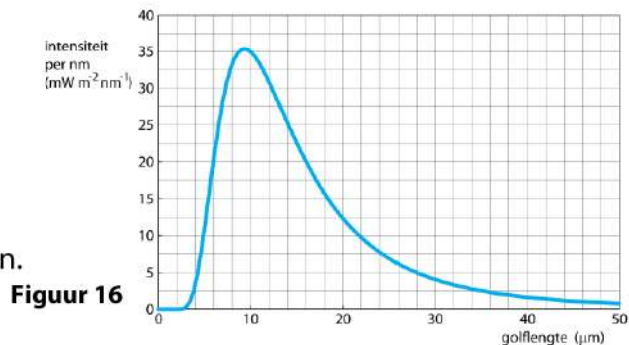
De **intensiteit** van elektromagnetische straling is de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een oppervlakte van één vierkante meter gaat. Stel dat je bij het waarnemen van straling een detector gebruikt met oppervlakte A , dan bereken je de intensiteit door de stralingsenergie per seconde in je detector te delen door oppervlakte A . Hierdoor is de gemeten intensiteit onafhankelijk van de oppervlakte van je detector, want als je een detector gebruikt met twee keer zoveel oppervlakte vang je twee keer zoveel stralingsenergie op maar deel je vervolgens door een twee keer zo groot oppervlak.

De intensiteit van straling is de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een oppervlak van één vierkante meter gaat.

$$I = \frac{P}{A}$$

- I is de intensiteit in watt per vierkante meter (W/m^2)
- P is de waargenomen energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- A is de oppervlakte (van de detector) in vierkante meter (m^2)

In figuur 16 zie je de intensiteit van de uitgezonden straling per nm als functie van de golflengte bij een temperatuur van 35°C . Hieruit kun je de energie uitrekenen die per seconde per vierkante meter wordt uitgestraald. Daarvoor moet je de oppervlakte onder de grafiek bepalen.



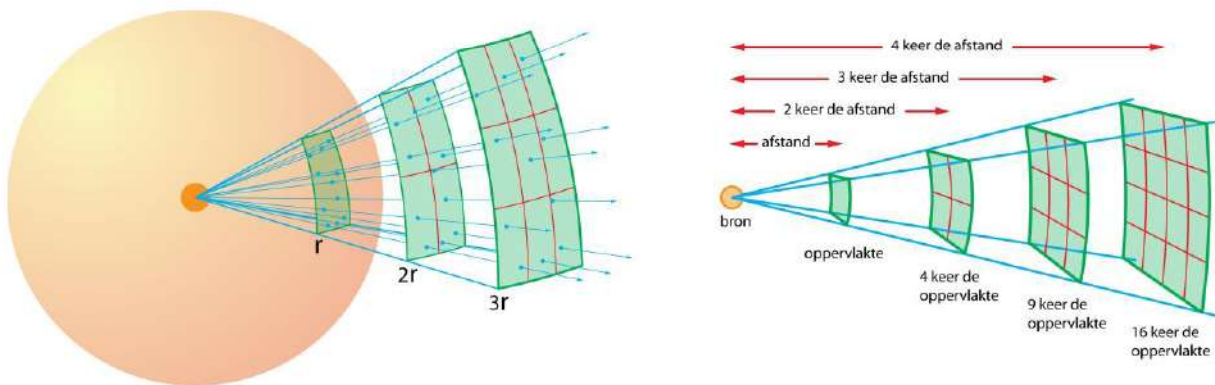
Figuur 16

De schaal loopt tot $50\ \mu\text{m}$ wat gelijk is aan $50 \cdot 10^3\ \text{nm}$. De gemiddelde intensiteit per nm is $10\ \text{mW} = 10 \cdot 10^{-3}\ \text{W} / \text{nm}$. Voor het oppervlak onder de grafiek vind je $10 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^3 = 500\ \text{W}$. Eerder zagen we dat een volwassene met een huidtemperatuur van 35°C en een huidoppervlak van $2,0\ \text{m}^2$ een uitgestraald vermogen heeft van $1000\ \text{W}$. Per m^2 is dit $500\ \text{W}$ en dit komt overeen met de oppervlakte onder de grafiek.

De oppervlakte onder de warmtestralingsgrafiek is het uitgestraalde vermogen per vierkante meter.

De (omgekeerde) kwadratenwet

Als je het vermogen van de bron én de afstand tussen de waarnemer en de bron weet kun je de intensiteit die je waarneemt uitrekenen. In het hoofdstuk Golven ben je dit al tegengekomen en het gaat als volgt. We gaan ervan uit dat de bron alle kanten evenveel energie uitstraalt. Zie figuur 17. P_{bron} is de uitgestraalde energie per seconde en deze energie verdeelt zich over de oppervlakte van een bol. De afstand tussen de bron en de detector is de straal van deze bol. Voor de intensiteit op afstand r geldt: $I = P_{\text{bron}} / 4\pi \cdot r^2$ en dit staat bekend als de (omgekeerde) kwadratenwet.



Figuur 17 De (omgekeerde) kwadratenwet.

$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$$

- I is de intensiteit van de straling in watt per vierkanter meter (W/m^2)
- P is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- r is de afstand tussen de bron en de waarnemer in meter (m)

VOORBEELD infraroodcamera

Een volwassene straalt een vermogen uit van 1000 W. Op 10 meter afstand staat een infraroodcamera met een diameter van 6,0 cm.

Bereken de intensiteit die de camera waarneemt.

- kwadratenwet $\rightarrow I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$
- $I = \frac{1000}{4\pi \cdot 10^2} = 0,795775 = 0,80 \text{ W m}^{-2}$

Bereken hoeveel stralingsenergie de camera per seconde ontvangt.

- $A_{\text{detector}} = \pi \cdot r^2 \rightarrow A_{\text{detector}} = \pi \cdot (3,0 \cdot 10^{-2})^2 = 2,82743 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- $P_{\text{detector}} = I \cdot A_{\text{detector}} \rightarrow P_{\text{detector}} = 0,795775 \cdot 2,82743 \cdot 10^{-3} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ W}$

Fotonen

Het verloop van de grafieken in figuur 14 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. 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 eV = $1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$** .

13.3 Absorptie en emissie van licht

Lichtbronnen

Licht wordt uitgestraald door een lichtbron. Er zijn drie manieren om licht te maken.

- Een voorwerp op hoge temperatuur brengen (gloeilamp).
- Een plasma maken in een gas (vuur, TL-buis en spaarlamp).
- Elektronen naar een lage energietoestand laten vallen (LED-lamp).

– Gloeilamp en halogeenlamp –

In een gloeilamp en halogeenlamp zit een gloeidraad van wolfram in een vacuüm glazen omhulsel. Als er stroom door de gloeidraad gaat krijgt deze een temperatuur van meer dan 2500 °C. Bij deze temperatuur wordt zichtbaar licht uitgestraald. Het uitgezonden licht bevat golflengtes tussen 450 en 10.000 nm. Alleen het deel tussen 400 en 750 nm is zichtbaar, de rest is onzichtbare infrarode straling. Meer dan 90% van de uitgezonden elektromagnetische straling is buiten het zichtbare gebied, waardoor gloeilampen en halogeenlampen een laag rendement hebben.



– TL-buis en spaarlamp –

Een TL-lamp en spaarlamp is een buisje gevuld met argon of neon gas met een verlaagde druk. Het gas wordt ontstoken met een korte hoogspanningspuls, waardoor er stroom gaat lopen. Door de puls schieten elektronen los van de atoomkernen en ontstaat er gas met geïoniseerde atomen en vrij rondvliegende elektronen. Zo'n gas heet een plasma. In een plasma bevinden zich vrije elektronen, wat elektrische geleiding mogelijk maakt. Als een losvliegend elektron wordt opgenomen door een positief ion komt er energie vrij dat als licht wordt uitgestraald. Ook in een TL-buis en spaarlamp wordt veel onzichtbaar infrarood licht uitgezonden. Maar het rendement is ongeveer vier keer groter dan dat van een gloeilamp.



– LED-lamp –

In een LED-lamp bevindt zich een **L**icht **E**mitterende **D**iode. In een LED vallen elektronen van hoge energie naar lage energie, waarbij ze licht uitstralen. In een LED-lamp wordt veel minder infrarood licht uitgezonden dan in een gloeilamp of spaarlamp. Het rendement is daarom een stuk groter.



– Lasers –

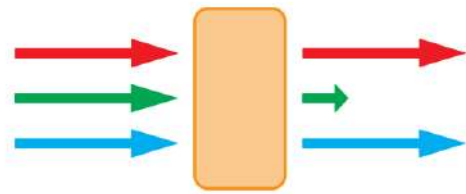
Een laser is een lichtbron met bijzondere eigenschappen. Laser staat voor **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Eigenschappen van lasers zijn:

- laserlicht heeft maar één golflengte
- lasers zenden een smalle evenwijdige lichtbundel uit
- de lichtgolven zijn met elkaar in fase (coherent)
- de lichtintensiteit is hoog



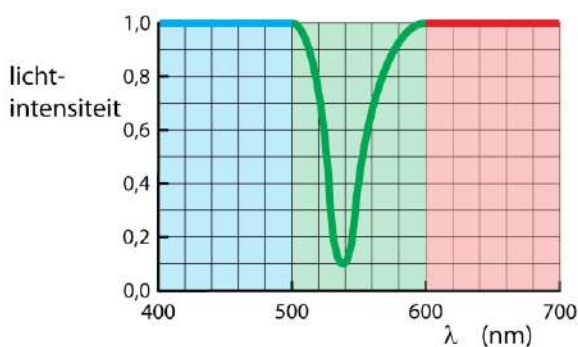
Spectroscopie

Het **absorptiespectrum** is de verzameling van opgenomen golflengtes. Om dit spectrum te verkrijgen bestraal je een stof met wit licht, waarin alle golflengtes aanwezig zijn. De stof neemt fotonen met bepaalde golflengtes op, de andere fotonen worden doorgelaten. Kijk je achter de stof dan zie je dat er golflengtes ontbreken. Zie figuur 18 en 19.

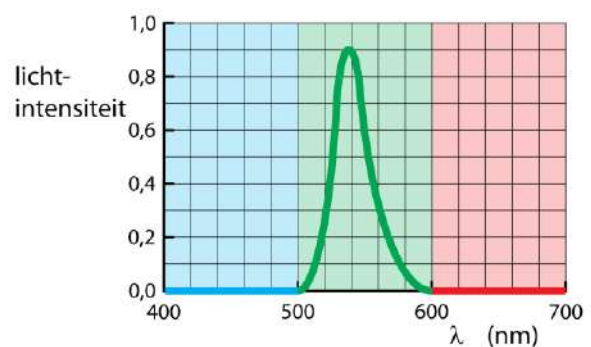


Figuur 18 Absorptiespectrum.

Het **emissiespectrum** is de verzameling van golflengtes die worden uitgezonden. Om dit spectrum te verkrijgen moet je eerst energie aan een stof toevoegen om het in een hoge-energietoestand te brengen. Vervolgens verliest de stof deze energie door het uitzenden van fotonen. Zie figuur 20.



Figuur 19 Absorptiespectrum.
Groen licht wordt geabsorbeerd.
Blauw en rood licht worden doorgelaten.



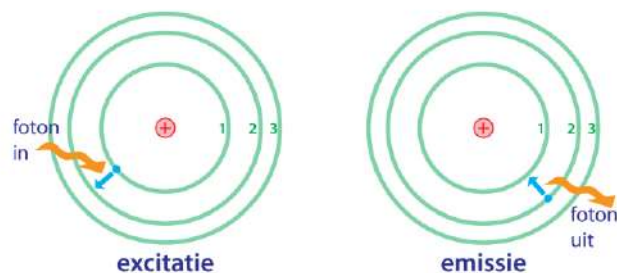
Figuur 20 Emissiespectrum.
Groen licht wordt uitgestraald.
Blauw en rood licht worden niet uitgestraald.

Atoomspectroscopie

Atomen in de gasfase bij lage druk zijn vrije atomen, want ze worden niet beïnvloed door andere atomen in hun omgeving. Vrije atomen absorberen maar enkele golflengtes en dit geeft een absorptiespectrum met scherpe lijnen. Een atoom kan alleen fotonen opnemen met een bepaalde hoeveelheid energie. Heeft een foton te weinig of te veel energie, dan wordt het niet opgenomen. Fotonen die worden opgenomen kunnen ook weer worden uitgezonden. Het emissiespectrum van vrije atomen heeft daarom ook scherpe lijnen waarvan de golflengtes precies gelijk zijn aan die van het absorptiespectrum

– waterstof –

Als voorbeeld bekijken we het spectrum van waterstof. Dit spectrum is het meest bestudeerd omdat het waterstofatoom het eenvoudigste atoom is. Waterstof heeft een atoomkern met één proton en daaromheen één elektron. Zie figuur 21. In figuur 21 wordt een elektron van de 1^e naar de 2^e schil gebracht.

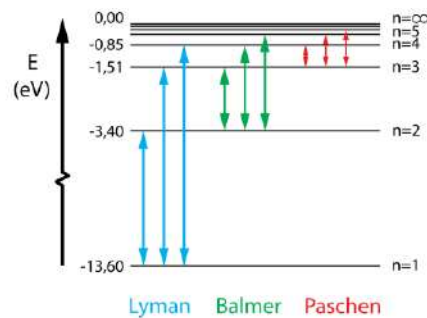


Figuur 21 H-atoom

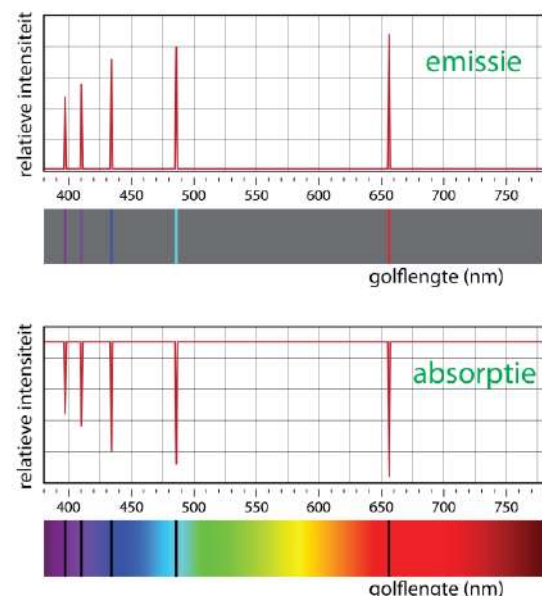
Een elektron kan ook van de 1^e naar de 3^e of 4^e schil worden gebracht. Deze overgangen geven een reeks energieën die de **Lyman** reeks wordt genoemd. Als een elektron in de 2^e schil zit kan het een sprong maken naar de 3^e, 4^e, 5^e, ... schil en deze reeks heet de **Balmer** reeks. Tenslotte is er ook de **Paschen** reeks, waarbij een elektron van de 3^e schil naar een hoger gelegen schil wordt gebracht. De energie die nodig is om een elektron naar een hogere schil te brengen komt vrij als het elektron een sprong omlaag maakt. De volledige hoeveelheid energie komt in één foton terecht. Daarom is de energie van de uitgezonden fotonen precies gelijk aan de energie van de opgenomen fotonen.

Een gas van waterstofatomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met scherpe lijnen bij 397, 410, 434, 486, en 656 nm. Deze lijnen horen tot de Balmer reeks. Zie figuur 22 en 23.

Figuur 22 Vereenvoudigd energieniveauschema voor waterstof.



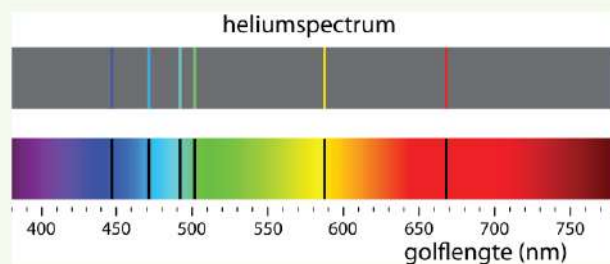
Figuur 23 is het emissie- en absorptiespectrum van H-atomen in het zichtbare deel van het spectrum (de Balmer reeks). Zoals je kunt zien bestaat het spectrum uit scherpe lijnen. Het bovenste spectrum is het uitgestraalde licht (emissie) en het onderste het opgenomen licht (absorptie).



Figuur 23 Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van waterstof.

VOORBEELD heliumatomen

Een gas van heliumatomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met scherpe lijnen bij 447, 471, 492, 502, 588 en 668 nm. Zie figuur 24. Dit spectrum is als eerste waargenomen bij zonlicht en vandaar dat helium genoemd is naar de zon: Helios. Ook op aarde komt helium voor.

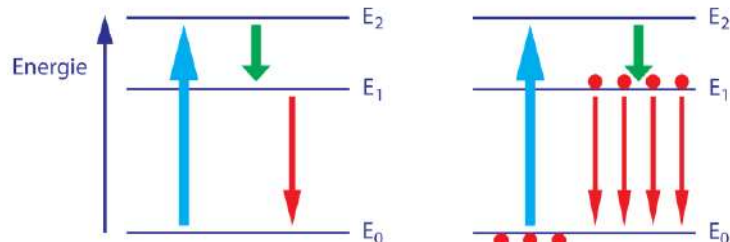


Figuur 24 Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van helium.

Gestimuleerde emissie in een laser

Emissie van licht door het terugvallen van elektronen naar een lagere schil gebeurt spontaan. De aangeslagen toestand leeft maar kort, meestal minder dan een miljoenste seconde. Behalve het spontaan terugvallen kunnen elektronen ook door fotonen gestimuleerd worden om naar een lagere schil te springen. Dit proces heet **gestimuleerde emissie**. De werking van een laser is gebaseerd op gestimuleerde emissie. De afkorting LASER staat voor: "**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation".

Een laser werkt als volgt. Er zijn atomen, zoals chroom, met drie energieniveaus E_0 , E_1 en E_2 . Zie figuur 25.



Figuur 25 De werking van een drie niveau laser.

Om laserlicht te maken breng je eerst elektronen van het E_0 naar E_2 niveau (blauwe pijl omhoog). Snel daarna vallen elektronen spontaan van E_2 naar E_1 (groene pijl omlaag). De elektronen kunnen nog verder omlaag naar het E_0 niveau maar deze overgang is moeilijk en kost daardoor veel tijd. Het gevolg is dat elektronen zich ophopen in niveau E_1 en na enige tijd zitten er meer elektronen in E_1 dan in E_0 . Dit noem je **populatie-inversie**. Af en toe springt een elektron van E_1 naar E_0 en het foton dat hierbij vrijkomt stimuleert een ander elektron om ook de sprong te maken. Er ontstaat een lawine van elektronen die van E_1 naar E_0 springen en bij iedere sprong komt één foton vrij. De truc is om de fotonen zo lang mogelijk met spiegels op en neer te kaatsen, waardoor ze kunnen blijven stimuleren en er steeds meer fotonen ontstaan.

In 1960 is de **robijnlaser** uitgevonden, zie figuur 26. Een robijnlaser geeft rood licht met een golflengte van 694,3 nm. Een robijnkristal vormt het hart van deze laser. Robijn is een kristal van Al_2O_3 met daarin 0,1% Cr^{3+} . Het Cr^{3+} ion heeft het drie niveau systeem. Om het robijnkristal heen worden flitslampen geplaatst, waarmee elektronen van E_0 naar E_2 worden gebracht. Aan de linkerkant is een spiegel met 100% reflectie en aan de rechterkant een spiegel waar een klein gedeelte van het licht wordt doorgelaten.



Figuur 26 Robijnlaser.

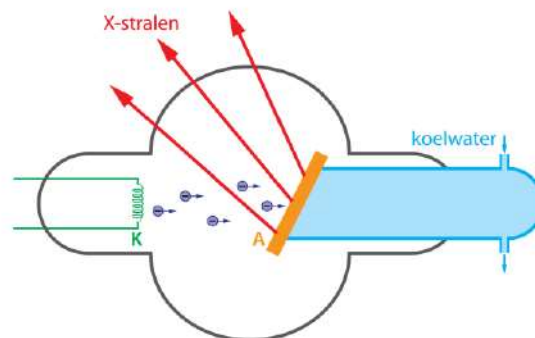
Tegenwoordig wordt de robijnlaser niet meer gebruikt omdat er betere lasers zijn. Maar het basisprincipe is voor alle lasers hetzelfde. Nu zijn veel lasers gebaseerd op licht emitterende diodes (LED's). Dit zijn de **diodelasers** die je vindt in CD / DVD spelers en in laserpennen.

13.4 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 metaal botsen. In figuur 27 zie je een röntgenbuis waarin dit gebeurt.

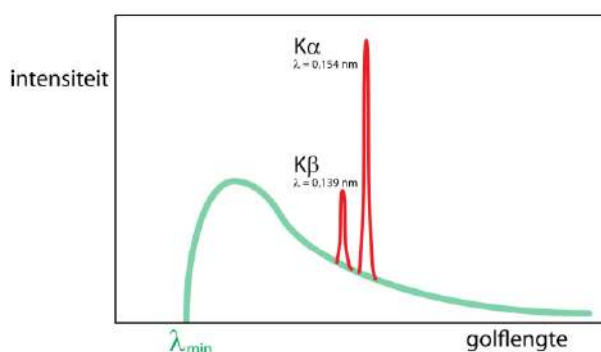
In een röntgenbuis zit een **elektronen-versneller**, zoals je in het hoofdstuk Elektromagnetisme bent tegengekomen. Links zie je een gloeidraad (groen) en rechts het metaal (oranje). De gloeidraad is aangesloten op de negatieve pool van een spanningsbron en het metaal op de positieve pool (niet getekend). De negatief geladen gloeidraad is de **kathode K** en het metaal de **anode A**.



Figuur 27 Vacuümbuis waarin röntgenstralen worden opgewekt.

Als de temperatuur van de gloeidraad hoog genoeg is worden er elektronen vrijgemaakt die naar de positieve anode versnellen waar ze met grote snelheid tegenaan botsen. Ze dragen hun kinetische energie over op de metaalatomen die hierdoor röntgenstralen gaan uitzenden. 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. Om een 1000 eV foton te maken is een versnelling nodig van minimaal 1000 volt. Omdat niet alle kinetische energie van de elektronen wordt omgezet in röntgenstralen moet de anode met water worden gekoeld. In figuur 27 is de waterkoeling aangegeven in blauw.

Laten we eens kijken naar röntgenstralen die ontstaan bij een anode gemaakt van koper. Het spectrum bevat een brede band die bij een minimum golflengte $\lambda_{\min}$ begint en doorloopt naar hoge waarden (groene lijn). Op deze band zitten scherpe pieken, aangegeven met $K\alpha$ en $K\beta$ (rode pieken). Zie figuur 28.



Figuur 28 Spectrum van röntgenstralen opgewekt in een anode van koper.

De brede band (groene lijn) ontstaat doordat de elektronen in de anode snel afremmen. Zoals we eerder zagen ontstaat EM-straling als een geladen deeltje versnelt of vertraagt. Niet alle elektronen vertragen even snel. Sommigen dringen dieper in de anode dan anderen. Dit verklaart het ontstaan van de brede band die **remstraling** wordt genoemd.

De remstraling heeft een minimale golflengte $\lambda_{\min}$. Deze minimale golflengte wordt bepaald door de spanning tussen de anode en de kathode. Stel je legt 12.000 volt aan dan krijgen de elektronen een kinetische energie van 12.000 eV. Als deze hele voorraad energie terecht komt in één enkel foton heeft dit foton ook 12.000 eV energie, wat overeenkomt met een golflengte van 0,10 nm. Behoud van energie verhindert het opwekken van fotonen met een nog kleinere golflengte.

VOORBEELD opwekken van röntgenstraling

Elektronen botsen met grote snelheid op koper zodat er röntgenstraling ontstaat. De röntgenfotonen die het meest worden uitgezonden is koper-K α straling met een golflengte van 0,154 nm.

Bereken de fotonenergie van koper-K α straling.

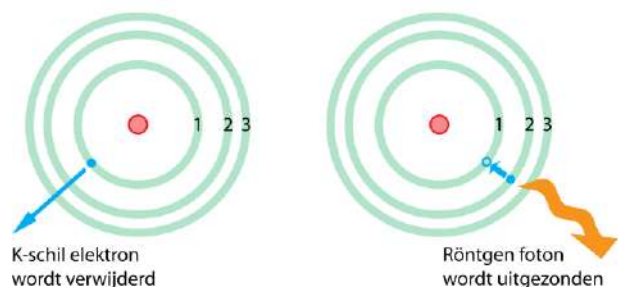
- $c = f \cdot \lambda$ met $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ c in Binas tabel 7A
- $2,99792 \cdot 10^8 = f \cdot 0,154 \cdot 10^{-9} \rightarrow f = 1,9467 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$
- $E_{\text{foton}} = h \cdot f$ met $h = 6,62607 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ h in Binas tabel 7A
- $E_{\text{foton}}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

Met welke minimale snelheid moeten de elektronen tegen het koper botsen om koper K α straling te maken?

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

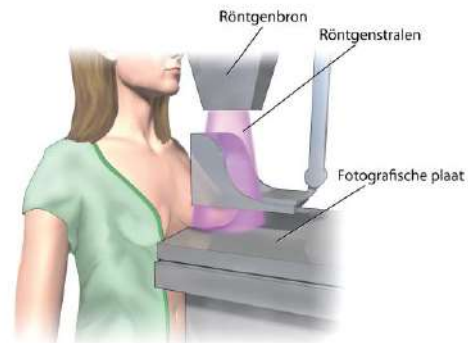
De scherpe pieken K α en K β zijn karakteristiek voor het metaal waaruit de anode is gemaakt. Door de pieken in het röntgenspectrum te meten kun je het element herkennen. De analysetechniek die hiervan gebruikmaakt heet **röntgen fluorescentie spectrometrie XRF**. Als voorbeeld nemen we aluminium. Aluminium is element nummer 13 en een Aluminiumatoom heeft dus 13 elektronen. Deze elektronen zijn verdeeld over schillen: 1^e schil (K-schil) $\rightarrow$ 2 el. | 2^e schil (L-schil) $\rightarrow$ 8 el. | 3^e schil (M-schil) $\rightarrow$ 3 el. Bombarderen we aluminium met elektronen van voldoende energie dan wordt er een elektron uit de K-schil verwijderd. De lege plaats in de K-schil wordt opgevuld door een elektron uit de hoger liggende L-schil. Het elektron uit de L-schil komt in een lagere energietoestand en verliest dus energie. Voor aluminium is dit energieverschil 1486,5 eV. In figuur 29 is dit proces weergegeven.

Figuur 29 Scherpe pieken in het röntgenspectrum ontstaan doordat een elektron uit de L-schil naar een vrijgekomen plaats in de K-schil springt en daarbij een röntgenfoton uitzendt.



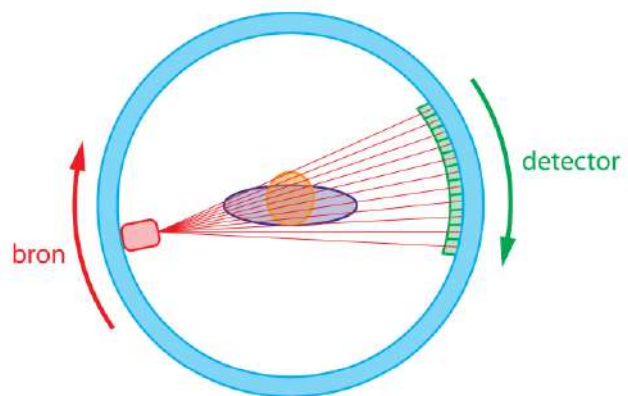
Medische toepassingen van röntgenstralen

Röntgenstralen hebben een groot doordringend vermogen. Weefsel bestaat voornamelijk uit de elementen waterstof, koolstof, stikstof en zuurstof, en absorbeert minder straling dan bijvoorbeeld botten, die opgebouwd zijn uit zware elementen zoals calcium. Als een bundel röntgenstralen door het lichaam gaat 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 30.

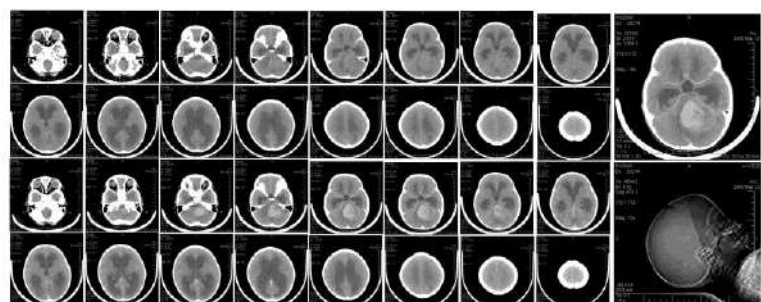


Figuur 30 Links, röntgenfoto van een gebroken schouder. Rechts: onderzoek naar borstkanker "mammografie".

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 31. Tijdens het draaien maakt de scanner een serie röntgenfoto's onder een steeds andere hoek. 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 32.

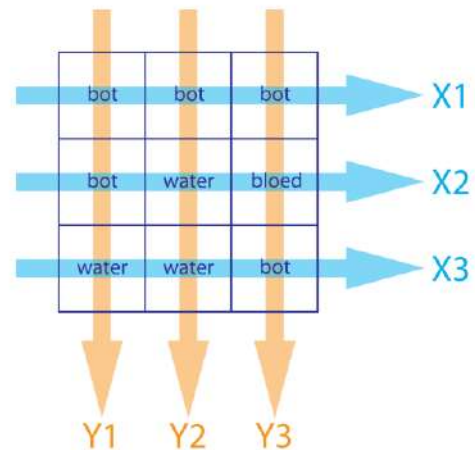


Figuur 31 CT-scanner. Een röntgenbron en de detector draaien tegelijkertijd om de patiënt van verschillende kanten te fotograferen.



Figuur 32 CT-scan van een kinderkopje.

Doordat de röntgenfoto's onder verschillende hoeken worden gemaakt kun je de samenstelling van het bestraalde weefsel bepalen. Zie figuur 33. 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 grijzer dan op X1.



Figuur 33 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. Weefsel van levende organismen bevat voornamelijk moleculen opgebouwd uit waterstof, koolstof, stikstof en zuurstof. De energie waarmee deze atomen chemisch zijn gebonden ligt tussen 3 en 10 eV. Eén röntgenfoton is in staat om een veel 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 stralingsdosis.

Eén sievert is één joule geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram.

Een mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling. Per jaar ontvang je tussen 1,7 en 2,5 mSv aan ioniserende straling door natuurlijke bronnen uit de omgeving. Verder ontvang je gemiddeld zo'n 1,2 mSv per jaar door röntgenstraling voor medische diagnostiek. Het totaal van 2,9 – 3,7 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. Maar als de stralingsdosis veel groter is kan je lichaam niet meer alle schade op tijd repareren en heb je een grote kans dat je afweermechanisme onherstelbaar wordt beschadigd. Bij een stralingsdosis van 50 sievert overlijdt je al na enkele uren of dagen.

De stralingsbelasting bij medische toepassing van röntgenstraling is ongeveer:

röntgenfoto gebit	0,01 mSv
röntgenfoto beenbreuk	1,0 mSv
CT-scan	5,0 mSv
röntgen-mammografie	0,1 mSv

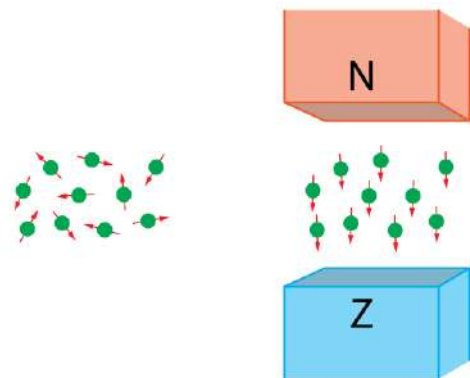
13.5 Magnetische resonantie: MRI

De spin van elektronen en protonen

Het gebruik van röntgenstralen voor medische diagnose heeft als nadeel dat je lichaam wordt blootgesteld aan ioniserende straling. Bij magnetische resonantie imaging (MRI) gebeurt dit niet. MRI werkt met EM-straling in het radiogebied 30 – 300 MHz.

De werking van MRI is totaal anders dan van röntgenstralen. MRI maakt gebruik van een bijzondere eigenschap van protonen. Protonen hebben niet alleen een lading maar zijn ook kleine **magneetjes**. Deze eigenschap wordt de **spin** genoemd. Het lijkt alsof protonen voortdurend om hun eigen as tollen (Engels: spinnen) en daardoor minuscule elektromagnetjes zijn. De werkelijkheid is veel complexer maar om een indruk te krijgen van de werking van MRI is dit niet belangrijk. Bij MRI wordt gebruik gemaakt van de magnetische eigenschappen van het proton. We geven dit magnetisme aan met een pijltje dat wijst in de richting van de magnetische noordpool. De richting van dit pijltje wordt de **oriëntatie** van de protonspin genoemd.

In je lichaam zijn veel waterstofatomen, waarvan de kern een proton is. Je lichaam bevat dus ontelbaar veel magneetjes. In het dagelijks leven merk je hier niets van, omdat deze magneetjes een willekeurige oriëntatie hebben. Zie figuur 34, links. Er zijn steeds net zoveel protonen met spin in de ene richting als in de tegengestelde richting. Zolang de magnetische oriëntatie lukraak over alle richtingen is verdeeld heffen de protonspins elkaar op. Maar als de protonen in een magneetveld komen worden ze gericht. Zie figuur 34, rechts.



Figuur 34 In een magneetveld krijgen de protonen dezelfde oriëntatie.

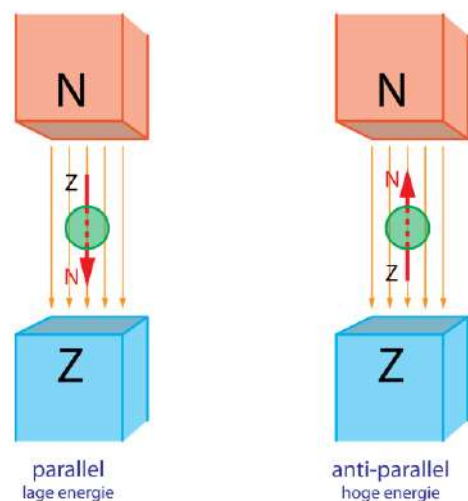
Als je een patiënt in een sterk magneetveld brengt zijn de protonspins niet meer lukraak verdeeld over alle richtingen. Net als gewone magneetjes gaan de protonen zich oriënteren in de richting van het externe magneetveld. Het lichaam wordt een beetje magnetisch gemaakt, net zoals bij een spijker in de buurt van een externe magneet. Het magnetisch maken van een voorwerp door een extern magneetveld heet **magnetische inductie**. Zie figuur 34 en figuur 35.

Figuur 35

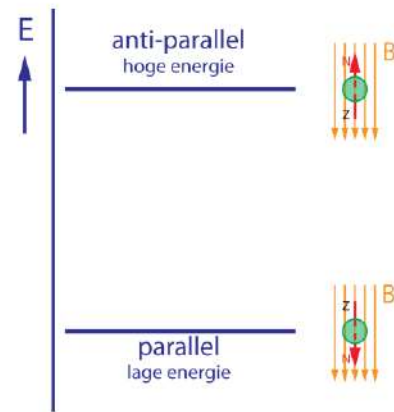
Oriëntatie van protonspins door een extern magneetveld.

Links: oriëntatie is parallel → de spin heeft dezelfde richting als het B-veld → lage energie.

Rechts: oriëntatie is antiparallel → de spin heeft tegengestelde richting als het B-veld → hoge energie.



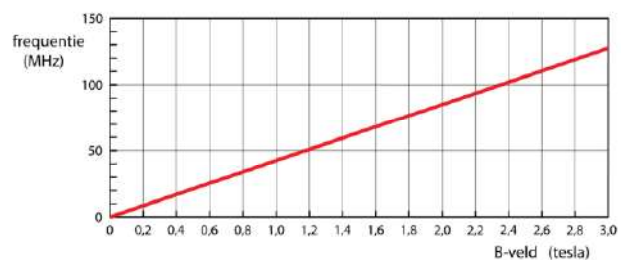
De aanwezigheid van georiënteerde protonspins kun je vaststellen met elektromagnetische straling. Stel er is een extern magneetveld (B-veld) waarin zich georiënteerde protonen bevinden. Het kost energie om de protonen om te draaien van parallel (met het B-veld mee) naar anti-parallel (tegen het B-veld in). De energie die het kost om één proton in een B-veld van één tesla om te draaien is $2,82126 \cdot 10^{-26}$ J. Uit de formule $E_{\text{foton}} = h \cdot f$ volgt dat deze energie overeenkomt met 42,5781 MHz. Deze frequentie is radiostraling in het VHF-gebied. Zie figuur 36.



Figuur 36 De energie van de parallel en anti-parallel georiënteerde protonen.

Een MRI-scanner heeft een sterk magneetveld van 1 – 3 tesla wat ongeveer 100.000 keer sterker is dan het B-veld van de aarde. Protonen in een B-veld van 1 tesla krijgen door het absorberen van EM-straling met een frequentie van 42,5781 MHz genoeg energie om te draaien. De benodigde energie om protonspins te laten draaien hangt af van de sterkte van het B-veld. Hoe sterker het B-veld is hoe meer energie het kost om de oriëntatie om te draaien. Er is een recht evenredig verband. Zie figuur 37.

Figuur 37 Er is een recht evenredig verband tussen de sterkte van het B-veld en de frequentie waarbij de oriëntatie van protonspins omdraait.



MRI als diagnostische methode

Een MRI-scanner bestaat uit een grote magneet waarin de patiënt wordt geschoven. Zie figuur 38. Verder is er een bron die korte pulsen EM-straling van 30 – 300 MHz geeft en een ontvanger die meet hoeveel EM-straling door het lichaam wordt uitgezonden.



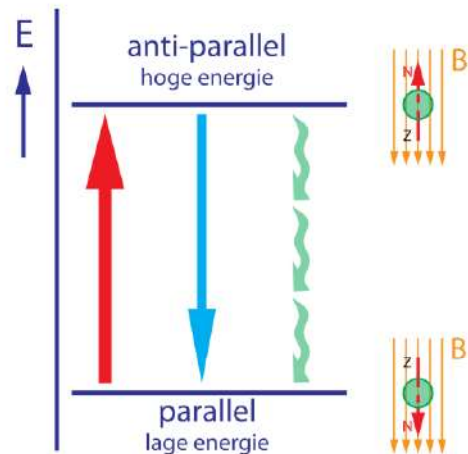
Figuur 38 MRI-scanner.

Bij een MRI geef je een korte puls EM-straling met de juiste frequentie die ervoor zorgt dat parallelle protonspins met lage energie een foton opnemen en omdraaien naar de anti-parallelle oriëntatie. Na een poosje vallen deze protonen terug naar de grondtoestand, waarbij ze een foton uitzenden. Als er veel parallel georiënteerde protonspins zijn wordt er veel EM-straling opgenomen en uitgezonden. De frequentie van de EM-straling die wordt opgenomen en uitgezonden wordt bepaald door het energievervalschil tussen de parallelle en anti-parallelle oriëntatie. Fotonen met te weinig of te veel energie worden niet opgenomen of uitgezonden. Vandaar dat er sprake is van **resonantie**.

In figuur 39 worden deze processen weergegeven. De rode pijl omhoog is de absorptie van een puls EM-straling met de juiste frequentie. Hierdoor worden de protonen met parallelle oriëntatie omgedraaid naar een anti-parallelle oriëntatie, waarbij ze een hogere energie krijgen.

De protonen blijven maar kort in de hoge-energie-toestand en keren snel terug naar de grondtoestand door een foton uit te zenden (blauwe pijl omlaag). Ze kunnen hun energie ook afstaan aan de omgeving, die daardoor een beetje warmer wordt (drie kronkelige groene pijlen omlaag).

Figuur 39 Absorptie en emissie van EM-straling bij MRI.

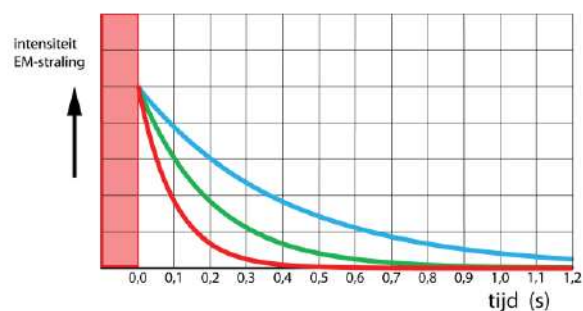


Bij een MRI-diagnose wil je vaststellen of er plaatsen in het lichaam zijn waarbij het weefsel anders is dan gewenst, bijvoorbeeld vanwege een kankergezwel. De absorptie van de EM-straling moet dus afhankelijk zijn van de plaats in het lichaam. Dit bereik je door een extern magneetveld te maken met een verloop in sterkte. Over een lengte van 1,0 meter kan het B-veld aan de ene kant 1,45 tesla zijn en aan de andere kant 1,55 tesla. Bij 1,45 tesla hoort $1,45 \cdot 42,5781 = 61,7382$ MHz en bij 1,55 tesla hoort $1,55 \cdot 42,5781 = 65,9961$ MHz. Omdat de sterkte van het B-veld verloopt, is ook de frequentie van de EM-straling afhankelijk van de plaats in het lichaam. Als je bij een bepaalde frequentie de intensiteit van de uitgezonden EM-straling meet weet je voor de bijbehorende plaats in het lichaam hoeveel georiënteerde protonen er zijn.

De T1 tijd

Omdat het MRI-signaal afhankelijk is van het aantal parallel georiënteerde protonen kun je met MRI het verschil zien tussen plaatsen waar de protonconcentratie hoog of laag is. Maar bij MRI meet je niet alleen hoeveel EM-straling er wordt uitgezonden maar ook hoelang het uitzenden duurt.

In figuur 40 zie je eerst de EM-puls die ervoor zorgt dat de oriëntatie van de spins omdraait van parallel naar anti-parallel. Dit is het rode vlak. Vanaf $t=0$ vallen de protonspins terug naar de lage-energiestoestand. De karakteristieke tijd die hiervoor nodig is heet de T1 tijd. Bij de rode grafiek is de T1 tijd klein, bij de groene grafiek gemiddeld en bij de blauwe grafiek groot. T1 tijden van verschillende weefsels vind je in Tabel 2.

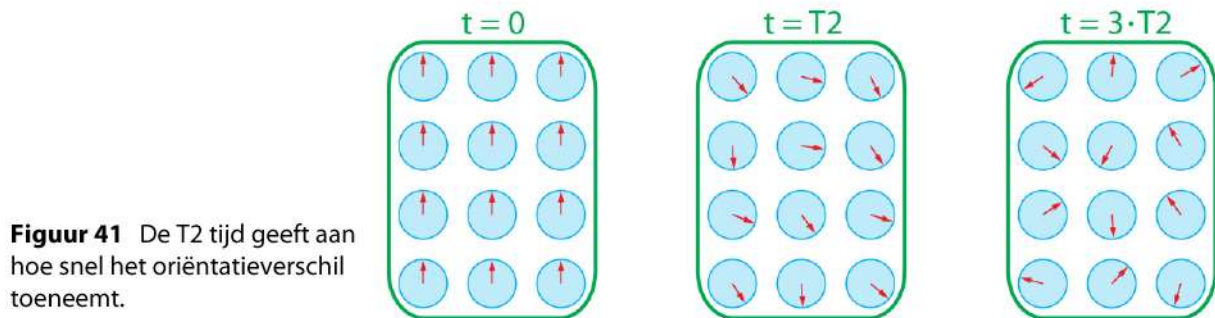


Figuur 40 De T1 tijd.

De T2 tijd

Bij een MRI-scan wordt ook nog een andere tijd gemeten, de T2 tijd. De T2 tijd heeft een heel andere oorsprong dan het omdraaien van spins. Het idee is als volgt. Om de protonspins 180 graden om te draaien is een EM-puls van een bepaalde tijdsduur nodig. Na de helft van deze tijd zijn de spins nog maar 90 graden gedraaid en staan ze loodrecht op de

magnetische veldlijnen. Ze gaan rondjes draaien in het vlak loodrecht op het B-veld en de omlooptijd waarmee ze dit doen is afhankelijk van het weefsel waarin de protonen zich bevinden. De protonen starten allemaal tegelijkertijd (geen faseverschil), maar door de verschillende omlooptijden gaan ze langzaam uit de pas lopen en krijgen ze een faseverschil. De T2 tijd geeft aan hoe snel het uit de pas lopen gebeurt (hoe snel het faseverschil toeneemt). In figuur 41 is dit proces uitgebeeld. Het B-veld staat loodrecht op het papier en we kijken van boven op de georiënteerde protonspins. Op $t=0$ start het ronddraaien van de spins en hebben ze allemaal dezelfde richting. Na T2 is er nog maar 37% over van de gelijkheid in richting en na 3 keer T2 is er nog maar 5% van over.



MRI vergeleken met Röntgen

Behalve het voordeel dat bij MRI geen ioniserende straling wordt gebruikt, heeft MRI nog andere pluspunten. In vergelijking met een CT-scan levert een MRI-scan een scherper beeld op. Dit komt omdat bij MRI meer verschillende soorten weefsel afzonderlijk zichtbaar gemaakt kunnen worden. Verschillende weefsels geven een verschillend MRI-signaal. In Tabel 2 zie je typische T1 en T2 tijden voor verschillende soorten weefsel.

Met MRI kun je ook processen in de tijd volgen. Je spreekt dan van **functionele MRI** (f-MRI). Bij functionele MRI wordt snel na elkaar een nieuwe MRI-scan gemaakt. Hierdoor kun je zien of de concentratie van waterstofatomen in de tijd verandert. Maak je bijvoorbeeld een f-MRI scan van het hoofd dan kun je daarmee de hersenactiviteit in kaart brengen. Veel hersenactiviteit gaat samen met veel aanvoer van bloed en dat is zichtbaar in een f-MRI scan.

Tabel 2 Overzicht van T1 en T2 tijden bij verschillende soorten weefsel.

Weefsel	T1 (ms)	T2 (ms)
water	4000	2000
grijs hersenweefsel	900	90
spier	900	50
lever	500	40
vet	250	70
pees	400	5
proteïnen	250	0,1 – 1
ijs	5000	0,001

13.6 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- 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 $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- d is de tralieconstante in meter (m)
- λ_{max} is de golflengte die het meest wordt uitgestraald in meter (m)
- T is de absolute temperatuur in kelvin (K)
- P is het stralingsvermogen in watt (W) $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
- A_{bron} is de oppervlakte van de stralingsbron
- I is de stralingsintensiteit in watt per vierkante meter (W/m^2)
- r de afstand tussen de stralingsbron en de waarnemer
- A is de oppervlakte van de detector

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.
- Een (licht-) golf buigt om voorwerpen kleiner dan de golflengte.
- Een lichtgolf die door een opening gaat kleiner dan de golflengte verspreidt zich in alle richtingen (het principe van Huygens).
- Coherente trillingsbronnen hebben dezelfde frequentie en beginnen op hetzelfde tijdstip aan een nieuwe trilling.
- De tralieconstante is de afstand tussen de spleten van een tralie in meter.
- 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 λ_{max} is omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur. [wet van Wien](#)
- Het stralingsvermogen hangt af van de oppervlakte van de bron en van de absolute temperatuur tot de vierde macht. [wet van Stefan-Boltzmann](#)
- Het stralingsvermogen is de uitgezonden stralingsenergie per seconde ($\text{J/s} = \text{Watt}$).

- De intensiteit van straling is de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een oppervlak van één vierkante meter gaat (W/m^2).
- Fotonen zijn pakketjes lichtenergie. De hoeveelheid energie is recht evenredig met de frequentie.
- Het absorptiespectrum zijn de golflengtes die zijn geabsorbeerd.
Het emissiespectrum zijn de golflengtes die worden uitgestraald.
- Voorwerpen stralen een breed spectrum uit. Losse atomen stralen enkele specifieke golflengtes uit.
- Röntgenstraling is ioniserende straling (elektron wordt van atoom losgemaakt) en is daarom gevaarlijk.
- Röntgenstralen ontstaan als elektronen met hoge snelheid op metaal botsen.
- Röntgenstralen hebben een kleine golflengte en dus veel fotonenergie. Het is ioniserende straling.
- 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.
- MRI is gebaseerd op het magnetisme van protonen. Om dit waar te nemen is een sterk magneetveld nodig.
- MRI werkt met EM-straling in het radiogebied (100 MHz) en is daarom niet gevaarlijk.
- Bij MRI wordt gemeten hoe protonen EM-straling absorberen en weer uitzenden. Vooral zacht weefsel (met veel protonen) is bij MRI goed te onderscheiden.

Formules

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

$$c = f \cdot \lambda \quad c \text{ is de lichtsnelheid in vacuüm}$$

$$d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{de tralieformule, } n \text{ is de orde van de afbuiging}$$

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_W \quad \text{de wet van Wien}$$

$$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A_{\text{bron}} \cdot T^4 \quad \text{de wet van Stefan-Boltzmann}$$

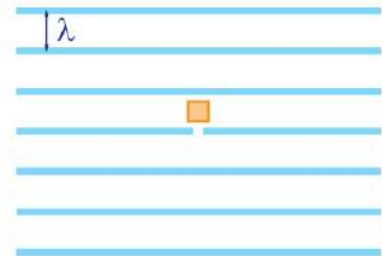
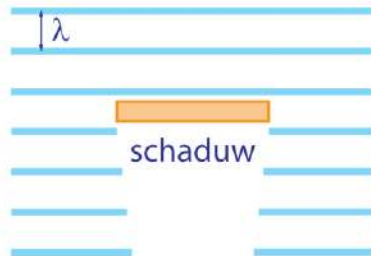
$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$$

de (omgekeerde) kwadratenwet

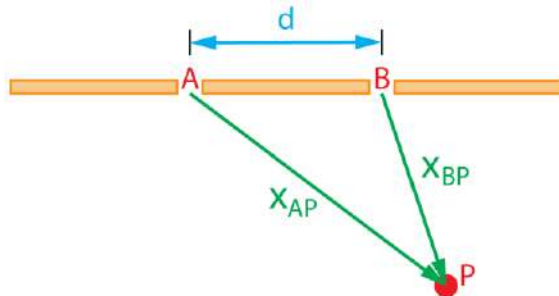
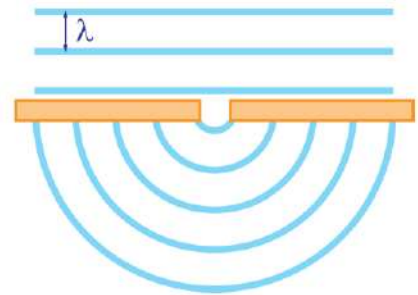
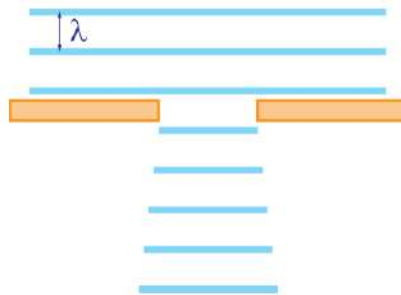
$$E_f = h \cdot f$$

de energie van een foton

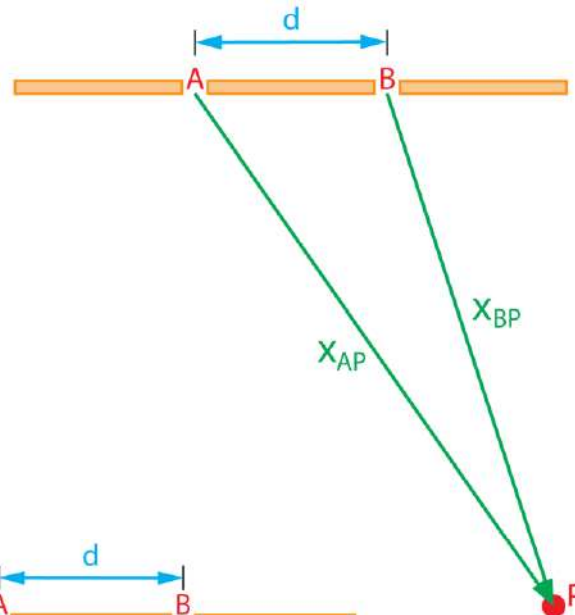
Figuren



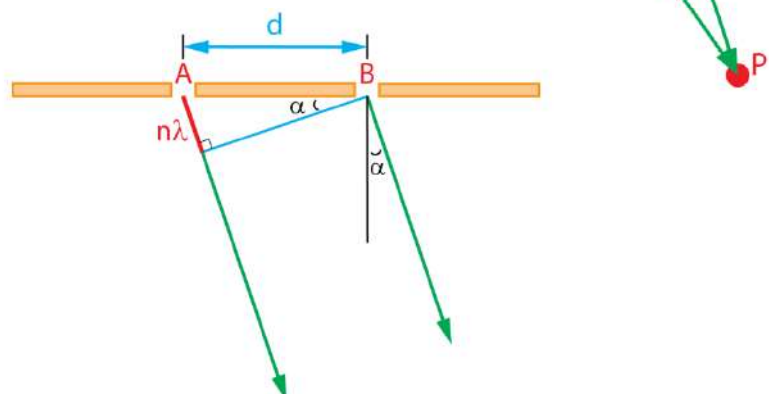
Als licht een klein object tegenkomt of door een nauwe opening gaat treedt er afbuiging op (refractie).

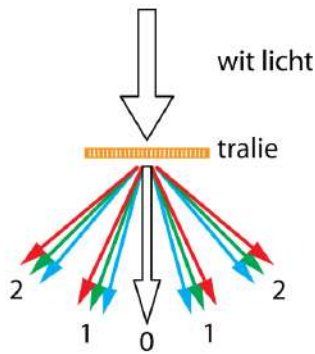


In punt P komen de golven uit bron A en bron B samen. Als het verschil in weglengte een geheel aantal keer de golflengte is vindt er constructieve interferentie plaats.



Op grote afstand van de spleten A en B treedt constructieve interferentie op als geldt:
 $\sin \alpha = n \cdot \lambda / d$.



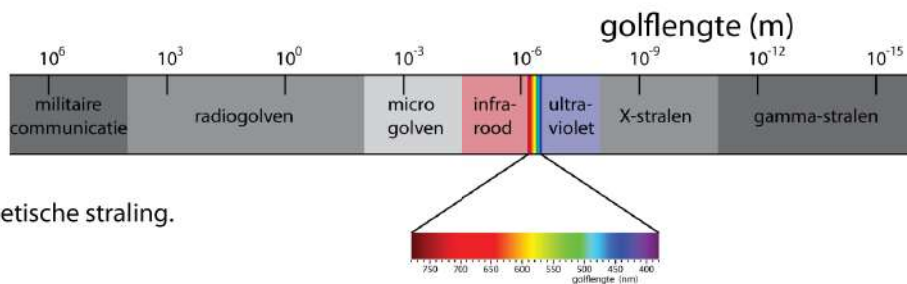
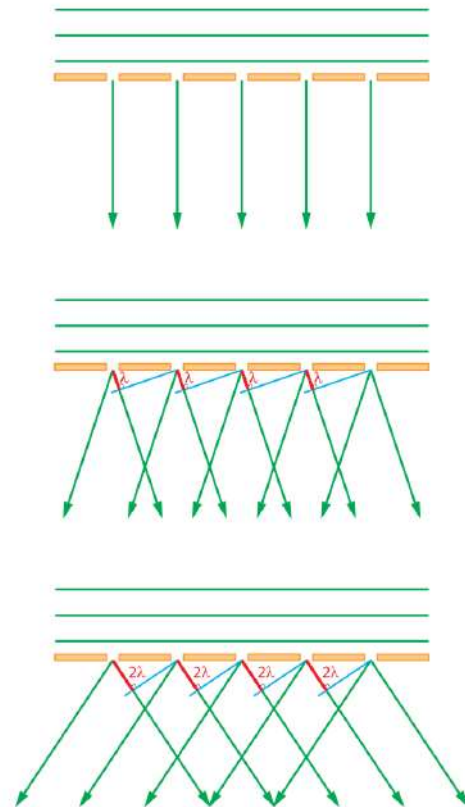


Een witte lichtbundel gaat door een tralie en wordt gesplitst in kleuren.

$n = 0 \rightarrow$ lichtbundel gaat rechtdoor
verschil in weglengte = 0

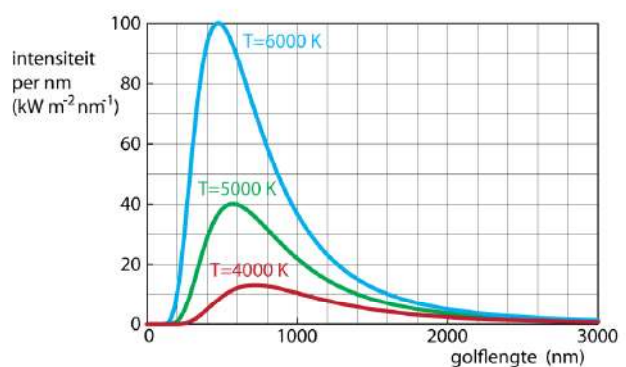
$n = 1 \rightarrow$ lichtbundel buigt af,
verschil in weglengte = $1 \cdot \lambda$

$n = 2 \rightarrow$ lichtbundel buigt af,
verschil in weglengte = $2 \cdot \lambda$

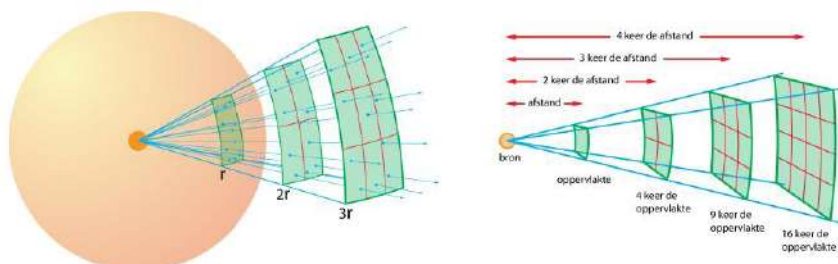


Elektromagnetische straling.

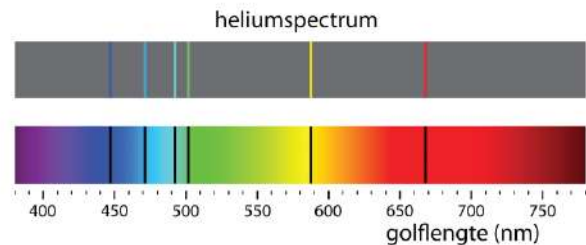
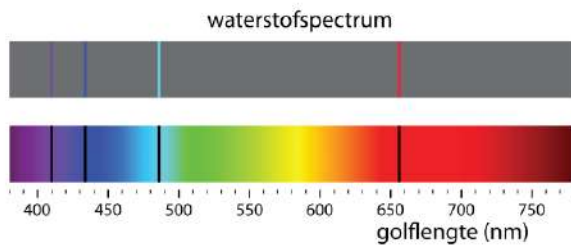
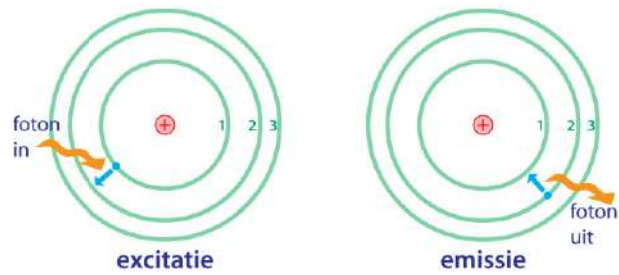
Als de temperatuur toeneemt verschuift de grafiek. De golflengte met de grootste intensiteit per nanometer λ_{max} wordt kleiner en er wordt veel meer straling uitgezonden.



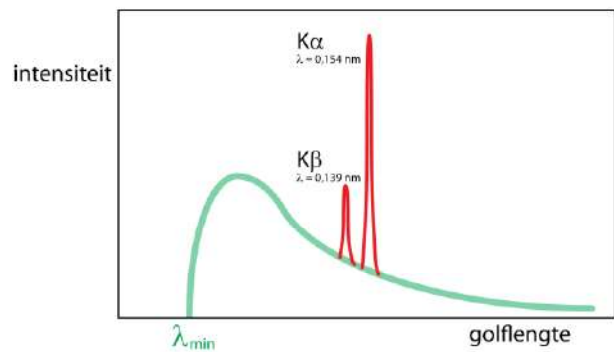
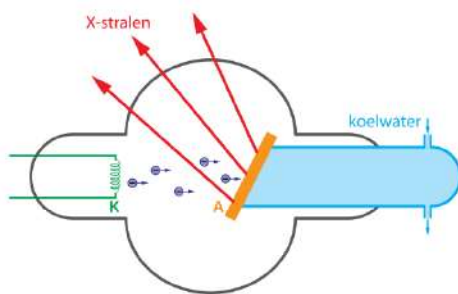
De straling verspreidt zich bolvormig, waardoor de intensiteit afneemt met de afstand in het kwadraat (de kwadratenwet).



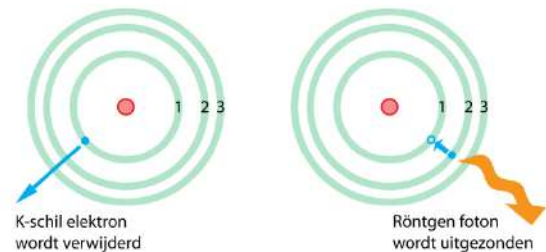
Opnemen van licht (excitatie) en uitstralen van licht (emissie) door atomen.



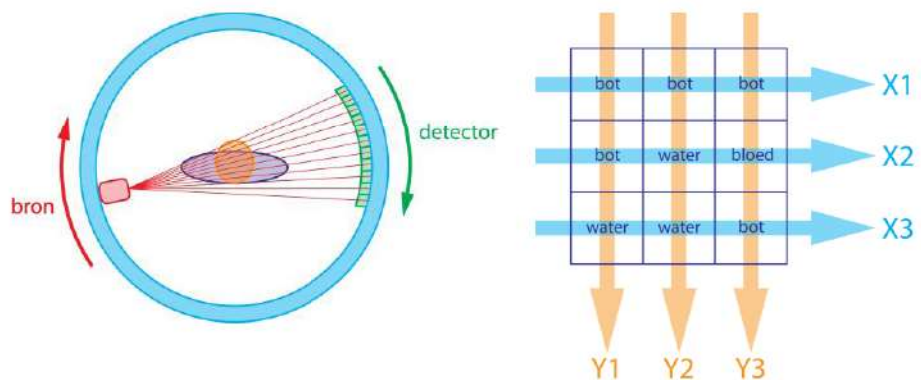
Absorptie- en emissiespectrum van waterstof (links) en helium (rechts).



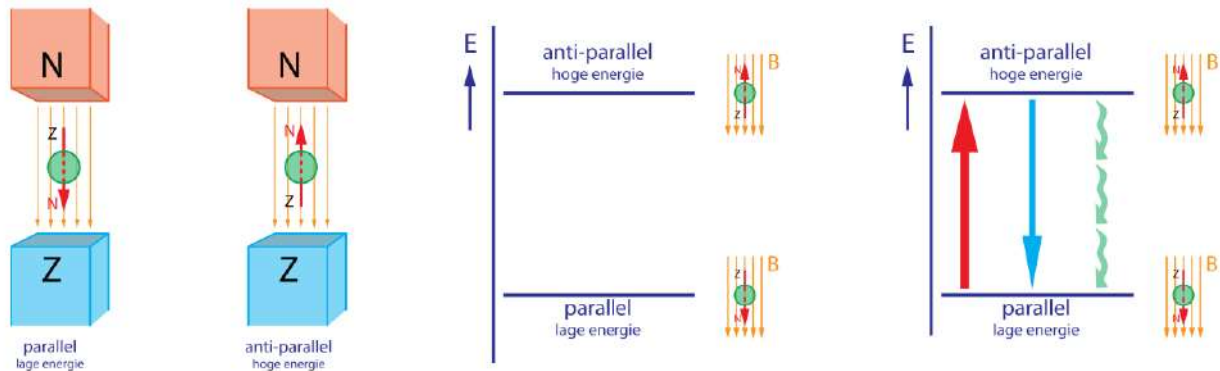
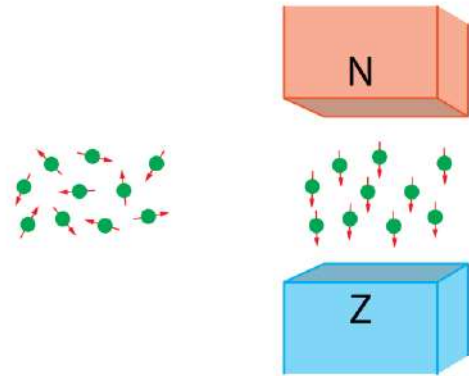
Opwekken van röntgenstralen door elektronen tegen een metaal te schieten. Er ontstaat een breed spectrum vanwege het afremmen van de elektronen en pieken vanwege het terugvallen van een elektron naar een lager gelegen schil.



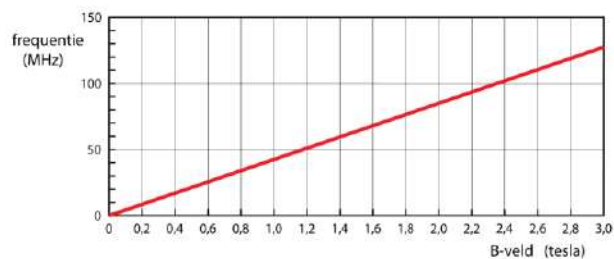
CT-scanner. De röntgenbron en de detector draaien tegelijkertijd om de patiënt van verschillende kanten te fotograferen.



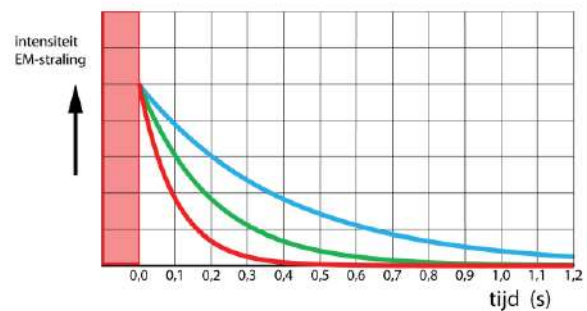
MRI is gebaseerd op het magnetisme van protonen. De patiënt ligt in een sterk magneetveld. Met een EM-puls wordt de draairichting (spin) van de protonen omgeklapt. Bij het teruggaan naar de grondtoestand wordt EM-straling uitgezonden. De EM-straling is ongevaarlijke radiogolven van ongeveer 100 MHz.



Spins die parallel zijn met het B-veld hebben een lage energie en spins met tegenovergestelde richting (anti-parallel) hebben een hoge energie. Dit energieverschil wordt bepaald door de sterkte van het B-veld.



De plaats waar het MRI signaal wordt opgewekt hangt af van de sterkte van het magneetveld.



De tijd waarin het signaal afneemt is afhankelijk van het soort weefsel.