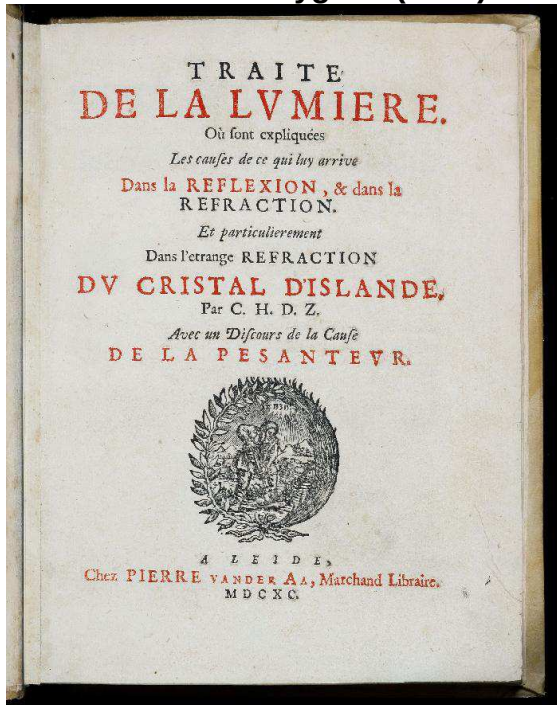


17^e eeuw: Licht als golf

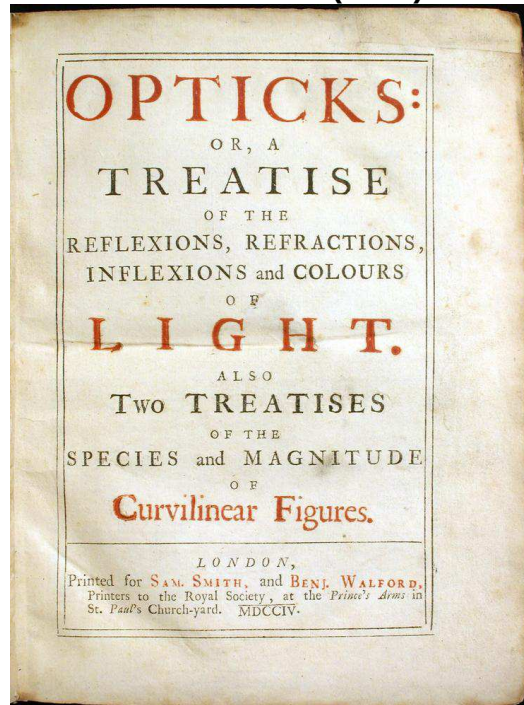


Licht als deeltje

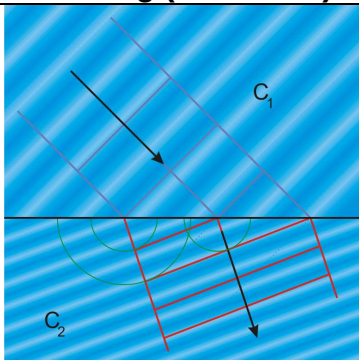
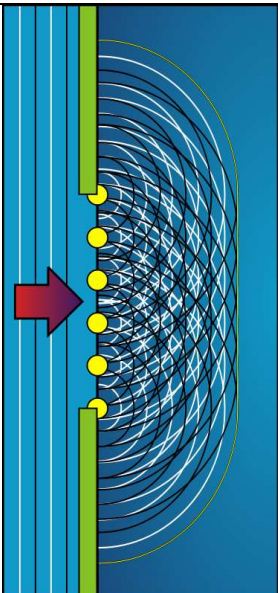
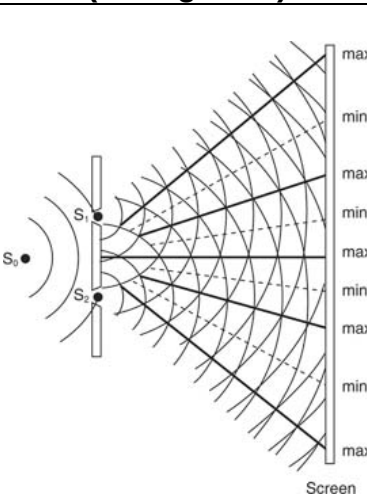
Christiaan Huygens (1690)



Isaac Newton (1704)



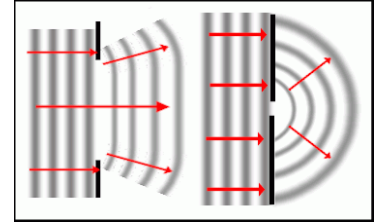
Het 'Principe van Huygens' (http://nl.wikipedia.org/wiki/Principe_van_Huygens-Fresnel) geeft een verklaring voor:

terugkaatsing & breking (refraction)	buiging (diffraction)	interferentie (Young 1805)
 Zie: www.walter-fendt.de/ph14e/huygenspr.htm		

Licht als golfverschijnsel: Buiging (§ 3.1)

Golven kunnen om een opening (of hindernis) heen buigen. Hoe kleiner de opening, des te vollediger de buiging.

- Als de golflengte kleiner is dan de opening is er sprake van **volledige buiging**.
- Als de opening groter is dan de golflengte, is er versterking en uitdoving in zijwaartse richtingen; verschillende delen van de opening interfereren met elkaar.
- Als de opening (in vergelijking met de golflengte) erg groot is, is er geen sprake van buiging; er is uitdoving in de zijwaartse richtingen.



Zie: http://projects.cbe.ab.ca/sss/science/physics/map_north/applets/waterdiffraction/waterdiffraction.html

Licht als golfverschijnsel: Polariserie (geen examenstof)

De polarisatie-richting van het licht is niet¹ te zien. Wel kan hinderlijk teruggekaast (gepolariseerd) licht worden weggefilterd (polarisatiefilter / polaroid zonnebril).



Foto's door een camera met een polarisatiefilter. In de linker foto is het filter zo gedraaid dat de weerkaatsingen worden doorgelaten.

In de rechter is het filter 90° gedraaid om de weerkaatsingen te minimaliseren. Bijna al het weerkaatste zonlicht is verwijderd.

Zie: http://nl.wikipedia.org/wiki/Polarisatie_%28elektromagnetisme%29

Zie: <http://www.kennislink.nl/publicaties/dun-materiaal-als-ideale-lichtvanger>

Zie: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/polarizedlight/filters/index.html>

Kleur van licht: frequentie en golflengte (§ 3.1)

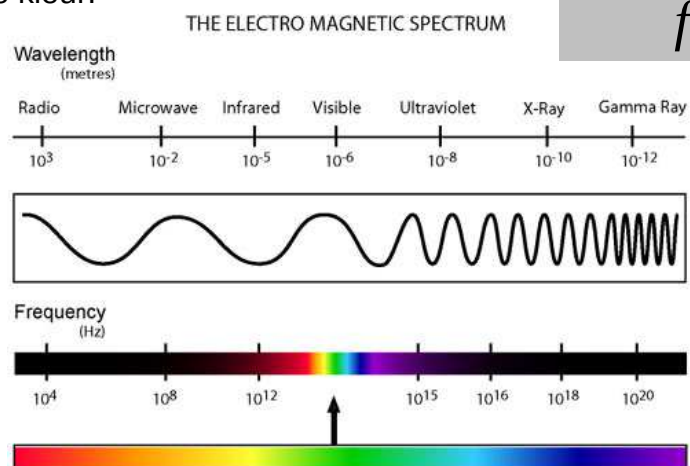
De frequentie van het licht bepaalt de kleur.

Zoals bij alle golven blijft bij de overgang van het ene medium naar het andere medium de frequentie f constant.

Blauw licht: $f_{\text{blauw}} = 0,650 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.

De golflengte van dit licht is:

- In lucht $\lambda_{\text{lucht}} = 0,46 \mu\text{m}$
- In glas $\lambda_{\text{glas}} = 0,31 \mu\text{m}$ ($n_{\text{glas}} = 1,5$).



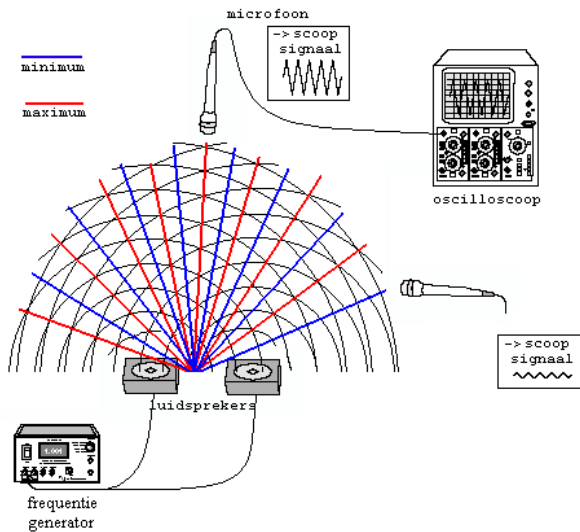
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

¹ Sommige dieren, zoals bijen, kunnen de polarisatie-richting van licht wel herkennen.

Licht als golfverschijnsel: Interferentie met dubbelspleet (§ 3.1)

Interferentie van watergolven en van geluidsgolven is besproken in VWO 5 (§ 4.3).

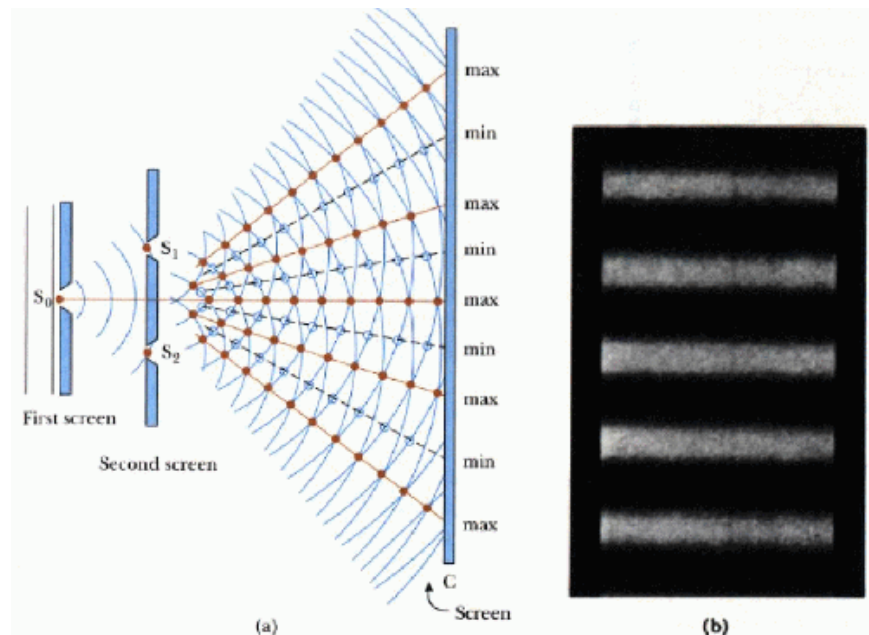
- Als golven **in fase** aankomen, versterken ze elkaar. Het water zal extra hoog en laag gaan en het geluid zal extra hard klinken.
- Als golven **in tegenfase** aankomen, doven ze elkaar uit. Het water zal (bijna) niet bewegen en er zal (bijna) geen geluid te horen zijn.



Thomas Young (1803)

Ook bij licht blijkt interferentie mogelijk: **Experiment van Young.**

De twee (smalle) openingen S_1 en S_2 zijn vergelijkbaar met de luidsprekers.



Zie: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Tweespletenexperiment>

Licht als golfverschijnsel: Interferentie met tralie (§ 3.1)

De golflengte van licht kan worden gemeten met een tralie. In een tralie zijn veel openingen; bijvoorbeeld 600 mm^{-1} . De tralieconstante d is de afstand 'tussen' twee openingen; in dit voorbeeld $d = \frac{1}{600} \text{ mm} = \frac{1}{600} \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Iedere opening is zo klein, dat er (bijna) volledige buiging is. Er ontstaat een interferentiepatroon van veel bronnen:

- In bijna alle richtingen is er sprake van uitdoving.
- In een klein aantal richtingen α_n is er versterking. De richtingen van versterking zijn afhankelijk van de golflengte van het licht.

Er geldt ²: $\sin(\alpha_n) = \frac{n \cdot \lambda}{d}$

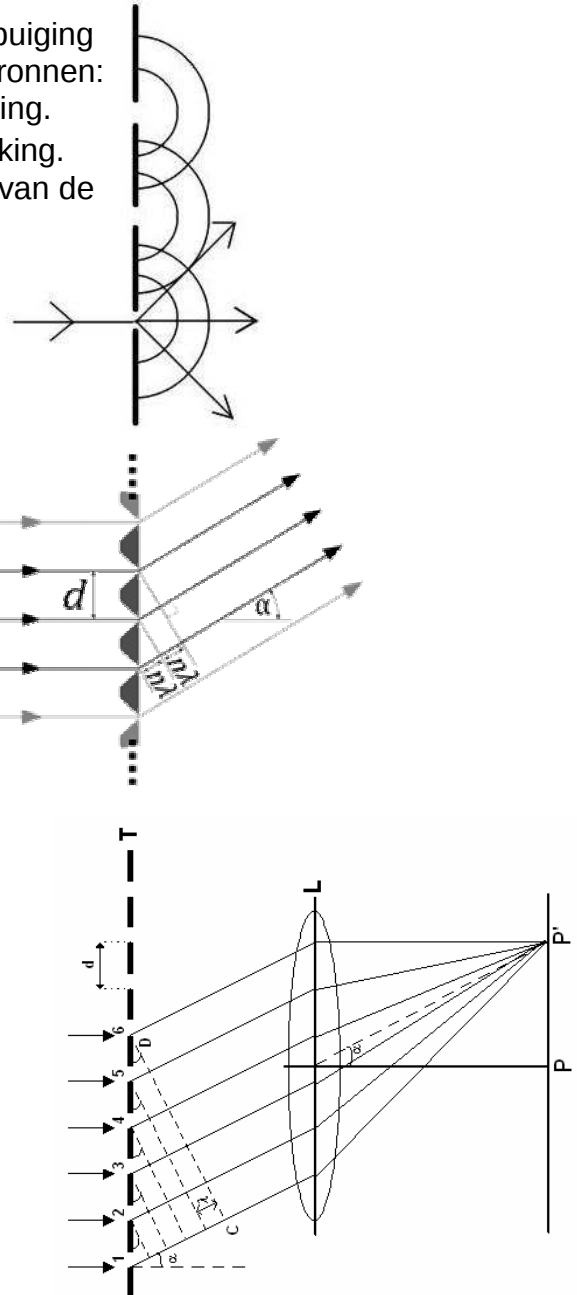
Bij het n^{e} orde maximum legt het licht van twee naast elkaar gelegen openingen precies $n \cdot \lambda$ meer afstand af, zodat alle lichtstralen in de richting α_n elkaar versterken.

Met een bolle lens worden deze evenwijdige lichtbundels op een scherm afgebeeld. Omdat het scherm in het brandvlak van de lens is, geldt:

$$\tan(\alpha_n) = \frac{P - P'}{f_{\text{lens}}}$$

Bestudeer EM-spectrum (§ 3.2)

Nuttige sommen: 1 t/m 5 + 8 t/m 10



² Zie: <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=777824>

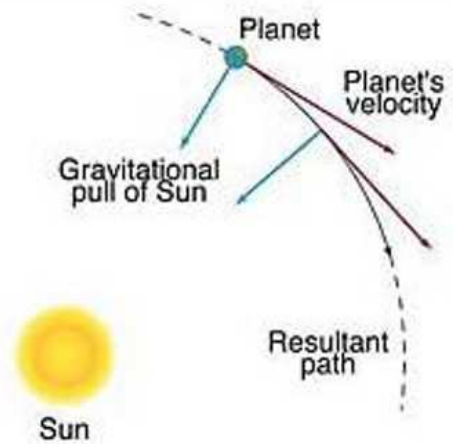
Gravitatie planeetstelsel

Een planeet bevindt zich in het gravitatieveld van een centrale ster.
Bijvoorbeeld: De aarde voert een eenparige cirkelbeweging³ uit rondom de zon.

Gegeven:

- BINAS 7 $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
BINAS 32C $r_{\text{aarde} - \text{zon}} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$
BINAS 32C $M_{\text{zon}} = 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
BINAS 31 $m_{\text{aarde}} = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
BINAS 31 $T_{\text{aarde}} = 365,25 \text{ d} = 31558 \cdot 10^3 \text{ s}$

$$\rightarrow v_{\text{aarde}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 10^9}{31558 \cdot 10^3} = 30 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$



Krachten:

$$F_{\text{grav}} = F_{\text{mpz}} \Leftrightarrow \frac{G \cdot m_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{zon}}}{r^2} = \frac{m_{\text{aarde}} \cdot v^2}{r}$$

Energie:

Handige keuze: $E_{\text{grav}} = 0$ als $r = \infty$.

$$E_{\text{aarde}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{grav}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{aarde}} \cdot v^2 - \frac{G \cdot m_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{zon}}}{r}$$

Combinatie:

$$E_{\text{aarde}} = \frac{1}{2} \frac{G \cdot m_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{zon}}}{r} - \frac{G \cdot m_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{zon}}}{r} = - \frac{1}{2} \frac{G \cdot m_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{zon}}}{r}$$

Gevolg:

De kinetische energie van de aarde is (op het – teken na) precies de helft van de gravitatie-energie: $E_{\text{kin}} = 2,7 \cdot 10^{33} \text{ J}$

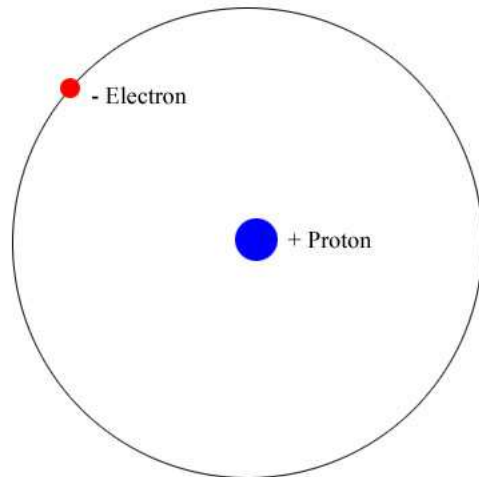
$$E_{\text{grav}} = - 5,4 \cdot 10^{33} \text{ J}$$

De aarde heeft dus $2,7 \cdot 10^{33} \text{ J}$ extra energie nodig om aan de aantrekkende gravitatiekracht van de zon te kunnen ontsnappen.

³ In werkelijkheid is er sprake van een ellipsbaan (1e wet van Kepler; deel VWO5 § 2.6).

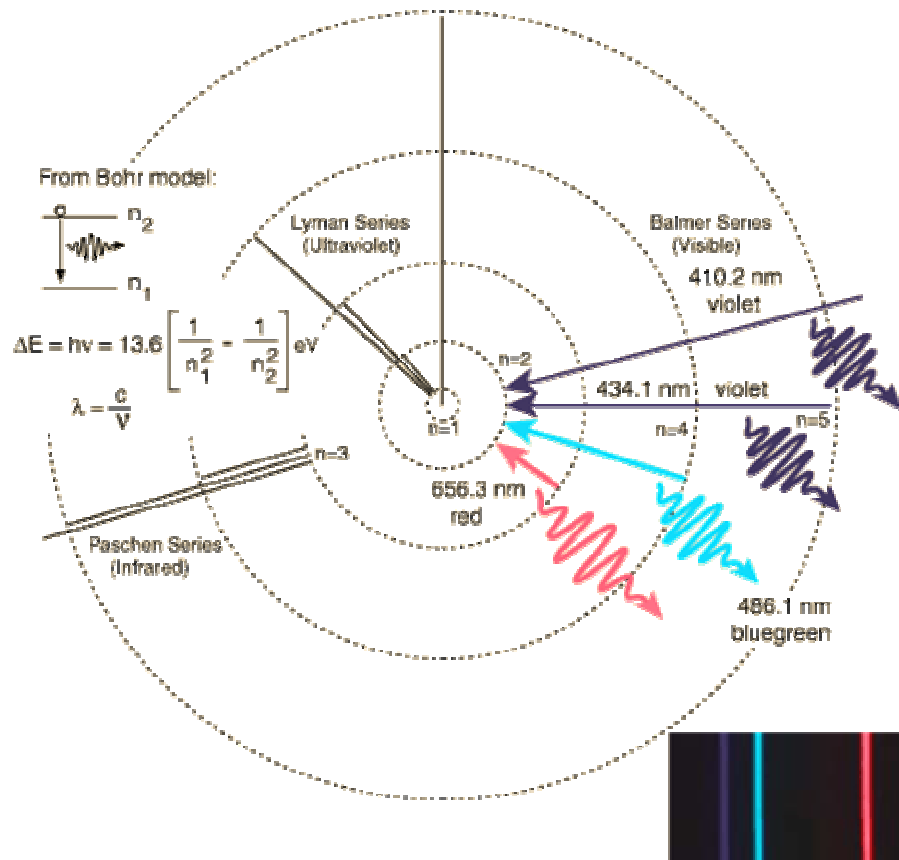
Elektriciteit atoom

Een elektron bevindt zich in het elektrische veld van de positief geladen atoomkern.
Bijvoorbeeld: Het elektron voert een eenparige cirkelbeweging⁴ uit rondom de kern van het waterstofatoom (proton).



Gegeven:

- BINAS 7 $f = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$
 BINAS 7 $r_{\text{H-atoom}} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
 BINAS 7 $q_{\text{proton}} = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 BINAS 7 $q_{\text{elektron}} = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 BINAS 7 $m_{\text{elektron}} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
 BINAS 21 De energieniveaus (en daarmee het spectrum) van het H-atoom



⁴ In de quantummechanica wordt het beeld dat elektronen rondom de kern draaien losgelaten.

In de figuur staat: $\lambda = \frac{c}{\nu}$. In het Engels wordt ν gebruikt voor frequentie f ; dus $\lambda = \frac{c}{f}$.

Krachten:

$$F_{elek} = F_{mpz} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{f \cdot e^2}{r^2} = \frac{m_{elektron} \cdot v^2}{r}$$

Energie:

Handige keuze: $E_{elek} = 0$ als $r = \infty$.

$$E_{elektron} = E_{kin} + E_{elek} = \frac{1}{2} \cdot m_{elektron} \cdot v^2 - \frac{f \cdot e^2}{r}$$

Combinatie:

$$E_{elektron} = \frac{1}{2} \frac{f \cdot e^2}{r} - \frac{f \cdot e^2}{r} = - \frac{1}{2} \frac{f \cdot e^2}{r}$$

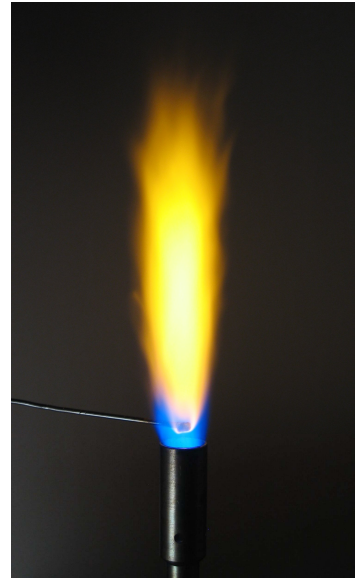
Gevolg:

Als het atoom energie heeft opgenomen, bevindt het zich in een 'aangeslagen toestand'. Het elektron bevindt zich verder bij de kern vandaan (r is groter). Het atoom zal (na korte tijd) vanzelf weer 'terugvallen'; het elektron bevindt zich weer dicht bij de kern. Daarbij verliest het atoom energie.

Aanslaan van atomen:

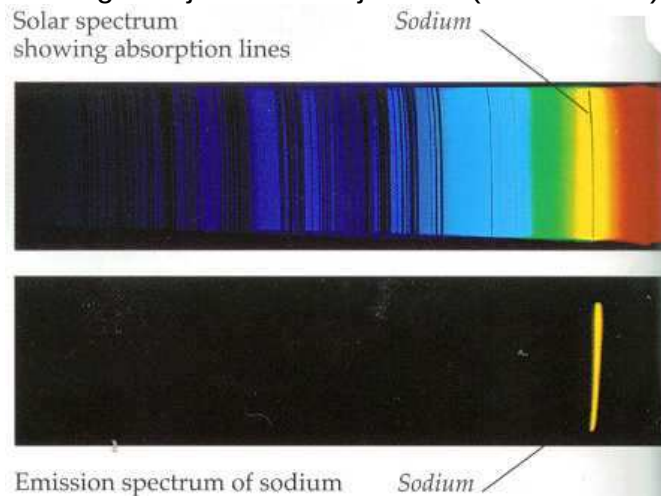
Atomen kunnen energie opnemen door:

- ❑ Thermische excitatie
Door de hoge temperatuur van een vlam worden atomen aangeslagen; de (buitenste) elektronen nemen energie op (boek opgave 12 blz. 118).
- ❑ Gasontlading
In een gasontladingsbuis worden de atomen aangeslagen, doordat er elektrische stroom door het gas loopt (boek blz. 114).
- ❑ Absorptie
Door licht met exact de juiste golflengte te absorberen, raken atomen aangeslagen. In het doorgelaten licht zijn 'absorptielijnen'.
In het zonlicht tonen absorptielijnen de aanwezigheid van atomen (zoals natrium⁵) aan in de fotosfeer van de zon (boek blz. 116).



Emissiespectrum:

Atomen raken deze extra energie kwijt door straling uit te zenden: emissie. Het emissiespectrum van (afzonderlijke) atomen is een 'lijnspectrum'. Iedere atoomsoort heeft een kenmerkend lijnenpatroon. Natrium wordt gekenmerkt door twee 'gele' lijnen dicht bij elkaar (BINAS 20-5).



Spectraalanalyse:

Door spectra te onderzoeken, kan worden vastgesteld welke atoomsoorten aanwezig zijn (boek blz. 117):

- ❑ in een stof in het laboratorium
- ❑ in de 'koelere' buitenlagen van een ster.

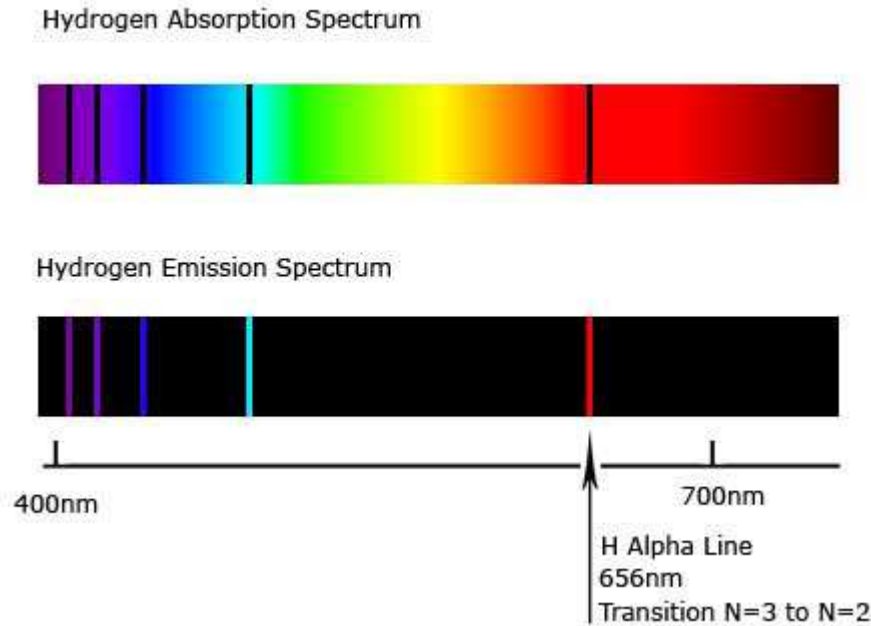
⁵ Engels: 'Sodium'

Spectrum waterstof:

Het spectrum van atomair waterstof is in de 19^e eeuw onderzocht.

Het bestaat uit verschillende reeksen:

- Lyman-reeks in het ultraviolette gedeelte van het spectrum
- Balmer-reeks in het zichtbare gedeelte van het spectrum (zie afbeelding)
- Paschen-reeks in het infrarode gedeelte van het spectrum.



Verschil gravitatie planeetstelsel en elektriciteit atoom:

Een planeet kan, met de juiste snelheid⁶, op iedere afstand rondom een centrale ster draaien. Met andere woorden: de planeet kan iedere hoeveelheid energie bezitten (dus ook: iedere hoeveelheid energie opnemen / afstaan).

Uit het lijnenspectrum van atomen blijkt dat atomen slechts bepaalde hoeveelheden energie kunnen opnemen / afstaan. Blijkbaar kunnen de elektronen niet op iedere afstand rondom de kern draaien. De elektronen zitten in zogenaamde 'schillen' om de kern.

⁶ Dichter bij de centrale ster is een grotere baansnelheid nodig.

Het H-atoom volgens Bohr:

Het elektron heeft een 'golflengte':

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Het elektron kan zich uitsluitend bevinden in een cirkelbaan, die goed past bij deze golflengte:

$$2 \cdot \pi \cdot r_n = n \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\rightarrow v^2 = \frac{n^2 \cdot h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot r_n^2 \cdot m^2}$$

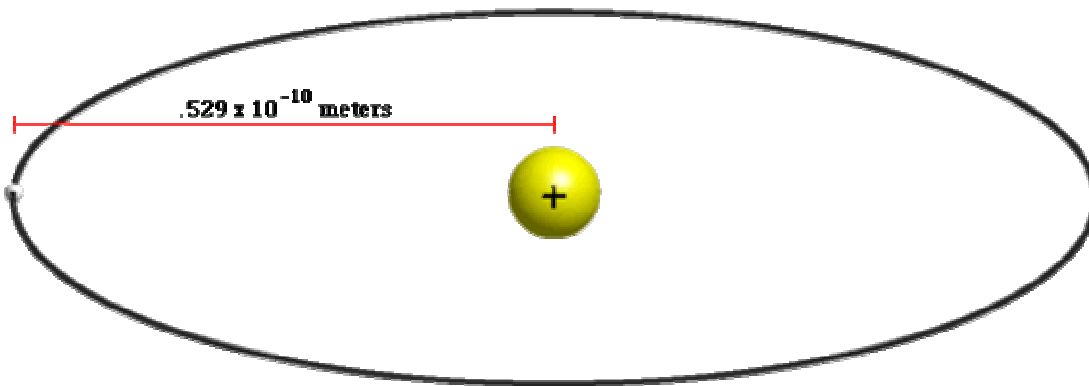


Elektronen kunnen slechts in bepaalde 'schillen' met straal r_n zijn:

Invullen in: $\frac{f \cdot e^2}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r}$ geeft: $r_n = \frac{h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot f \cdot e^2} \cdot n^2$

Grootte van H-atoom:

De 'grondtoestand' is de laagste energietoestand⁷ van een atoom; het elektron bevindt zich dan zo dicht mogelijk bij de kern ($n = 1$): $r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ m.



⁷ Atomen bevinden zich onder normale omstandigheden in de grondtoestand.

Energieniveaus H-atoom:

Het waterstofatoom kan energie opnemen / afstaan, als het elektron naar een andere schil gaat.

➔ De energie van het waterstofatoom = de energie van het elektron.

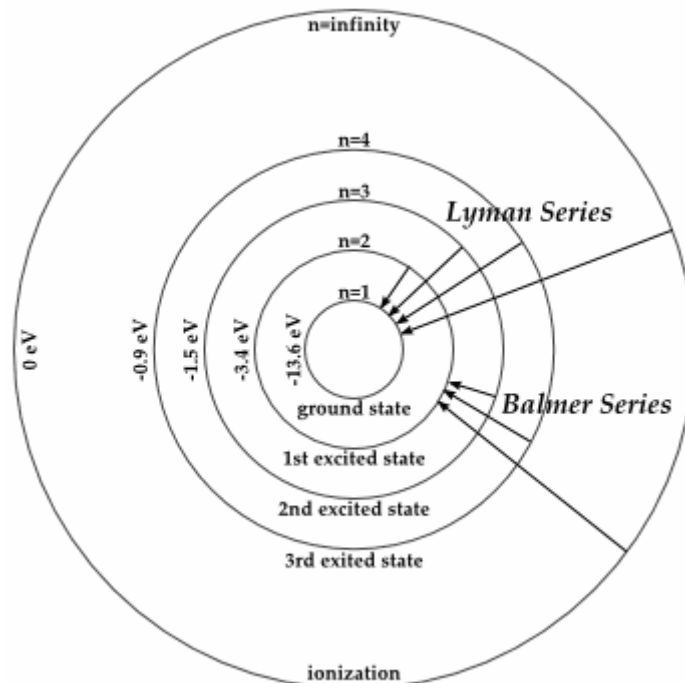
$$E_{\text{elektron}} = -\frac{1}{2} \frac{f \cdot e^2}{r} \quad \& \quad r_n = \frac{h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot f \cdot e^2} \cdot n^2$$

$$\rightarrow E_n = -\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ (eV)}$$

Ionisatie-energie:

In de grondtoestand ($n = 1$) is de energie van het waterstofatoom $-13,6 \text{ eV}$.

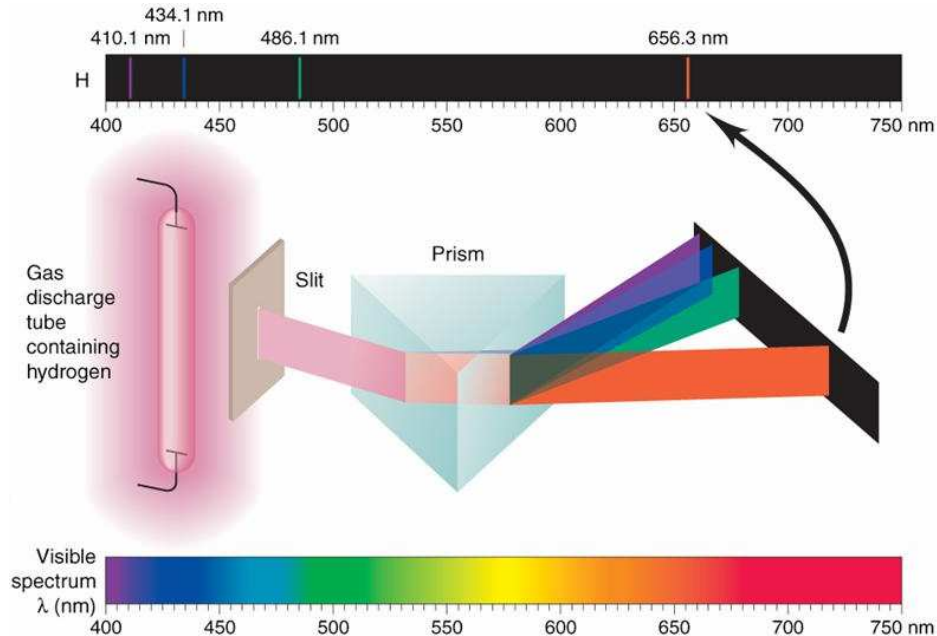
Als het elektron is ontsnapt aan de aantrekking van de kern ($n = \infty$), is de energie van het waterstofatoom 0 eV . Om het waterstofatoom (vanuit de grondtoestand) te ioniseren, is dus $13,6 \text{ eV}$ nodig (BINAS 22).



Lijnspectrum H-atoom:

De gemeten golflengtes van het lijnspectrum van waterstof komen overeen met de energieniveaus volgens de theorie van Bohr.

Bijvoorbeeld: H_α is een lijn in het zichtbare gedeelte van het waterstofspectrum.



Deze lijn komt overeen met een overgang van de 2^e aangeslagen toestand ($n = 3$) naar de 1^e aangeslagen toestand ($n = 2$).

$$\Delta E = E_3 - E_2 = \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right) \cdot 13,6 \text{ eV} = 1,89 \text{ eV} = 3,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{3,0 \cdot 10^{-19}} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (\text{rood licht}).$$

Fotonen:

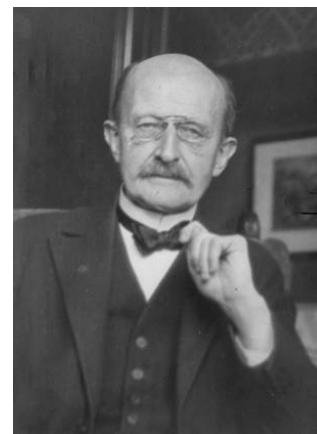
Fotonen zijn lichtdeeltjes met een bepaalde hoeveelheid stralingsenergie.

Deze hoeveelheid energie hangt samen met de kleur (frequentie, golflengte) van het licht volgens:

$$E_{\text{foton}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

BINAS 7 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (constante van Planck)

Bij een energie-overgang in een atoom wordt een foton geabsorbeerd of geëmitteerd.



Energie-overgangen H-atom:

Een foton wordt uitgezonden⁸, als het waterstofatoom gaat van energietoestand n naar energietoestand m. Er geldt:

$$E_{\text{foton}} = E_n - E_m = \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \cdot 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Energie-overgangen (algemeen):

Een foton wordt uitgezonden (geabsorbeerd), als het atoom gaat van energietoestand n naar energietoestand m. Er geldt:

$$E_{\text{foton}} = E_n - E_m = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Continu spectrum (zwarte straler):

Omdat in vaste stoffen atomen / moleculen zeer dicht opeen zijn, liggen de verschillende energieniveaus zeer dicht bij elkaar. Er zijn slechts zeer kleine verschillen in de energie van de verschillende toestanden.

Vaste stoffen produceren daarom geen lijnenspectrum, maar een continu spectrum. 'Alle' golflengtes zijn in het licht aanwezig.

Het continue spectrum hangt niet af van het materiaal, maar slechts van de temperatuur van het voorwerp. Er is sprake van warmtestraling van een zogenaamde zwarte straler⁹.

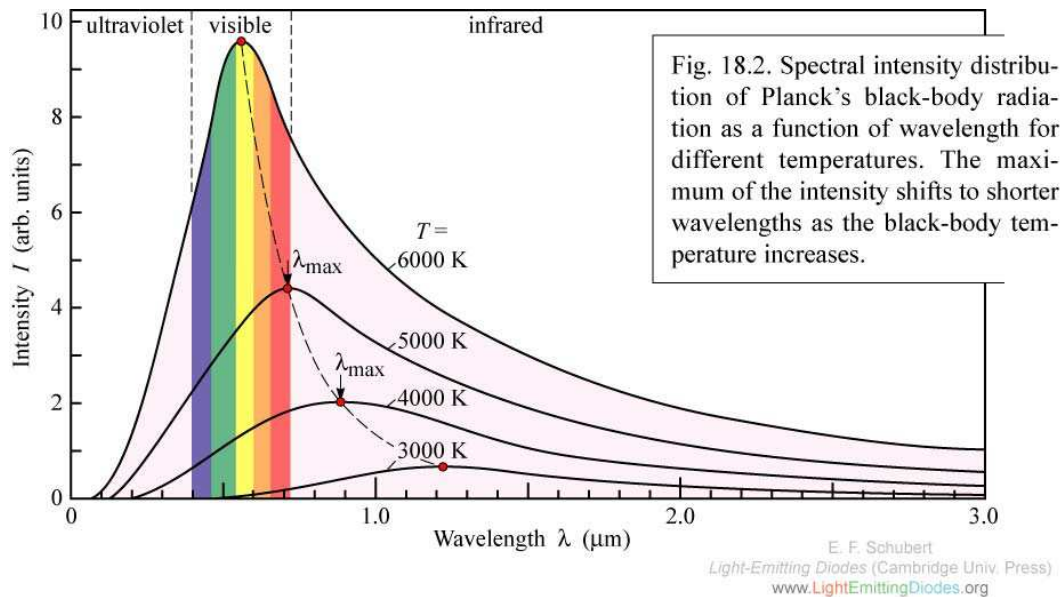
Voorwerpen die zich bij benadering gedragen als zwarte stralers zijn:

- gloeilamp en halogeenlamp (boek blz. 113 – 144)
- ster (zon).

⁸ Of geabsorbeerd, als er sprake is van een absorptielijn.

⁹ Een zwarte straler is een voorwerp dat al het opvallende licht absorbeert. Op hoge temperatuur straalt een zwarte straler veel warmtestraling uit ('Blackbody radiation'). Tegenover een zwarte straler staat een idelale spiegel. Dit reflecteert al het opvallende licht, maar zendt zelf geen straling uit.

Planck en de zwarte straler:



Het licht dat een zwarte straler uitzendt verandert als de temperatuur stijgt:

- Er wordt meer licht uitgezonden:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \quad (\text{BINAS 7})$$

- Er wordt 'blauwer' licht uitgezonden:

$$\lambda_{\max} = \frac{k_w}{T} \quad k_w = 2,9 \cdot 10^{-3} \quad (\text{BINAS 7})$$

Planck kon in 1900 een verklaring geven door aan te nemen dat licht uitsluitend wordt uitgezonden in fotonen waarvan de energie afhangt van de frequentie van

het licht: $E = h \cdot f$

- Een voorwerp van $3,0 \cdot 10^3$ K is roodgloeiend.
- Een voorwerp van $4,0 \cdot 10^3$ K is witheet.
- De temperatuur van het 'oppervlak' van de zon blijkt $6,0 \cdot 10^3$ K; de kleur die namelijk het meest wordt uitgezonden is groen ($\lambda = 480$ nm).



Nuttige sommen: 12 t/m 18

Om een elektron uit een vaste stof (metaal) vrij te maken is energie nodig.
De minimaal benodigde hoeveelheid energie: 'uittree-energie E_{uit} ' (BINAS 24).
Manieren waardoor elektronenemissie mogelijk is:

1. Door de temperatuur van het metaal te verhogen: thermische emissie
Voorbeeld: gloeidraad (kathode)
2. Door beschieten met zeer snel bewegende deeltjes: botsingsemissie
3. Door bestralen met licht: foto-emissie (foto-elektrisch effect).

Licht als deeltjesverschijnsel: Foto-elektrisch effect (§ 3.5)

Niet de totale hoeveelheid stralingsenergie (van de lichtgolf), maar de energie van één foton (van één lichtdeeltje) bepaalt of foto-emissie mogelijk is.
Het licht moet 'blauw' genoeg zijn. Heel veel 'rood' licht volstaat niet.

Foto-emissie is slechts mogelijk indien: $E_{foton} \geq E_{uit}$.

Iedere metaalsoort heeft een grensgolflengte λ_{grens} (grensfrequentie f_{grens}),

waarbij foto-emissie mogelijk is: $\lambda_{grens} = \frac{h \cdot c}{E_{uit}}$ ofwel $f_{grens} = \frac{E_{uit}}{h}$

Als $\lambda < \lambda_{grens}$ ($f > f_{grens}$), komen elektronen vrij met: $E_{kin,max} = E_{foton} - E_{uit}$

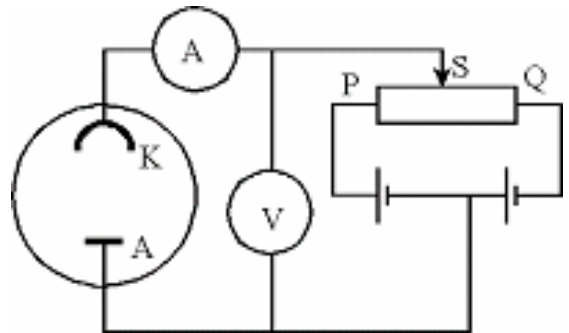
Fotocel

Door de kathode te bestralen met verschillende frequenties licht, kan:

- De uittree-energie van het kathodemetaal worden bepaald. Daartoe moeten de vrijgekomen elektronen worden afgeremd, totdat er geen stroom meer loopt door de

μA -meter: $E_{kin,max} = |e \cdot U_{rem}|$.

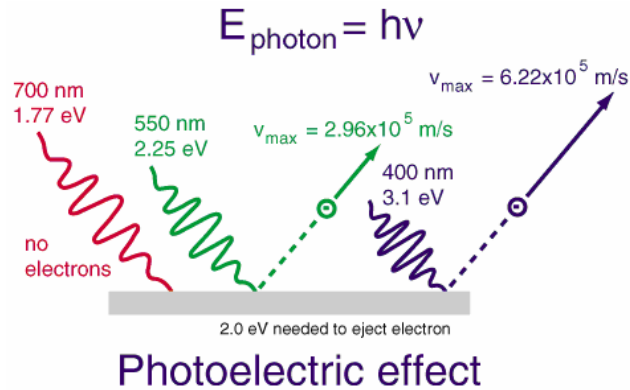
- De constante van Planck h worden bepaald (som 24).



Zie: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>.

Rekenvoorbeeld:

metaal met uittree-energie $E_{uit} = 2,00 \text{ eV}$.



- Rood licht met $\lambda = 700 \text{ nm}$

De energie van de fotonen is: $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 2,84 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,77 \text{ eV}$.

Eén foton vertegenwoordigt niet voldoende energie om een elektron vrij te maken. Omdat er nooit meer dan één foton tegelijkertijd 'botst' met een elektron, kan rood licht geen foto-emissie veroorzaken.

- Grensgolflengte λ_{grens}
Om elektronen vrij te maken uit dit metaal moet de golflengte kleiner zijn dan:

$$\lambda_{\text{grens}} = \frac{h \cdot c}{E_{\text{uit}}} = 621 \text{ nm}.$$

De elektronen zouden dan 'zonder snelheid' wegvliegen.

- Groen licht met $E_f = 2,25 \text{ eV}$ ($\lambda = 550 \text{ nm}$)
De maximale kinetische energie waarmee elektronen ontsnappen is $0,25 \text{ eV}$.
De snelheid waarmee deze elektronen wegvliegen is:

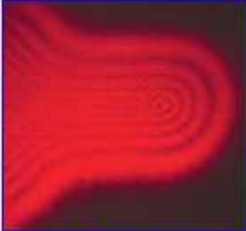
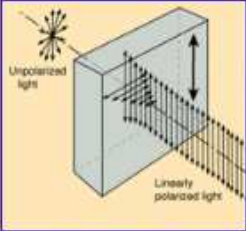
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{elek}} \cdot v^2 = 0,25 \text{ eV} = 4,0 \cdot 10^{-20} \text{ J} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m_{\text{elek}}}} = 3,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

Nuttige sommen: 21 t/m 24

Begin 20e eeuw:

Wave-Particle Duality: Light

Does light consist of particles or waves? When one focuses upon the different types of phenomena observed with light, a strong case can be built for a wave picture:

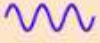




Interference

Diffraction

Polarization

By the turn of the 20th century, most physicists were convinced by phenomena like the above that light could be fully described by a wave, with no necessity for invoking a particle nature. But the story was not over.

Phenomenon	Can be explained in terms of waves.	Can be explained in terms of particles.
<u>Reflection</u>	 ✓	 ✓
<u>Refraction</u>	 ✓	 ✓
<u>Interference</u>	 ✓	 ✗
<u>Diffraction</u>	 ✓	 ✗
<u>Polarization</u>	 ✓	 ✗
<u>Photoelectric effect</u>	 ✗	 ✓

Bron: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quacon.html#quacon>

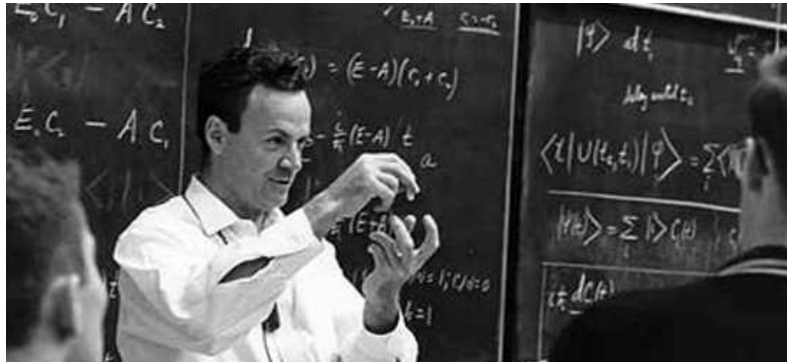
De golf-deeltje dualiteit blijkt belangrijk in de 'Kwantummechanica', die in de eerste 30 jaren van de vorige eeuw is ontstaan:

1900	Planck	Straling van een zwart lichaam
1905	Einstein	Foto-elektrisch effect
1913	Bohr	Kwantumtheorie van spectra
1924	Pauli	Uitsluitingsprincipe
1925	de Broglie	Golfkarakter van materie
1926	Schrödinger	Golfvergelijking
1927	Heisenberg	Onzekerheidsrelatie
1927	Born	Interpretatie golfvergelijking

Kwantummechanica:

Ondanks het succes van Bohr bij het waterstofatoom, bleek het onmogelijk om de eigenschappen van de andere atoomsoorten te beschrijven. Een geheel nieuwe natuurkunde was noodzakelijk. Deze theorie (de kwantummechanica) beschrijft het gedrag van de natuur op (sub)atomaire schaal.

Dat deze theorie in tegenspraak is met onze dagelijkse ervaringen (intuïtie) blijkt uit twee citaten van Richard Feynman:



... I think I can safely say, that nobody understands quantum mechanics.

A philosopher once said 'It is necessary for the very existence of science that the same conditions always produce the same results'. Well, they don't!

- <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=809436>
- <http://nl.wikipedia.org/wiki/Kwantummechanica>
- <http://www.hef.ru.nl/~kleiss/Quantumhovo.pdf> (moeilijk)

Golf-deeltje dualiteit:

Licht manifesteert zich als een golfverschijnsel, met name bij interferentieproeven (tralie, dubbelspleet):

Licht manifesteert zich echter ook als deeltjesverschijnsel (fotonen), met name bij het foto-elektrisch effect:

Een deeltje (zoals een elektron) manifesteert zich als een deeltje, b.v. in een kathodestraalbuis:

Aan een elektron, b.v. in een elektronenmicroscop (boek blz. 140 – 143), wordt een golflengte toegekend:

Zie: <http://www.vcbio.sci.kun.nl/fesem/intro/>

$$\lambda = \frac{c}{f}$$
$$E = h \cdot f$$
$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Bovenstaande 'tegenstrijdigheden' vormen één van de uitgangspunten van de kwantummechanica.

Met zogenaamde golf functies kan uitsluitend de waarschijnlijkheid van de uitkomst van metingen worden berekend. De kwantummechanica is niet-deterministisch.

Nuttige sommen: 25 + 26