

Hoofdstuk 29

Essential University Physics

Richard Wolfson

2nd Edition

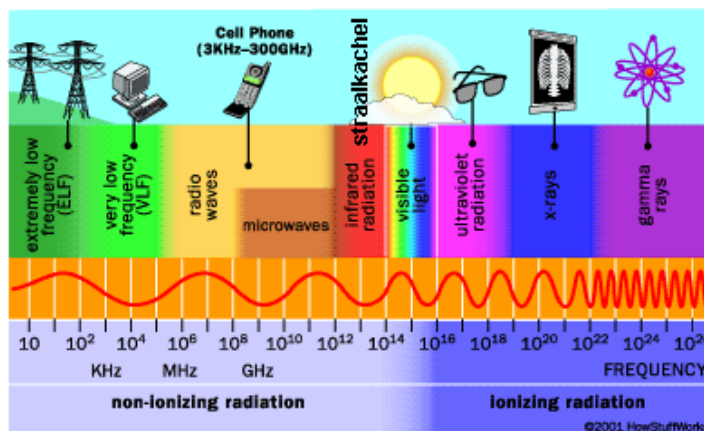
Elektromagnetische Golven

Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves

Bewijzen 29.2;3;4 : niet te kennen

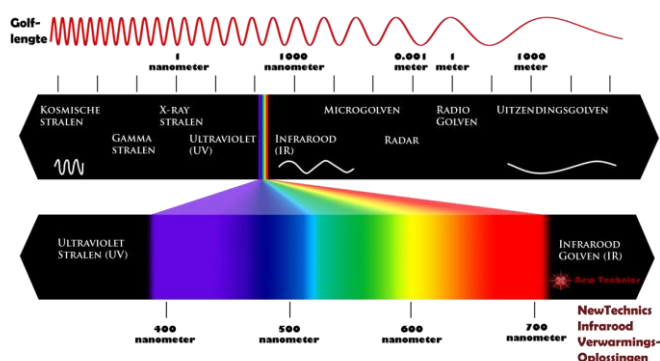
Het Elektromagnetisch Spectrum

- Elektromagnetische golven strekken zich uit over een groot gebied van frequenties en golflengten: van radiogolven (lage frequentie, grote golflengte) tot gamma stralen (zeer hoge frequentie, zeer kleine golflengte)



Het Elektromagnetisch Spectrum

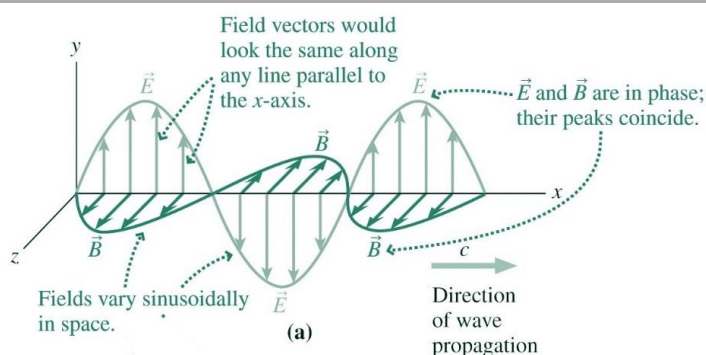
- zichtbaar licht beslaat het golflengtegebied van ongeveer 380 nm (violet) tot 780 nm (rood).



Rood en infrarood wordt warmtestraling genoemd, blauw en UV wordt soms “koud” licht genoemd. De energie van licht (en elm-straling) wordt overgedragen per “foton”. Welk foton heeft het meest energie : een foton van rood of een foton van blauw licht?

3

Het Elektromagnetisch Spectrum



Gemeenschappelijke eigenschappen voor alle frequenties :

- **T.E.M.** : transversaal elektromagnetisch (in vacuüm)

- De **snelheid** in vacuüm is : $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

- De **energie** per foton is : $E = hf$
 h = constante van Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

4

29. De vergelijkingen van Maxwell

Table 29.2 Maxwell's Equations

Law	Mathematical Statement	What It Says	Equation Number
Gauss for \vec{E}	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$	How charges produce electric field; field lines begin and end on charges.	(29.2) $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Gauss for \vec{B}	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	No magnetic charge; magnetic field lines don't begin or end.	(29.3)
Faraday	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	Changing magnetic flux produces electric field.	(29.4)
Ampère	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	Electric current and changing electric flux produce magnetic field.	(29.5) $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

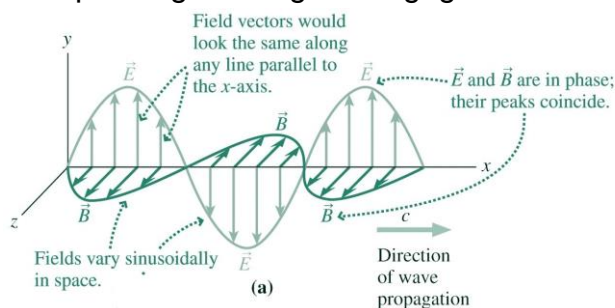
© 2012 Pearson Education, Inc.

- De vgl van Maxwell beschrijven alle elektromagnetische velden en verschijnselen
- In vacuüm is $q=0$ en $I=0 \rightarrow$ volledige symmetrie tussen E en B
- Bijgevolg is in vacuüm de enige bron voor het ene veld de verandering van het andere veld :
 - Verandering in B \rightarrow E (29.4)
 - Verandering in E \rightarrow B (29.5)

5

29.4 Vlakke Elektromagnetische Golven

- Een **vlakke** elektromagnetische golf bestaat uit **elektrische en magnetische velden** die in de ruimte enkel in de voortplantingsrichting van de golf veranderen.
 - De velden staan loodrecht op elkaar en op de voortplantingsrichting.
 - De voortplantingsrichting wordt gegeven door $\vec{E} \times \vec{B}$



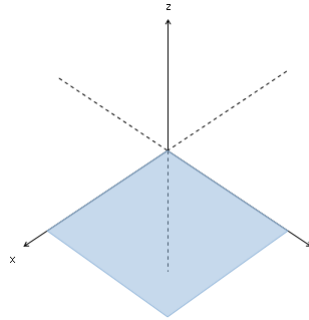
© Johan D'heer

8

Conceptvraag

- If the magnetic field of an electromagnetic wave is in the +x-direction and the electric field of the wave is in the +y-direction, the wave is traveling in the

- A) xy-plane.
- B) +z-direction.
- C) -z-direction.
- D) -x-direction.
- E) -y-direction.



© Johan D'heer

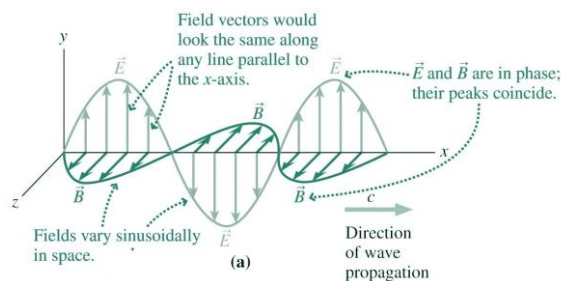
9

29.4 Vlakke Elektromagnetische Golven

- Wiskundige voorstelling (voor een golf in de pos. x-richting):
Een e.m. golf bestaat uit een elektrisch veld en een magnetisch veld golf, dus zijn er twee vgl'n. nodig.

$$\vec{E}(x, t) = E_p \sin(kx - \omega t) \hat{j} \quad \hat{j} \equiv \vec{e}_y$$

$$\vec{B}(x, t) = B_p \sin(kx - \omega t) \hat{k} \quad \hat{k} \equiv \vec{e}_z$$



© Johan D'heer

10

29.5 Eigenschappen van E.M. Golven

- In vacuüm voldoen de elektrische en magnetische veldgolven aan de volgende golfvergelijkingen:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

- (bewijs Wolfson 29.4, niet kennen)
- (gebaseerd op Maxwell vergelijkingen)

- De **snelheid** van e.m. golven in vacuüm is dus:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

Cfr. algemene golfvlg uit vorig hoofdstuk:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2})(4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2})}} = 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

- Dit is precies de lichtsnelheid c . → Lichtgolven zijn e.m. golven!

ϵ_0 = permittiviteit van het luchtledige = $8,854188 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{Nm}^2)$

μ_0 = Permeabiliteit van het luchtledige = $4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm} / \text{A}$

11

29.5 Eigenschappen van E.M. Golven

- Op elk ogenblik geldt voor een e.m. golf in vacuüm:

-

$$E = cB \quad \text{en dus} \quad \vec{v} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad \begin{array}{l} \text{(bewijs Wolfson 29.4, niet kennen)} \\ \text{(eenheden : cfr bv wet Faraday)} \end{array}$$

- \vec{E} en \vec{B} staan loodrecht op de voortplantingsrichting, dus e.m. golven zijn **transversale** golven.
- In middenstoffen, bvb. lucht, glas, is de snelheid van e.m. golven kleiner dan c .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} c \quad \text{of} \quad \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = n$$

- In sommige middenstoffen kan de snelheid v afhangen van de golflengte. Dergelijke middenstoffen zijn dispersieve middenstoffen. (n = brekingsindex in de optica)
- Net zoals mechanische golven, vertonen e.m. golven breking en terugkaatsing.

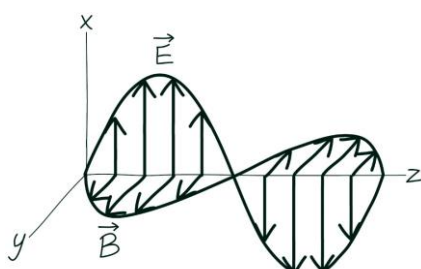
ϵ_0 = permittiviteit van het luchtledige = $8,854188 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{Nm}^2)$

μ_0 = Permeabiliteit van het luchtledige = $4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm} / \text{A}$

12

29.5 Polarisatie van E.M. Golven

- Is de richting van \vec{E} vast, dan is de e.m. golf **gepolariseerd**.
 - Vb.: e.m. golven afkomstig van TV en radio antennes, laserlicht.
 - Licht afkomstig van gloeilampen, de zon, e.d. is niet gepolariseerd.
- Het vlak gevormd door \vec{E} en de voorplantingsrichting noemt men het **polarisatievlak**.



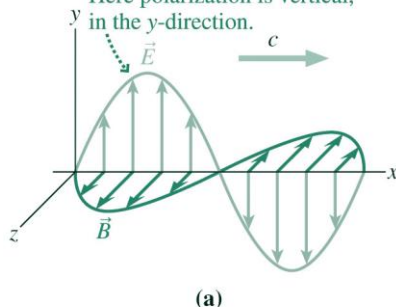
Polarisatievlak is hier het X,Z-vlak

© Johan D'heer

14

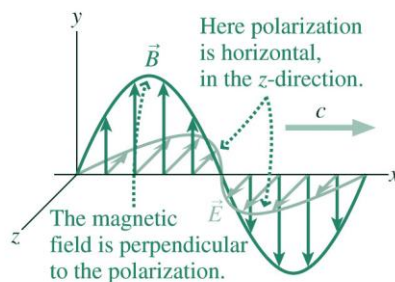
29.5 Polarisatie van E.M. Golven

Electromagnetic waves are polarized in the direction of their electric field.
Here polarization is vertical, in the y-direction.



(a)

© 2012 Pearson Education, Inc.



(b)

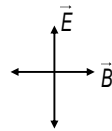
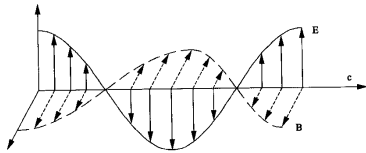
- De **polarisatierichting** is de richting van het elektrisch veld.

© Johan D'heer

15

29.5 Polarisatie van E.M. Golven

- Sommige materialen (vb. Polaroid) laten enkel e.m. golven door waarvan het elektrisch veld een bepaalde richting heeft. D.i. de doorlaatrichting van het materiaal.

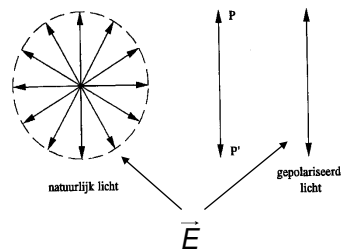


Voorstelling e.m. golf

Polariseren van licht met Polaroid

$$\vec{E}_{uit} = \vec{E}_0 \cos \alpha$$

$$\vec{S}_{uit} = S_0 < \cos^2 \alpha > = \frac{1}{2} S_0$$



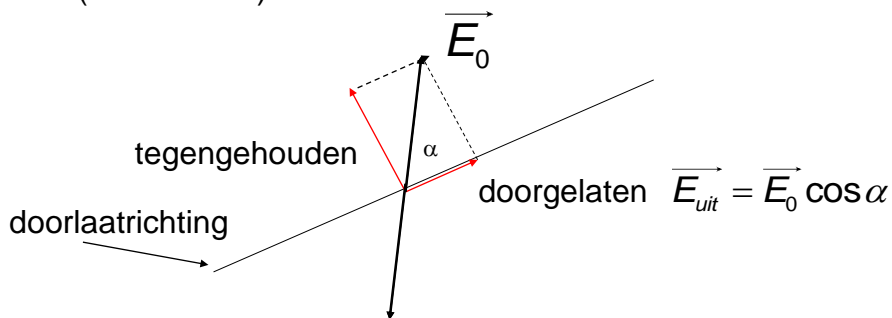
© Johan D'heer

16

29.5 Polarisatie van E.M. Golven

- Wet van Malus**

Gepolariseerd licht valt in op polariserend materiaal (vb. Polaroid)



Intensiteit $S \sim \text{amplitude}^2 \longrightarrow S_{uit} = S_0 \cos^2 \alpha$

© Johan D'heer

17

Vraagstuk

- Zonlicht valt in op twee polaroidfilters waarvan de doorlaatrichtingen een hoek van 20° met elkaar maken.

Vergelijk de intensiteit van het licht dat uit de filters komt met de invallende intensiteit.

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

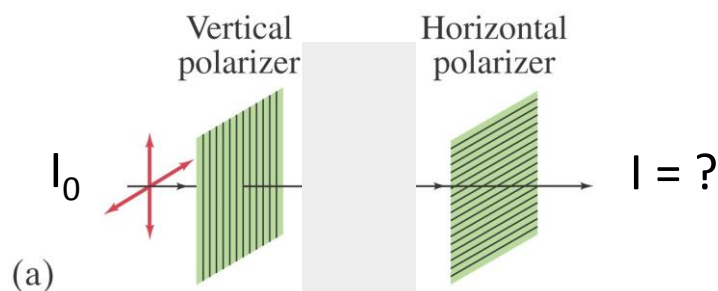
$$A_2 = A_1 \cos(20^\circ) = 0,94 A_1$$

$$I_2 = (0,94)^2 I_1 = 0,88 I_1 = 0,44 I_0$$

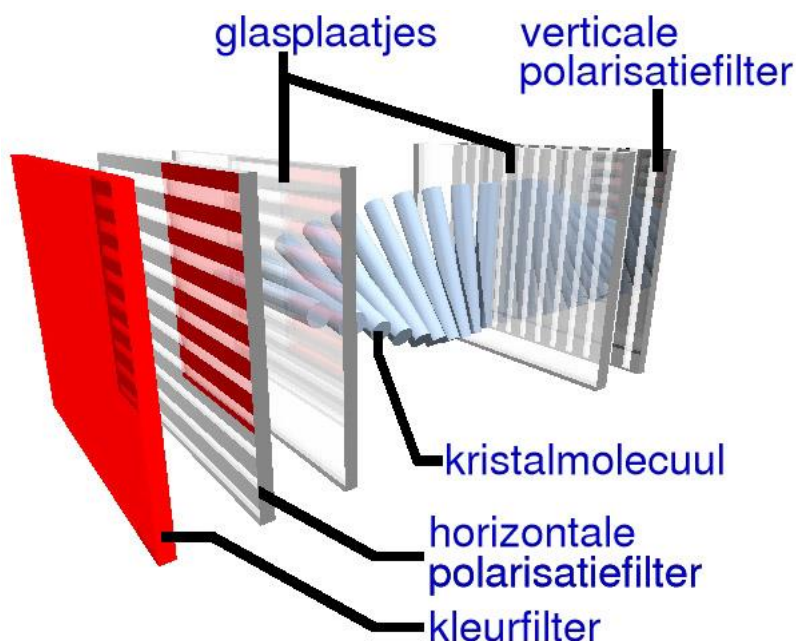
© Johan D'heer

18

Vraagstuk



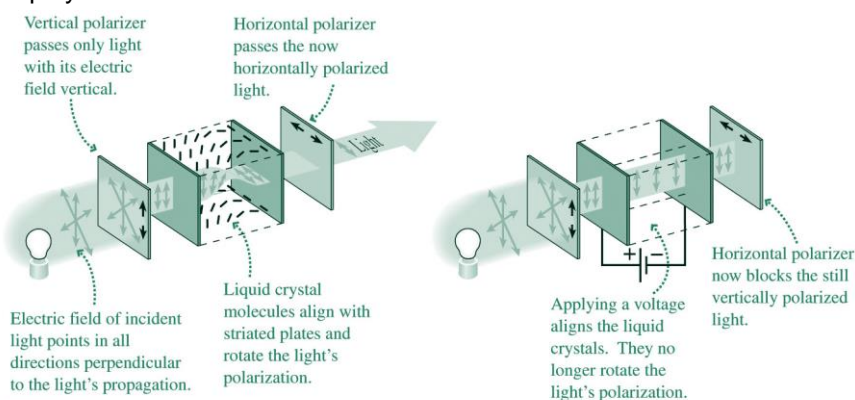
29.5 LCD kristal (liquid crystal displays)



20

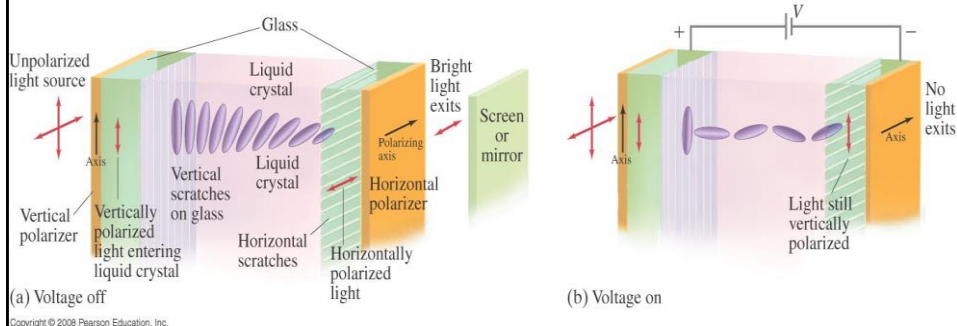
29.5 Polarisatie van E.M. Golven

- De liquid crystal displays (LCD's) in computers, televisies, gsm's, iPods, en andere toestellen gebruiken vloeibare kristallen om de polarisatierichting van licht te roteren, waardoor het licht wordt tegengehouden of doorgelaten.
- Verschillende individuele pixels vormen samen een typisch liquid crystal display.

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

21

29.5 Polarisatie van E.M. Golven



Horloge, rekentoestel : extern invallend licht en reflectie op spiegel;
 twee doorgangen door het LCD kristal

LCD scherm : interne lichtbron achteraan (TL lamp; LED lamp) ; één
 doorgang door het LCD kristal

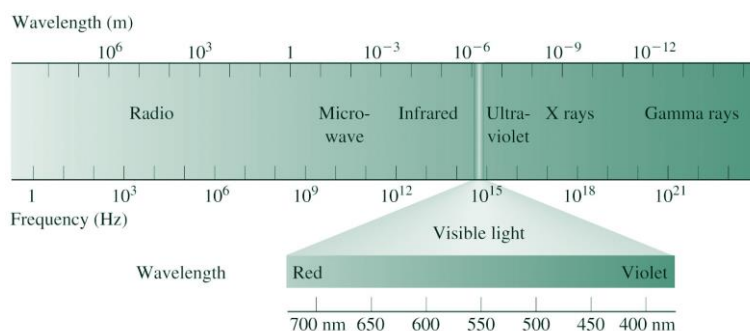
Gróte LED schermen in stadions : elk pixel aangestuurd door één
 eigen LED-lampje (zgn LED-TV is dikwijls LCD scherm met LED verlichting achteraan)

© Johan D'heer

22

29.6 Het Elektromagnetisch Spectrum

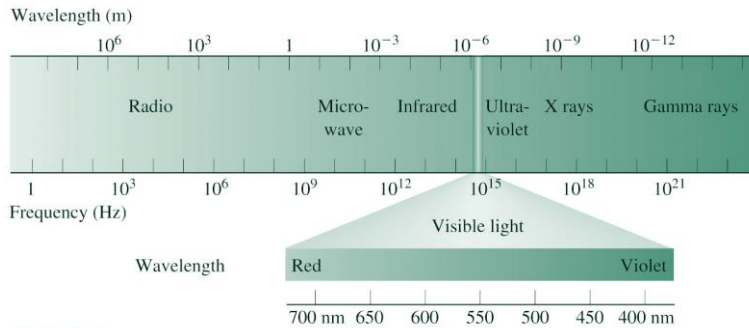
- Elektromagnetische golven strekken zich uit over een groot gebied van frequenties en golflengten: van radiogolven (lage frequentie, grote golflengte) tot gamma stralen (zeer hoge frequentie, zeer kleine golflengte)
 - zichtbaar licht beslaat het golflengtegebied van ongeveer 380 nm (violet) tot 780 nm (rood).



© Johan D'heer

23

29.6 Het Elektromagnetisch Spectrum



© 2012 Pearson Education, Inc.

Gemeenschappelijke eigenschappen :

- T.E.M. : transversaal elektromagnetisch (in vacuum)

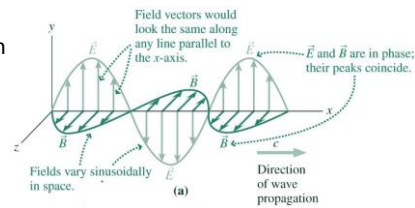
$$E = cB \quad \text{en} \quad \vec{v} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

- De snelheid in vacuum is :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

- De energie per foton is : $E = hf$

$$h = \text{constante van Planck} \quad h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

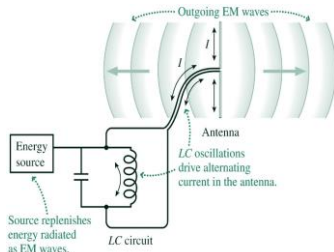


© Johan D'heer

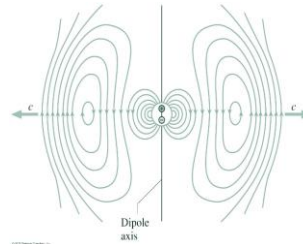
24

29.7 Hoe ontstaan E.M. Golven?

- e.m. golven worden gegenereerd door *elektrische ladingen welke een versnelling ondergaan*.
 - De meest efficiënte bronnen van e.m. straling hebben een afmeting van de grootte-orde van de golflengte van de geproduceerde golven.
 - **Radiogolven** worden gegenereerd door wisselstromen in metalen antennes.



A radio transmitter and antenna

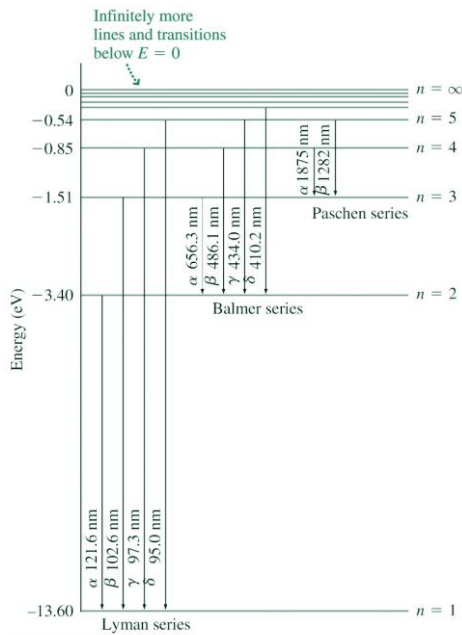


Electric fields of an oscillating electric dipole

© Johan D'heer

25

Energieniveau diagram H-atom $hf=\Delta E$



Paschen reeks :

- grote golflengte
- Lage frequentie
- Lage energie
- Infrarood

Balmer reeks

- Grotere energie
- ...
- Zichtbaar

Lyman reeks

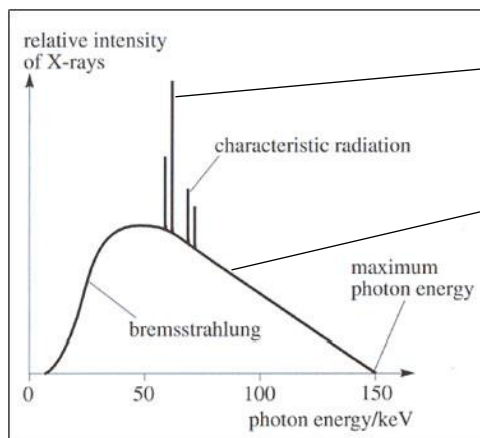
- Korte golflengte
- Hoge frequentie
- Veel energie
- Ultra violet

© 2012 Pearson Education, Inc.

26

Röntgenstraling (X-Straling) $hf=\Delta E$

Röntgenspectrum



Discrete gedeelte
karacteristiek voor anode
(vergelijkbaar met diagram
H-atoom)

Continu gedeelte
(remstraling)

Maximale energie X-stralen

$$\begin{aligned}
 E_{\max} &= eU \\
 &= hf_{\max} \\
 &= \frac{hc}{\lambda_{\min}}
 \end{aligned}$$

© Johan D'heer

27

29.7 Hoe ontstaan E.M. Golven? $hf = \Delta E$

- Moleculaire vibraties en rotaties produceren **infrarood golven**.
 - $f \sim 10^{13} \text{ Hz}$; Energie $\sim 0.01 \text{ eV}$
 - **Zichtbaar licht** komt grotendeels uit processen op atomaire schaal (buitenste elektronlagen).
 - $f \sim 10^{15} \text{ Hz}$; Energie $\sim 1 \text{ eV}$
 - **X-stralen** worden geproduceerd door het zeer snelle afremmen van elektrische lading (remstraling) of door atomaire processen in de binnenste elektronlagen van zwaardere atomen (karakteristieke straling).
 - $f \sim 10^{18} \text{ Hz}$; Energie $\sim 1 \text{ keV}$
 - **Gammastralen** komen voort uit nucleaire processen.
 - $f \sim 10^{21} \text{ Hz}$; Energie $\sim 1 \text{ MeV}$
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

28

29.8 Energie in E.M. Golven

Een compacte bron (vb. atoom) zendt sferische golven uit, dus zal, met P het uitgezonden vermogen van de bron, anderzijds ook gelden :

(S : intensiteit)

$$\bar{S} = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2}$$

Vb: gemiddelde intensiteit van het zonlicht ter hoogte van de aarde $\cong 1,35 \text{ kW/m}^2$ (buiten de dampkring) en na passage door de atmosfeer $\cong 1,0 \text{ kW/m}^2$ (bij loodrechte inval en geen bewolking)

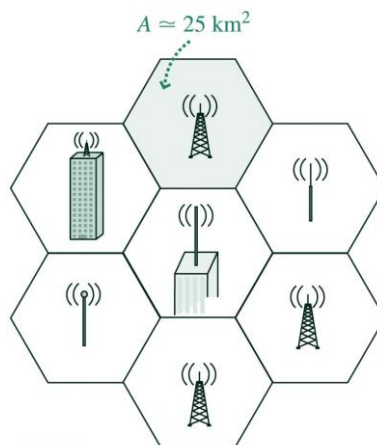
Vraagstuk :

Hoeveel m^2 aan zonnecollectoren heb je nodig (in ideale omstandigheden) om een warmwaterboiler van $4,8 \text{ kW}$ te vervangen door deze collectoren met een efficiëntie van ongeveer 40% ?

31

29.8 Toepassing: gsm toestellen

- Iedere gsm zendt continu e.m. golven uit welke worden ontvangen door gsm-antennes.
- Intensiteit neemt af met (de afstand tot de antenne)².
- Hierdoor veel antennes nodig.



© Johan D'heer

© 2012 Pearson Education, Inc.

32

Dopplereffect voor e.m. golven

- E.m. golven hebben geen middenstof nodig en hebben altijd en voor iedereen dezelfde snelheid (in vacuüm).
- De waargenomen frequentie f' zal enkel afhangen van de *relatieve snelheid* v_{rel} van bron t.o.v. waarnemer. (formule voor $v_{rel} \ll c$)

$$f' = f \left(1 \pm \frac{v_{rel}}{c} \right)$$

- + teken: bron en waarnemer naderen elkaar.
- – teken: bron en waarnemer verwijderen zich van elkaar.

© Johan D'heer

39

Vraagstuk : oplossing

