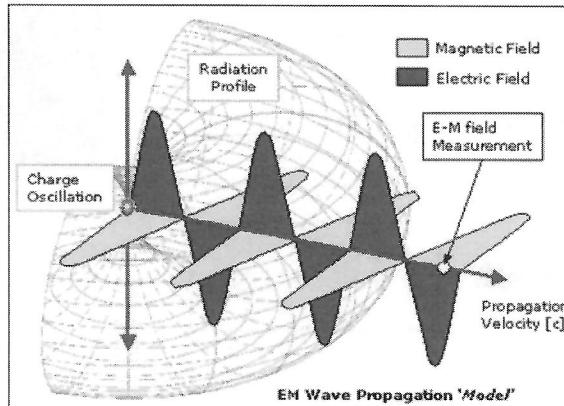


HOOFDSTUK 31

Vergelijkingen van Maxwell en elektromagnetische golven



1

Intermezzo: 22.1 Elektrische flux

...een alternatieve aanpak van het elektrische veld

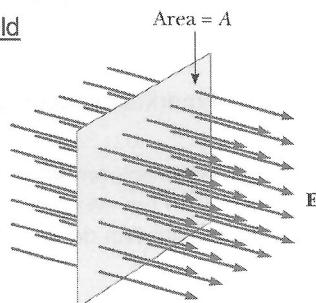
veldlijnen tgv een uniform elektrisch veld

dichtheid van veldlijnen $\sim E$

aantal lijnen door A : $\sim EA$

elektrische flux:

$$\Phi_E = EA$$



dimensie: $[\Phi_E] = ML^3/T^2Q$

eenheid: $Nm^2/C = kg \cdot m^3/s^2 \cdot C$

algemeen: de wet van Gauss

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

Integraal over een gesloten oppervlak!



2

De vergelijkingen van Maxwell vormen de basis van de theorie van het elektromagnetisme. Ze zijn gebaseerd op de wetten van Gauss, Ampère en Faraday.



Gauss:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



Ampère:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$



Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

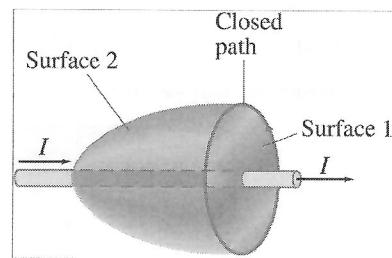
3

31.1 DE WET VAN AMPÈRE EN VERPLAATSINGSSTROOM

Maxwell merkte een ambiguïteit van de wet van Ampère op.

Er is geen probleem voor tijdsonafhankelijke stromen, b.v. een gelijkstroom I in een draad: de berekening van de integraal is onafhankelijk van de keuze van oppervlak omgesloten door het integratiepad.

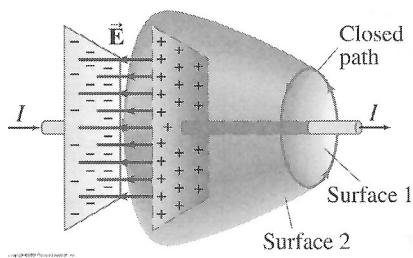
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$



4

Voor tijdsafhankelijke stromen, is de wet van Ampère problematisch...

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$



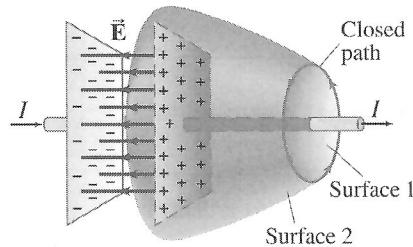
In een schakeling met een condensator die wordt ontladen, is er geen stroom tussen de twee evenwijdige platen

→ Geen stroom door oppervlak 2 (integraal moet nul zijn)

→ Stroom door oppervlak 1 (integraal is niet nul) wanneer de condensator zich onlaadt...

5

Wet van Ampère: algemene vorm



Ladingsstroom in of uit de platen van de condensator, dus verandert het elektrisch veld tussen de platen met de tijd.

Maxwell stelde voor dat een **veranderend elektrisch veld een magnetisch veld produceert**

$$\begin{aligned} Q &= CV = \left(\epsilon_0 \frac{A}{d} \right) (Ed) \\ &= \epsilon_0 A E \\ \frac{dQ}{dt} &= \epsilon_0 A \frac{dE}{dt} \\ I &= \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \end{aligned}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Maxwell's 'verplaatsingsstroom'

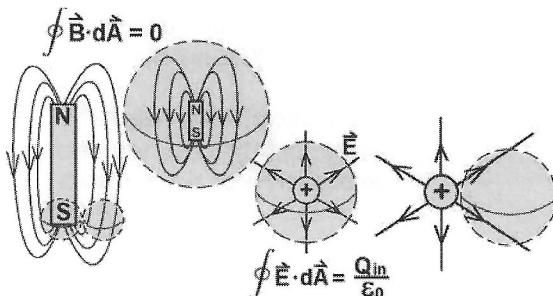
6

31.2 WET VAN GAUSS VOOR MAGNETISME

Maxwell formuleerde ook de wet van Gauss voor het magnetisme

In tegenstelling tot elektrische ladingen, bestaan magnetische monopolen niet. Een gesloten oppervlak bevat altijd een magnetische dipool, met evenveel veldlijnen die door het omsloten volume in- als uitgaan.

De magnetische flux door een gesloten oppervlak is dus altijd nul:



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

7

31.3 DE VERGELIJKINGEN VAN MAXWELL

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Wet van Gauss - elektrisch veld

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Wet van Gauss - magnetisch veld

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Wet van Faraday

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Wet van Ampère-Maxwell

8

Vergelijkingen van Maxwell: interpretatie

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Verband tussen elektrisch veld en zijn bronnen

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Verband tussen magnetisch veld en zijn bronnen, d.w.z. er zijn geen magnetische monopolen

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Elektrisch veld wordt opgewekt door veranderend magnetisch veld

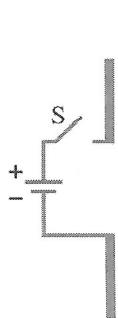
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Magnetisch veld wordt opgewekt door elektrische stroom of veranderend elektrisch veld

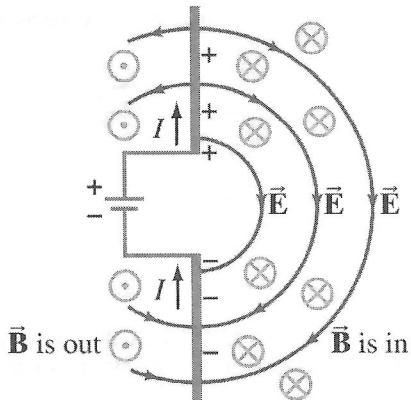
9

31.4 OPWEKKEN VAN ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN

Beschouw twee geleidende staven aangesloten op een *batterij*. Dit systeem gedraagt zich als een antenne.



Schakelaar open: ladingen kunnen niet bewegen

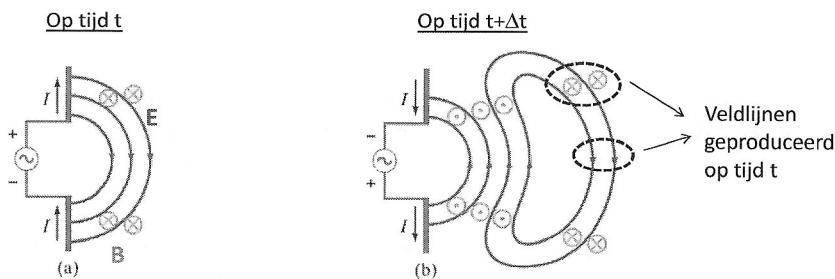


Schakelaar toe: er wordt een elektrisch en een magnetisch veld opgebouwd

10

31.4 OPWEKKEN VAN ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN

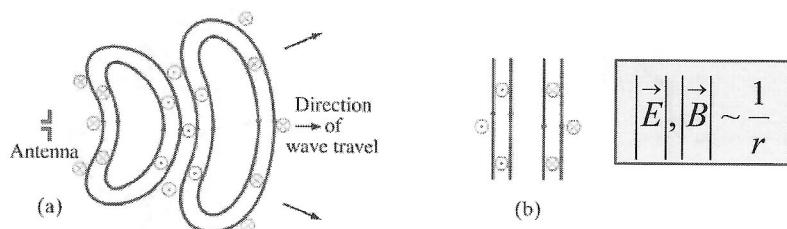
Beschouw twee geleidende staven aangesloten op een wisselspanningsgenerator. Dit systeem gedraagt zich als een antenne.



Wanneer de richting van de (wissel)spanning verandert, verandert ook de richting van de elektrische en magnetische veldlijnen.
Ver van de bron, vormen de veldlijnen gesloten lussen, waar elektrische en magnetische velden eveneens veranderen.

11

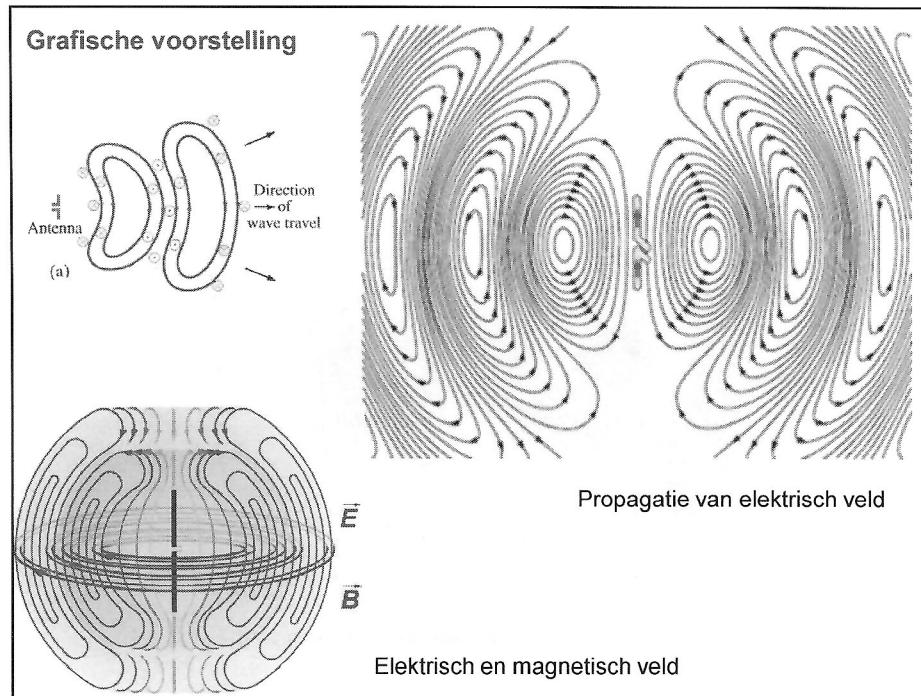
Daar een veranderend elektrisch veld een magnetisch veld induceert en een veranderend magnetisch veld een elektrisch veld induceert, is deze combinatie van veranderende velden zelfondersteunend, waardoor ze zich in de ruimte voortplanten, onafhankelijk van de bron



Ver van de bron (in het stralingsveldgebied), planten de elektrische en magnetische velden zich voort als bijna vlakke golven

Productie van elektromagnetische golven: De bronnen van deze golven zijn dus trillende (of versnellende) elektrische ladingen

12



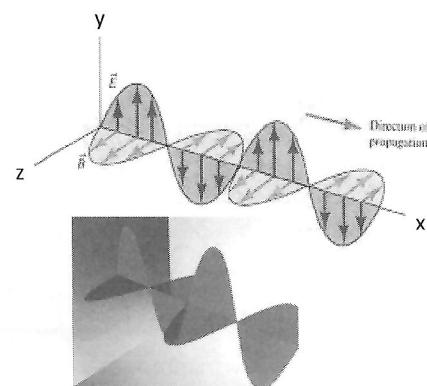
13

Mathematische voorstelling ('verre veld', dus ver van de bron)

$$\vec{E} = E_0 \sin(kx - \omega t) \hat{e}_y$$

$$\vec{B} = \frac{E_0}{c} \sin(kx - \omega t) \hat{e}_z$$

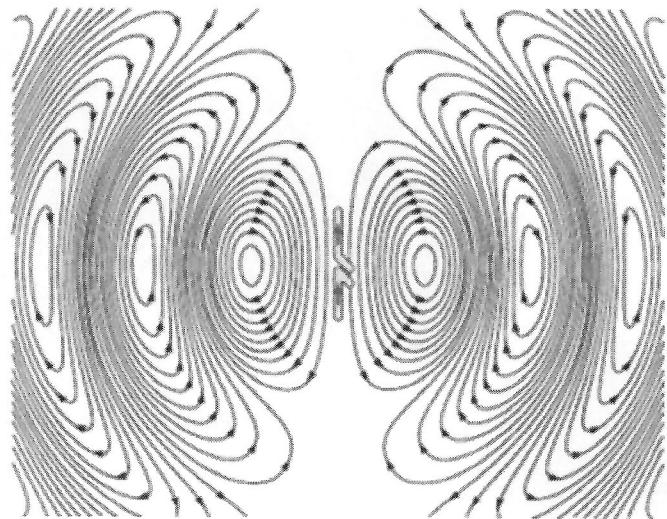
$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$



E en B zijn loodrecht op de voortplantingsrichting en loodrecht op elkaar. Elektromagnetische golven zijn dus transversale golven.

14

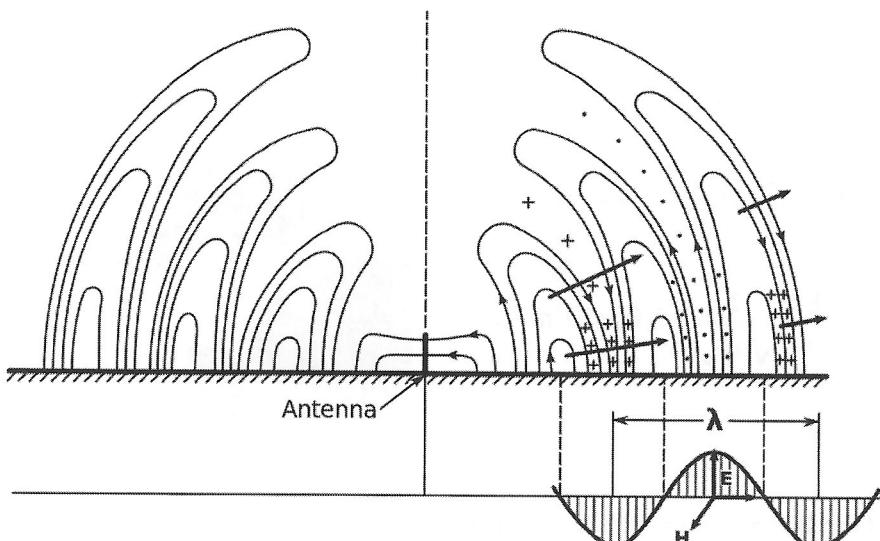
Verband tussen veldlijnenpatroon en voorstelling van elektromagnetische golf



Propagatie van elektrisch veld

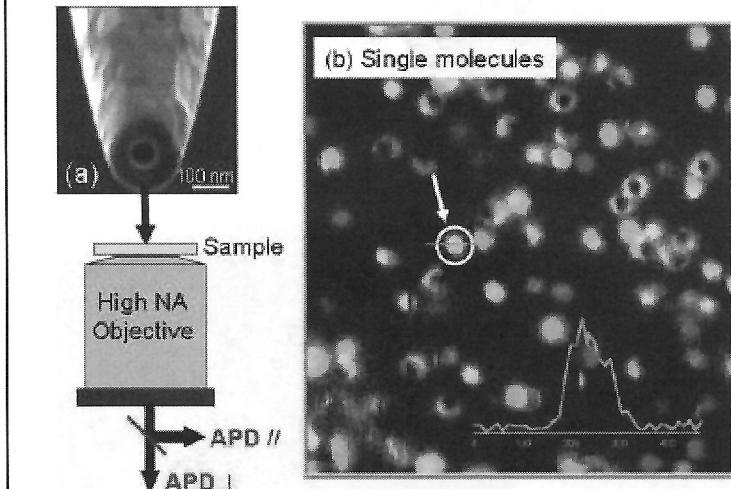
15

Verband tussen veldlijnenpatroon en voorstelling van elektromagnetische golf



16

Recente ontwikkeling: 'near-field optical microscopy'



17

31.6 HET SPECTRUM VAN ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN

grote variatie van golflengte!

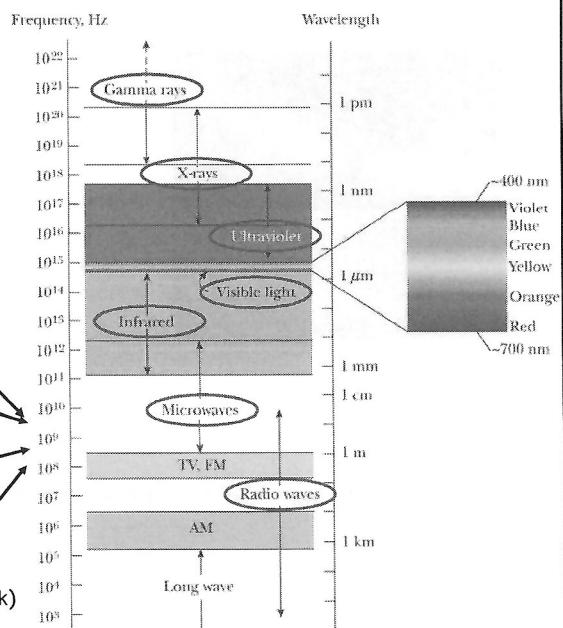
$$c = \lambda v$$

wireless netwerk: $v = 2.4 \text{ GHz}$

microgolfoven: $v = 2.45 \text{ GHz}$
 $\lambda = 10 \text{ cm}$

GSM: $v = 900/1800 \text{ MHz}$
 $v = 100.6 \text{ MHz}$

$$E = hv \quad (h: \text{constante van Planck})$$



18

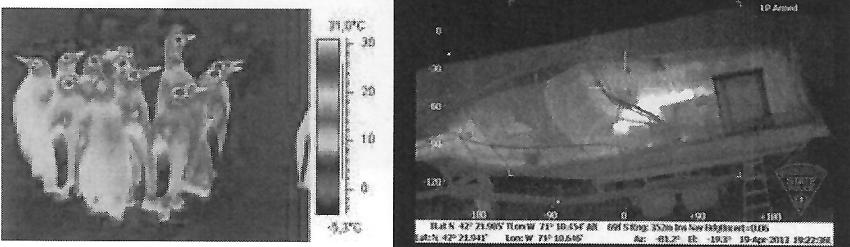
radiogolven

AM: $\lambda \sim 100 - 1000$ m
FM: $\lambda \sim 1 - 10$ m



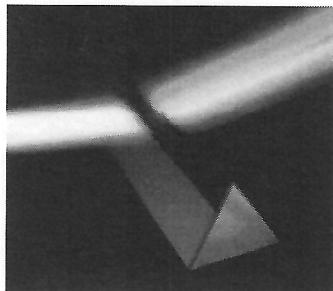
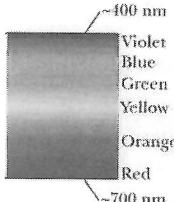
infrarood

$\lambda \sim 1 \mu\text{m} - 7 \cdot 10^{-7}$ m
→ warmtegolven



19

zichtbaar licht

frequentie = kleur!!

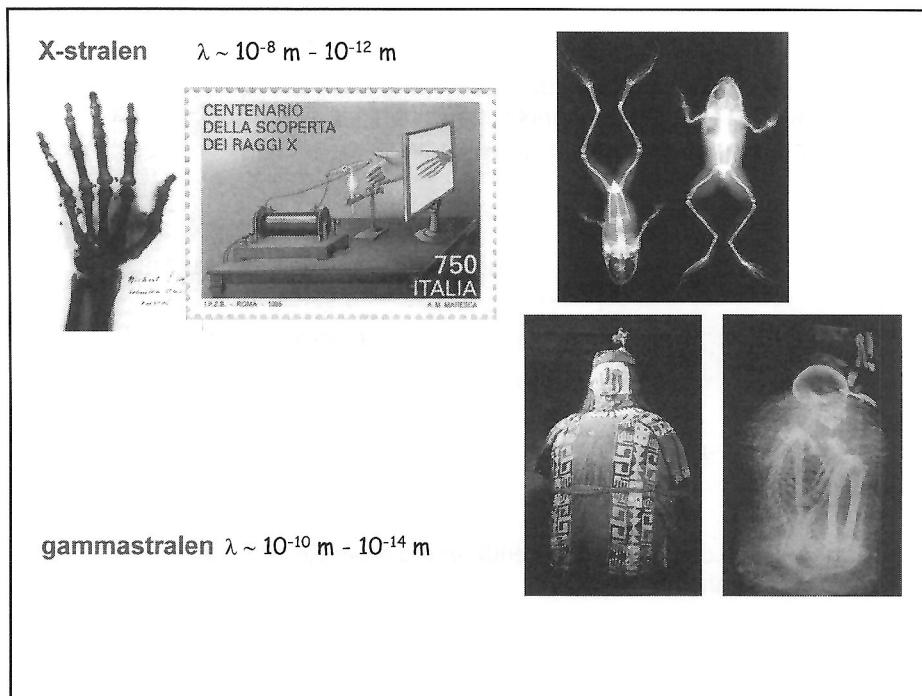
ultraviolet

grote productie door de zon!

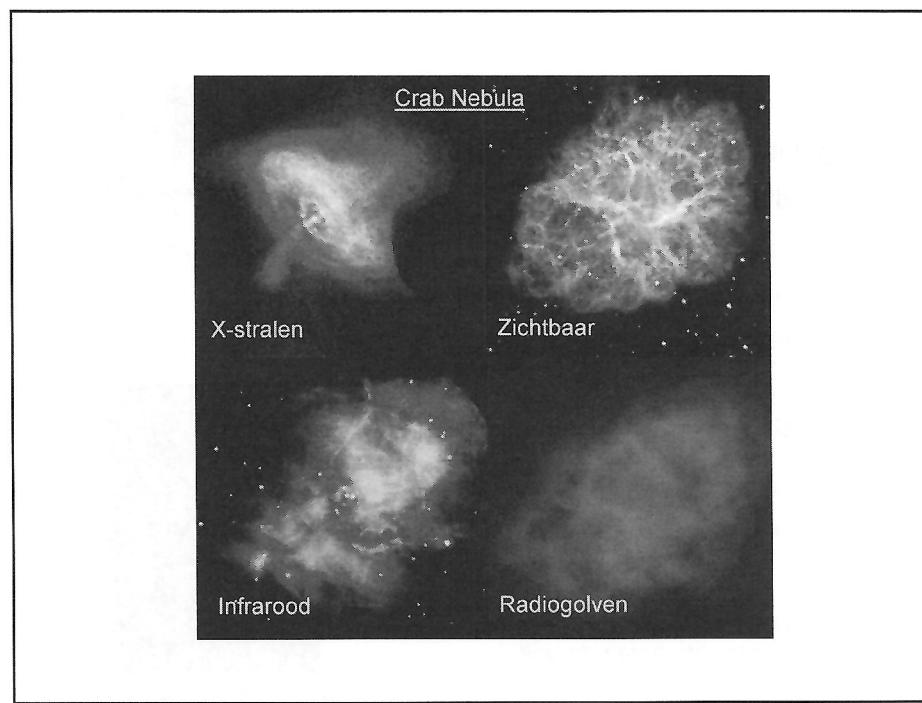
schadelijk voor huid → absorberen in

- ozonaag
- zonnecrème
- zonnebril

20



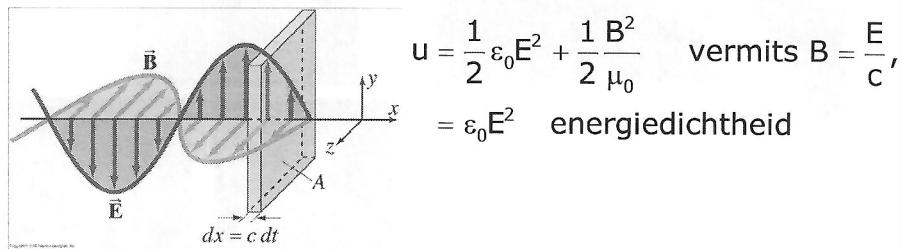
21



22

31.8 ENERGIE IN EM-GOLVEN; DE POYNTINGVECTOR

Energie wordt getransporteerd door elektromagnetische golven, via de bewegende elektrische en magnetische velden. De energiedichtheid (energie per volume-eenheid) is gegeven door



We kunnen ook de corresponderende energie per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid A bepalen:

23

energie in grijze volume:

$$dU = u dV = (\epsilon_0 E^2)(A c dt)$$

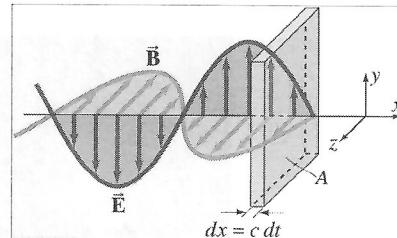
de energie die per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid passeert is dan:

$$S = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt} = \epsilon_0 c E^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

Poyntingvector:

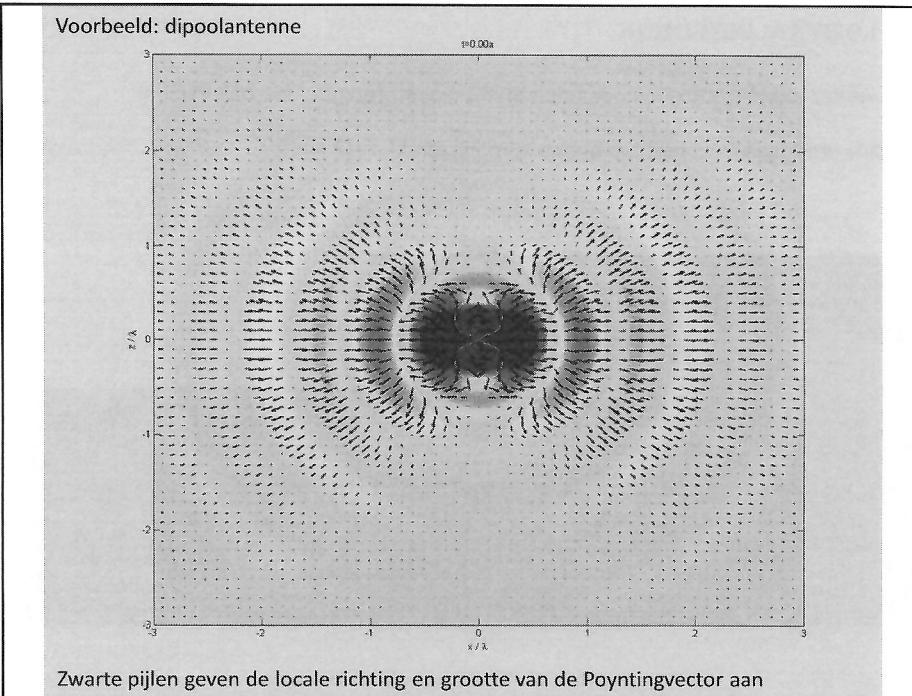
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Energie wordt getransporteerd in de voortplantingsrichting van de golf

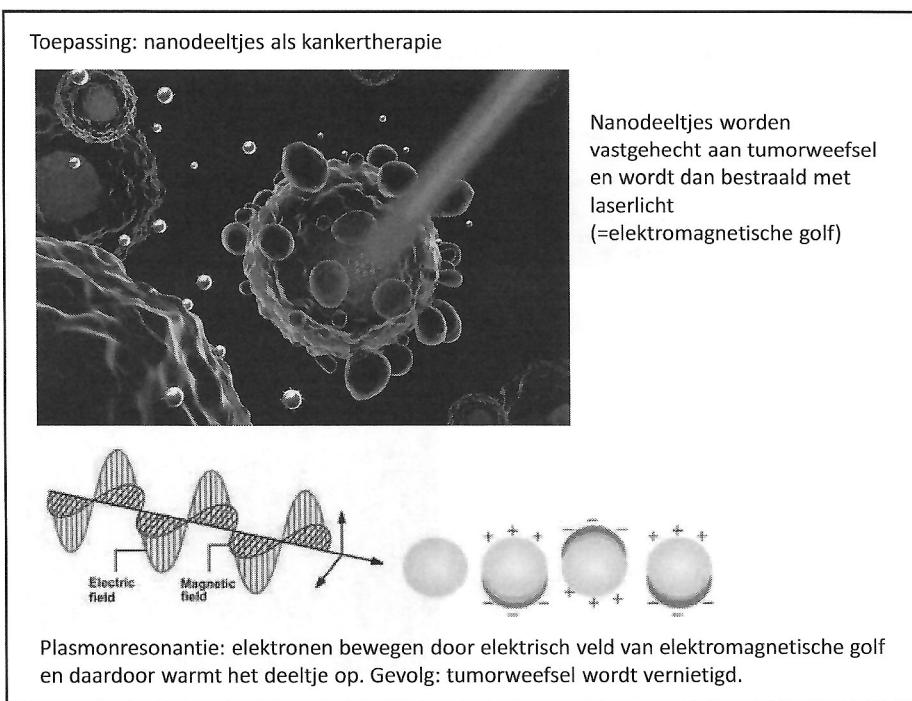


John Poynting (1852-1914)

24



25

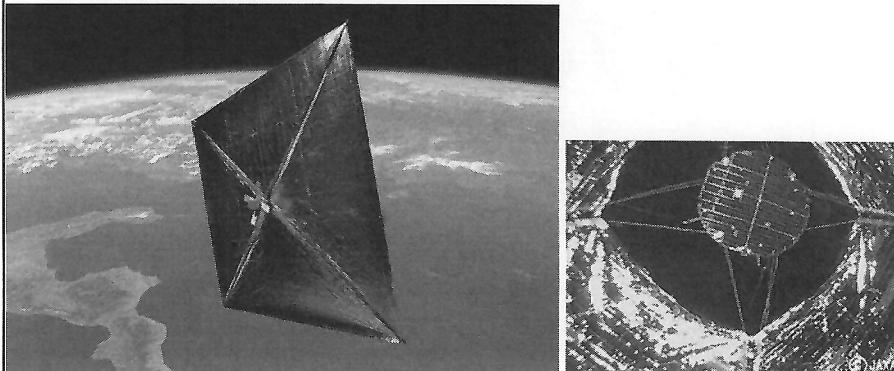


26

31.9 STRALINGSDRUK

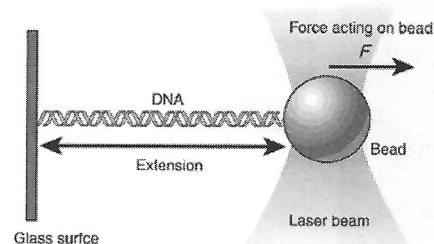
Elektromagnetische golven kunnen energie overbrengen, dus ook impuls!

Dit wordt uitgedrukt met het begrip 'stralingsdruk': $P = \frac{2S}{c}$



27

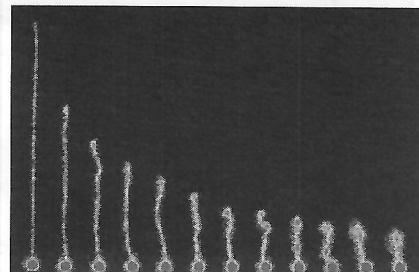
Toepassing van stralingsdruk: 'optical tweezers'



Doel: bepaling van de elastische eigenschappen van DNA.

Bolletje wordt vastgemaakt aan DNA en bewogen m.b.v. krachtige laserbundel (die stralingsdruk geeft)

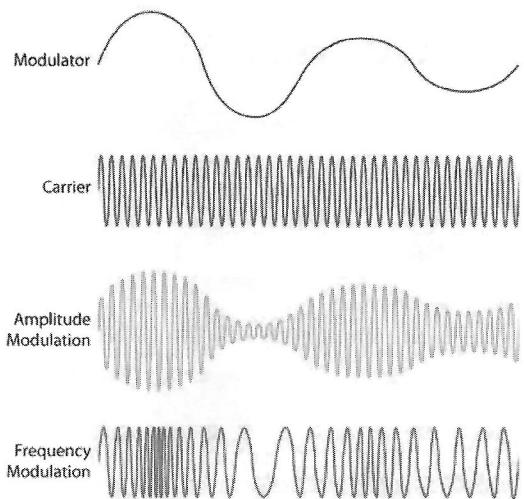
Relaxatie van DNA na uitrekking



28

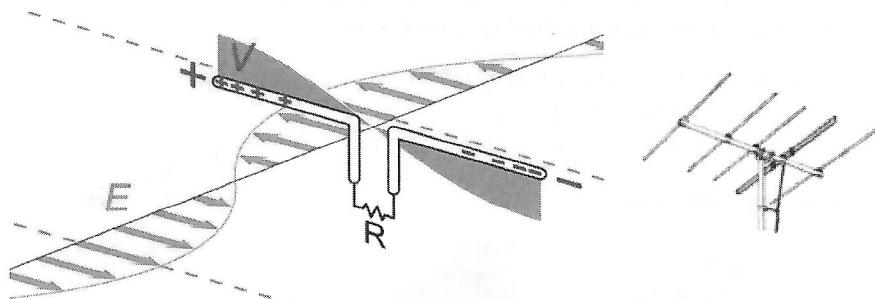
31.10 RADIO EN TELEVISIE; DRAADLOZE COMMUNICATIE

Hoe worden signalen verzonden?

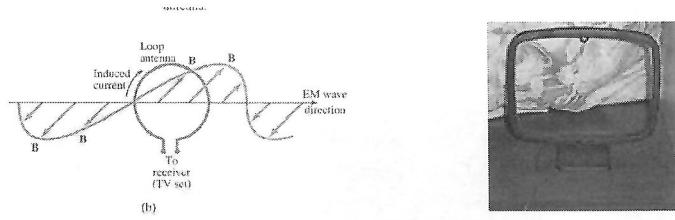


29

Hoe worden signalen ontvangen?



Ladingen in antenne worden versneld door het elektrische veld van de golf.

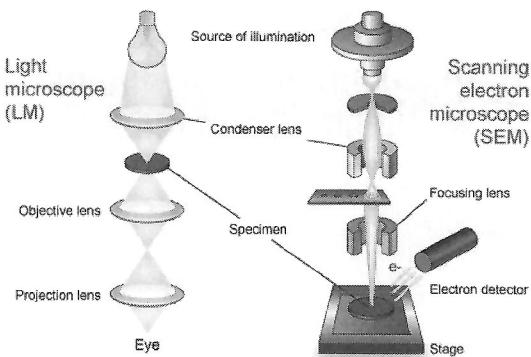


Veranderend magnetisch veld induceert een emk en stroom in een lusvormige antenne

30

HOOFDSTUK 37

VROEGE KWANTUMTHEORIE EN MODELLEN VAN HET ATOOM



*Klassieke theorie van elektromagnetische golven volstaat niet
Energie is gekwantiseerd, alles is tegelijkertijd een deeltje en een golf, ...*

1

Klassieke fysica volstaat niet om experimentele waarnemingen i.v.m. elektromagnetische straling te verklaren

- Zwarte stralers (warmtestraling) (37.1)
- Het foto-elektrisch effect (37.2)
- Compton-verstrooiing van x-stralen (37.4)

Energie gekwantiseerd



Dualiteit deeltje-golf

Deeltjes

macroscopische voorwerpen, moleculen, atomen, elektronen, ...

elke 'materie'vorm heeft tegelijkertijd eigenschappen van deeltje en golf

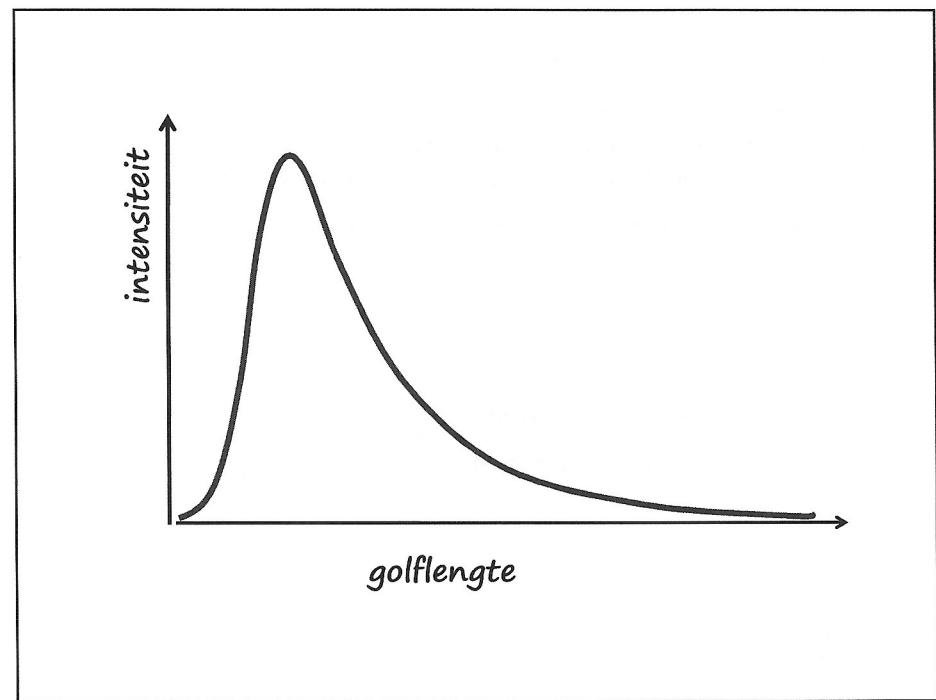
Golven

licht, x-stralen, radiogolven, ...

2



3



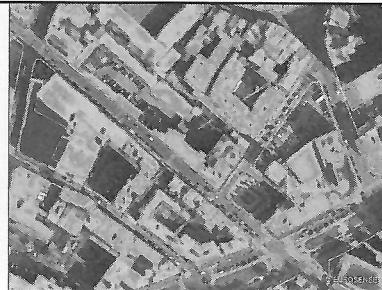
4

37.1 ZWARTE STRALERS

Warmtestraling

Voorwerp zendt elektromagnetische straling uit
(afhankelijk van temperatuur, oppervlak)

Continue distributie van frequenties (golflengtes)



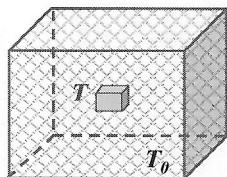
Experimentele bevindingen

Wet van Stefan-Boltzmann:

totale uitgestuurde vermogen $\sim T^4$

$$P = \sigma A e T^4 \quad \text{met } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad \text{Stefan-Boltzmann constante}$$

emissiefactor $0 \leq e \leq 1$ emissiefactor = absorptiefactor



voorwerp stuurt warmtestraling uit: $I = \sigma e T^4$

voorwerp absorbeert warmte van de kamer: $I = \sigma e T_0^4$

Zelfde factor e !

een goede straler is ook een goede absorber

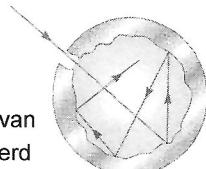
5

Zwarde stralers "hot topic" rond 1900

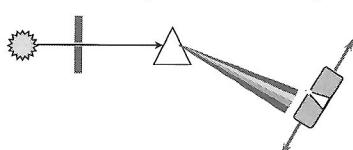
absorptiefactor = emissiefactor = $e = 1$

$$I = \sigma T^4$$

Uitgezonden straling enkel afkomstig van thermische beweging van ladingen in de wanden. Alle invallende straling wordt geabsorbeerd



De aard van de uitgezonden straling hangt enkel af van T



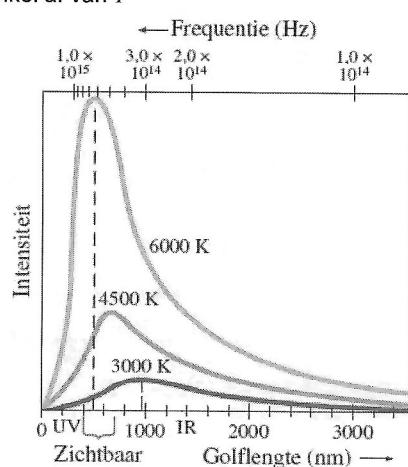
Intensiteit vs golflengte vertoont maximum

Maximum in golflengteverdeling verschuift met temperatuur: $T \uparrow \Rightarrow \lambda_{max} \downarrow$

De verschuivingswet van Wien



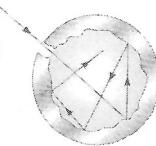
$$\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot K$$



6

De ultraviolet-katastrofe

Berekening volgens klassiek model van elektromagnetische straling



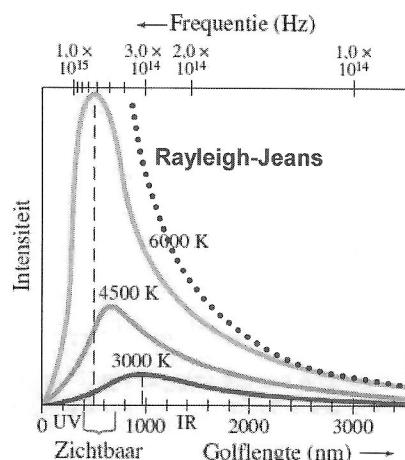
De wet van Rayleigh-Jeans:

Intensiteit als functie van golflengte

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$



Oneindige intensiteit bij korte golflengtes
(hoge frequenties)



7

De hypothesen van Max Planck (1900)

Straling afkomstig van atomaire oscillatoren ("oscillerende entiteiten")

De energie van een oscillator kan enkel *discrete* waarden aannemen (gekwantiseerd)

$$E_n = nhf$$



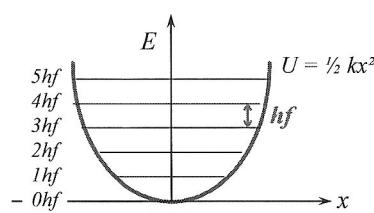
(Nobelprijs 1918)

→ energie gekwantiseerd en **frequentie-afhankelijk**

→ n is het **kwantumgetal** (geheel getal), karakteriseert de **kwantumtoestand**

→ h is de **constante van Planck**, fundamentele constante

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

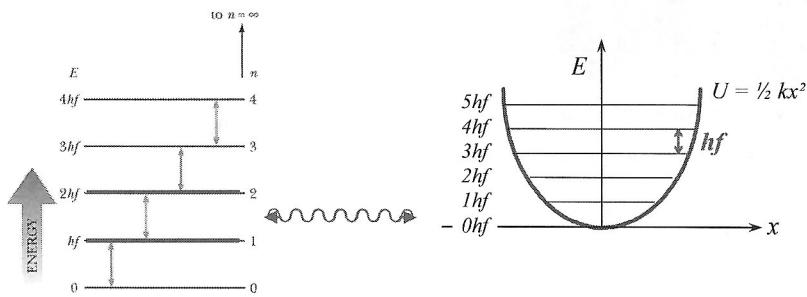


8

Implicatie van de hypothese van Max Planck (cfr. Einstein 1905)

Oscillatoren zenden energie uit of absorberen energie via elektromagnetische straling bij overgang tussen twee kwantumtoestanden:

$$E = hf$$



Volledige energieverlies wordt uitgestraald of geabsorbeerd door één enkel kwantum.

9

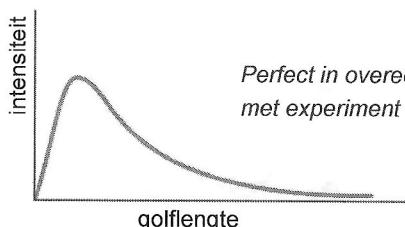
Planck's golflengtedistributie

Berekening warmtestraling volgens hypothesen van Planck

- straling door oscillatie van geladen deeltjes in de wand van de holte
- kwantumtoestanden met gekwantiseerde energie nhf
- $\langle E \rangle = hf \times$ waarschijnlijkheid overgang $(n+1) \rightarrow (n)$

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)}$$

verdeling over energieniveaus
volgens Boltzmann-factor $e^{-nhf/k_B T}$



Perfect in overeenstemming
met experiment !!

Komt bij grote golflengtes
overeen met klassieke
Rayleigh-Jeans benadering

10

De energie van een oscillator kan enkel discrete waarden aannemen (gekwantiseerd)

$$E_n = nhf$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$



M. Planck

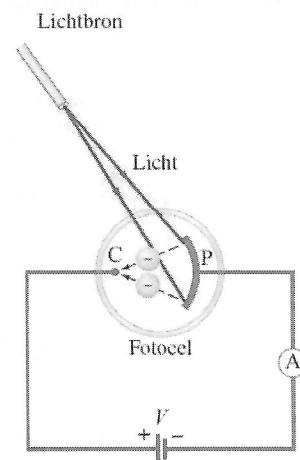
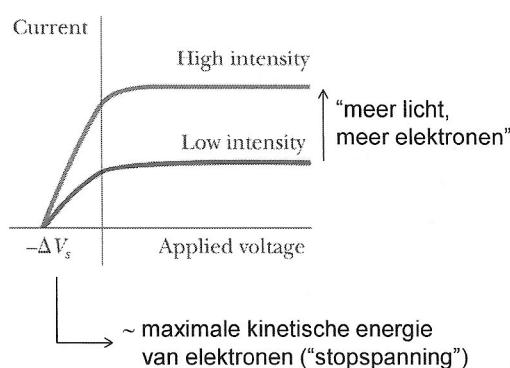
Oscillatoren zenden energie uit of absorberen energie via elektro-magnetische straling bij overgang tussen twee kwantumtoestanden: $E = h\nu$

11

37.2 HET FOTO-ELEKTRISCH EFFECT

Licht valt in op een metalen plaat en maakt elektronen vrij → elektrische stroom

Waarnemingen:



<https://www.youtube.com/watch?v=0qKrOF-qJZ4>

12

**Het fotoelektrisch effect verklaard door fotonthorie van Einstein
(Nobelprijs 1921)**

**Alle elektromagnetische golven zijn gekwantiseerd.
Elektromagnetische straling bestaat uit een stroom van
fotonen met energie:**

$$E = hf$$



foton ('lichtquanten')

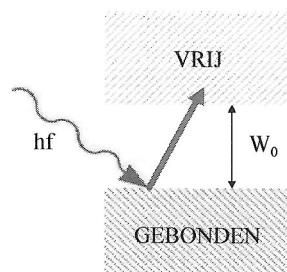
masseloos deeltje, beweegt aan de lichtsnelheid

De volledige energie van 1 foton wordt overgedragen aan 1 elektron.

Als het e^- geen energie verliest in het materiaal, dan is zijn kinetische energie:

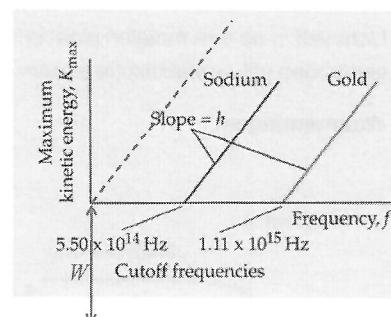
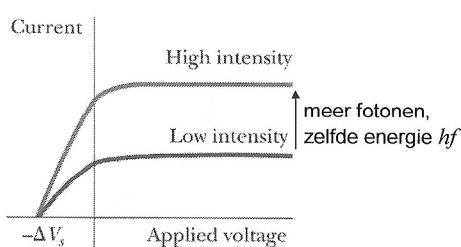
$$K_{max} = hf - W_0 \quad W_0 = \text{uittreedarbeid}$$

Minimaal vereiste energie om elektron vrij te zetten



13

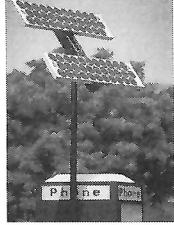
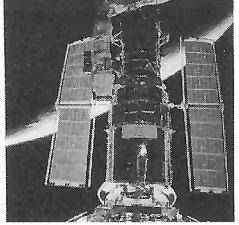
Waarnemingen fotoelektrisch effect kunnen verklaard worden m.b.v. fotonen



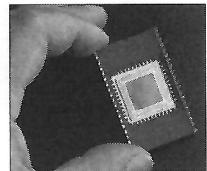
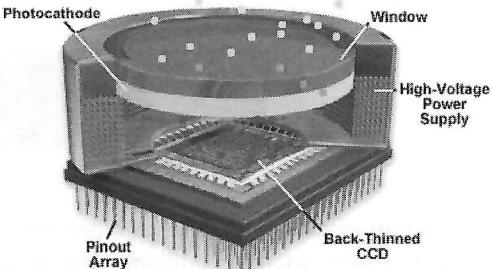
- 1) Als intensiteit I stijgt, dan stijgt de stroom, maar K_{max} onafhankelijk van I
 - 2) Als f stijgt, dan stijgt K_{max} lineair met f
 - 3) Elektronen geëjecteerd enkel als frequentie licht > drempelfrequentie
 - 4) elektronen worden ogenblikkelijk ($\sim 10^{-9}$ s) geëjecteerd, zelfs bij lage I
- $K_{max} = hf - W$
- Minimale fotonenergie $hf_0 = W_0$
 $f_0 = W_0/h \Rightarrow \lambda_0 = hc/W_0$
- Één foton – één elektron proces

14

Zonnecellen

CCD camera (charge-coupled device)

Digitale fotografie
Astronomische observaties

<http://www.olympusmicro.com/primer/java/digitalimaging/ebccd/index.html>

15

De energie van een oscillator kan enkel discrete waarden aannemen (gekwantiseerd)

$$E_n = nhf$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Oscillatoren zenden energie uit of absorberen energie via elektro-magnetische straling bij overgang tussen twee kwantumtoestanden: $E = hf$

**Alle elektromagnetische golven zijn gekwantiseerd.
Elektromagnetische straling bestaat uit een stroom van fotonen met energie:**

$$E = hf$$


M. Planck



A. Einstein

16

37.6 DUALITEIT VAN GOLVEN EN DEELTJES: HET COMPLEMENTARITEITSPrINCIPE

Deeltjeseigenschappen van e-m golven



Licht gedraagt zich als sequentie van deeltjes

- Zwarte stralers
- Foto-elektrisch effect
- Compton effect, ...

Licht gedraagt zich als elektromagnetische golf

Interferentie,
diffractie, ...



Elke lichtbundel vertoont tegelijkertijd eigenschappen van deeltjes en van een golf. Afhankelijk van energie (golflengte) en het experiment komt deeltjes- of golf-karakter tot uiting. → Complementair

17

37.7 GOLFEIGENSCHAPPEN VAN DEELTJES

L. de Broglie: golfeigenschappen van deeltjes (1923)



Louis de Broglie
(nobelprijs 1929)

Alle materievormen hebben zowel een deeltjeskarakter als een golfkarakter

$$\text{Elektron: impuls } p \longrightarrow \text{golflengte: } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma mv} \quad \text{cfr. fotonen: } p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Licht: energie } E = hf \quad \text{frequentie: } f = \frac{E}{h}$$

Alle objecten hebben deeltje- en golf-karakter

Impuls p , energie E

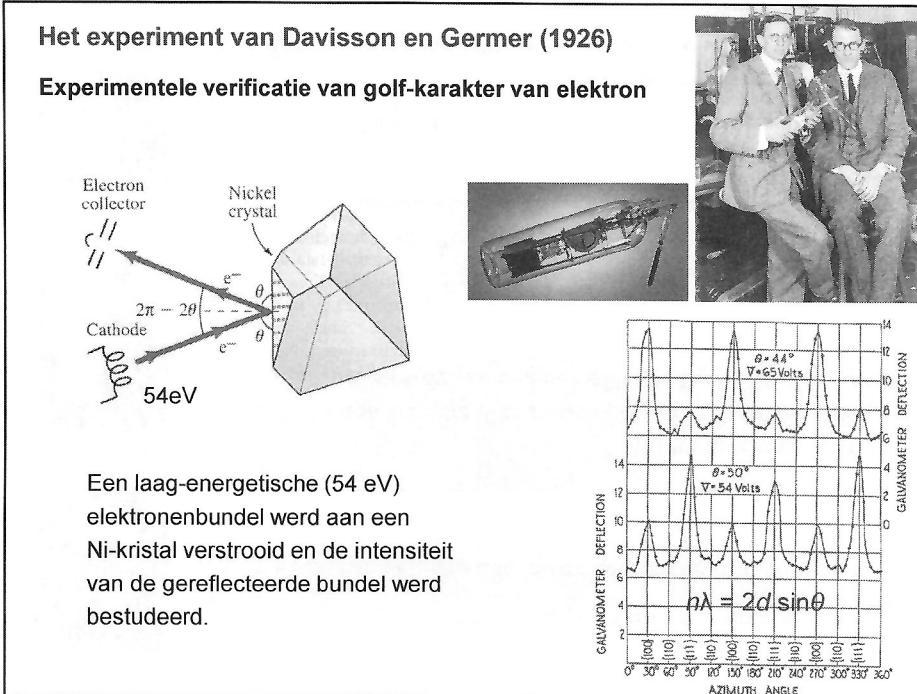
de Broglie golflengte

frequentie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$f = \frac{E}{h}$$

18



19



20

De energie van een oscillator kan enkel discrete waarden aannemen (gekwantiseerd)

$$E_n = nhf$$

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$



M. Planck

Oscillatoren zenden energie uit of absorberen energie via elektro-magnetische straling bij overgang tussen twee kwantumtoestanden: $E = hf$



A. Einstein

Alle elektromagnetische golven zijn gekwantiseerd. Elektromagnetische straling gedraagt zich als een stroom van fotonen met energie:

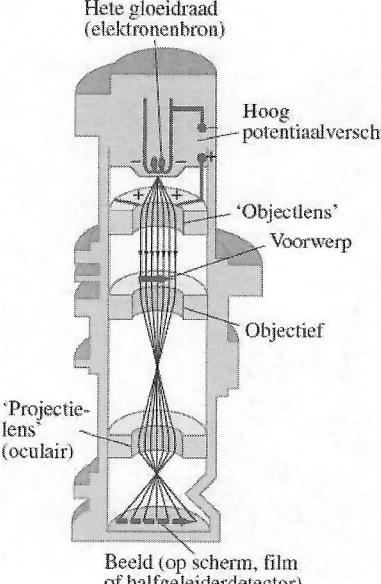
$$E = hf$$



L. De Broglie

21

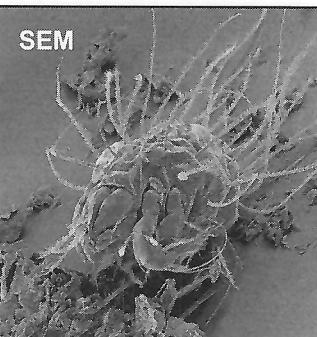
37.8 ELEKTRONENMICROSCOOP



Hete gloeidraad (elektronenbron)
Hoog potentiaalverschil
'Objectlens'
Voorwerp
Objectief
'Projectielens' (oculair)
Beeld (op scherm, film of halfgeleiderdetector)

Microscoop: resolutie wordt bepaald door golflengte!

SEM



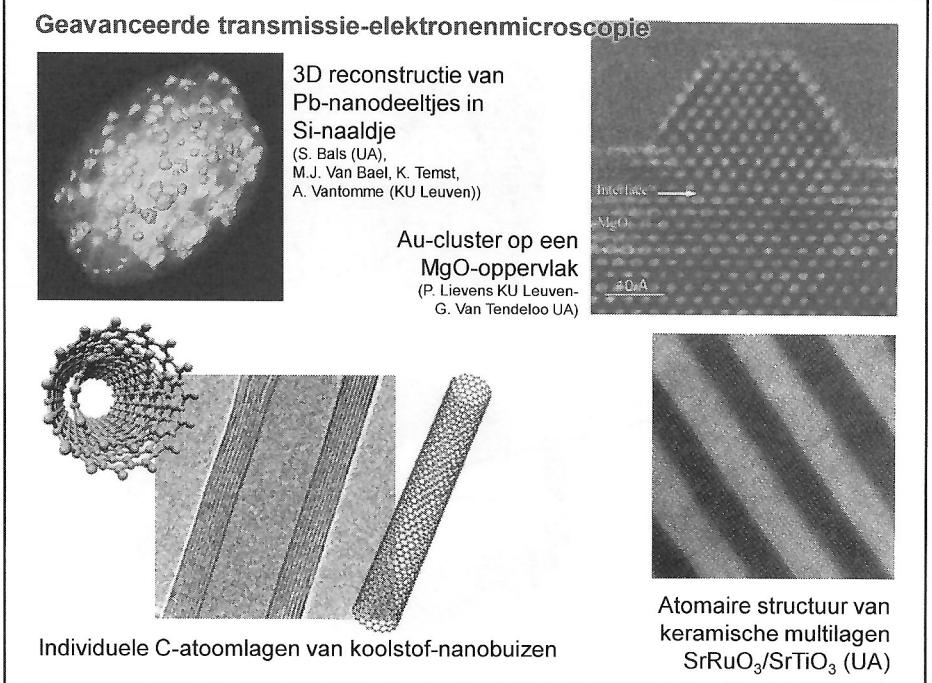
Golflengte daalt bij versnellen van de elektronen

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mq\Delta V}} = \frac{1.23 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{\Delta V}}$$

→ in meter (als ΔV in Volt)

Vb. 3600 V ⇒ 0.02 nm

22



23

37.9 VROEGE ATOOMMODELLEN

Newton's tijd
harde, onvernietigbare bollen \Rightarrow kinetische gastheorie

J. J. Thomson (1898)
negatief-geladen elektronen in een uniforme positieve bol
 $\# e\text{-ladingen} \sim \text{atoommassa}$

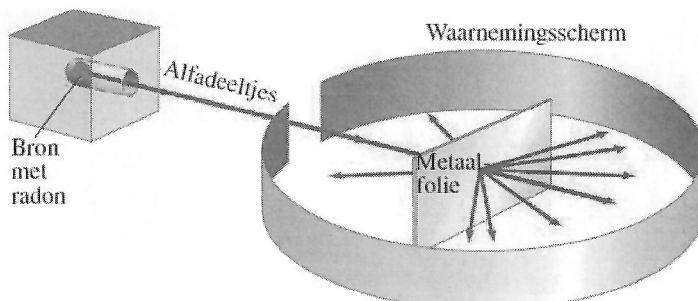
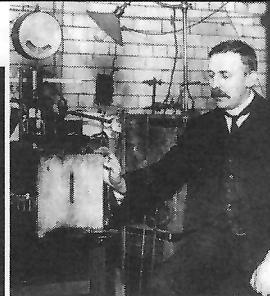
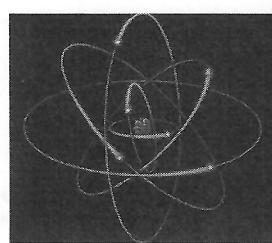
J.J. Thomson

$\approx 10^{-10} \text{ m}$

Positief geladen materiaal

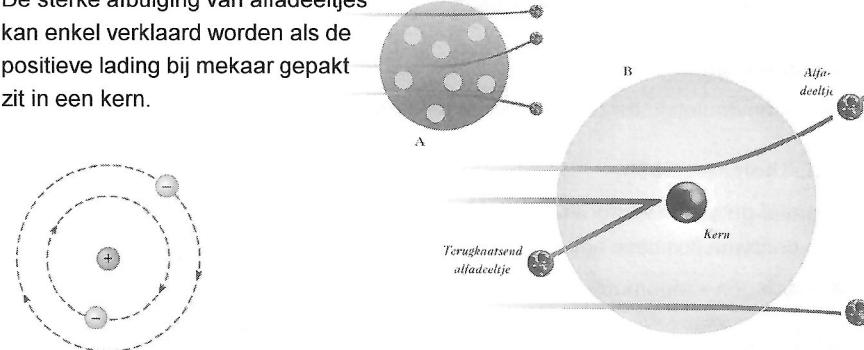
24

E. Rutherford (1911):
planetair model gebaseerd
 op verstrooingsexperimenten:
 positieve kern, elektronen
 circuleren in banen rond de
 kern.



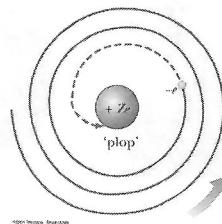
25

De sterke afbuiging van alfadeeltjes kan enkel verklaard worden als de positieve lading bij mekaar gepakt zit in een kern.



Problemen met het model van Rutherford

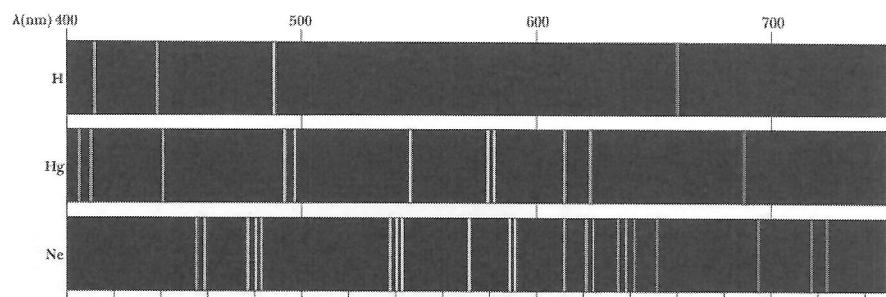
- Geen verklaring voor spectraallijnen ?!
- Maxwell-theorie voorspelt zelfvernietiging door emissie van elektromagnetische straling ?!



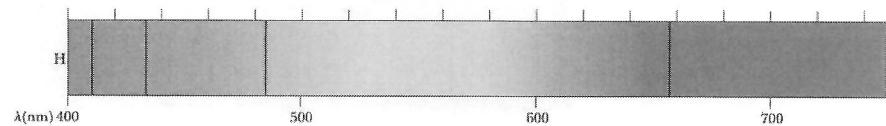
26

37.10 ATOMAIRE SPECTRA: SLEUTEL TOT DE ATOMAIRE STRUCTUUR

Emissiespectroscopie karakteristiek voor element (identificatie)



Absorptiespectroscopie (vb. identificatie van element)



27

37.11 HET ATOOMMODEL VAN NIELS BOHR

kwantisatie (Planck) + fotonconcept (Einstein)
+ atoommodel Rutherford + Newtonmechanica

Semi-klassiek model van Niels Bohr (1913):

Waterstofatoom (proton + elektron)

1. Cirkelvormige banen van elektron door Coulomb-kracht

2. Enkel bepaalde banen zijn toegelaten.

stationaire banen: elektronen stralen geen energie uit

3. overgang tussen stationaire banen \rightarrow spectraallijnen

\rightarrow emissie/absorptie van foton met energie

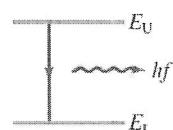
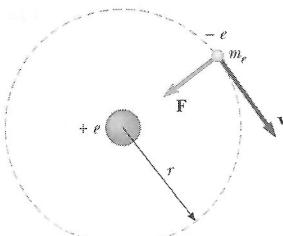
$$E_U - E_L = hf \quad \text{fotonfrequentie } f \text{ is onafhankelijk van de cirkelfrequentie van het } e$$

4. Straal van baan bepaald door impulsmoment van het elektron.

Impulsmoment gekwantiseerd:

$$|\vec{L}| = m_e v r = n \hbar \quad \text{of ook: } n\lambda = 2\pi r \text{ (zie 37.12)}$$

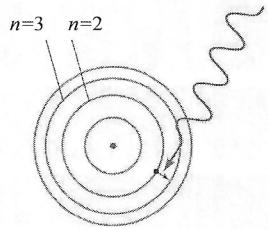
$n = 1, 2, 3, \dots$ gekwantiseerde banen



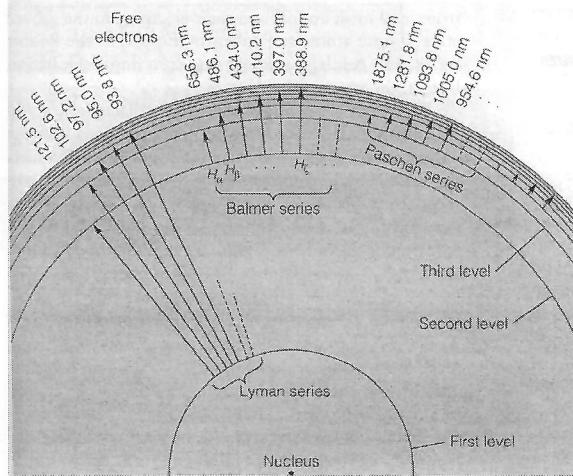
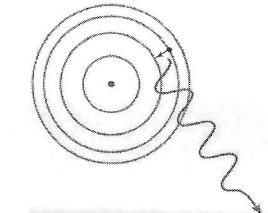
28

Bohr-model verklaart de spectraallijnen van het waterstofatoom

absorptie

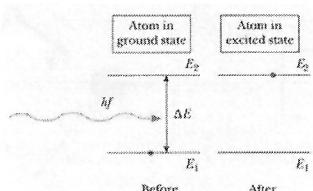


emissie



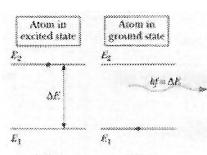
29

LASERS: Absorptie, emissie en gestimuleerde emissie



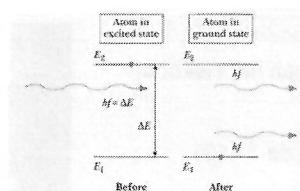
Absorptie:

Indien $hv = \Delta E$ wordt een elektron geëxciteerd.



Spontane emissie:

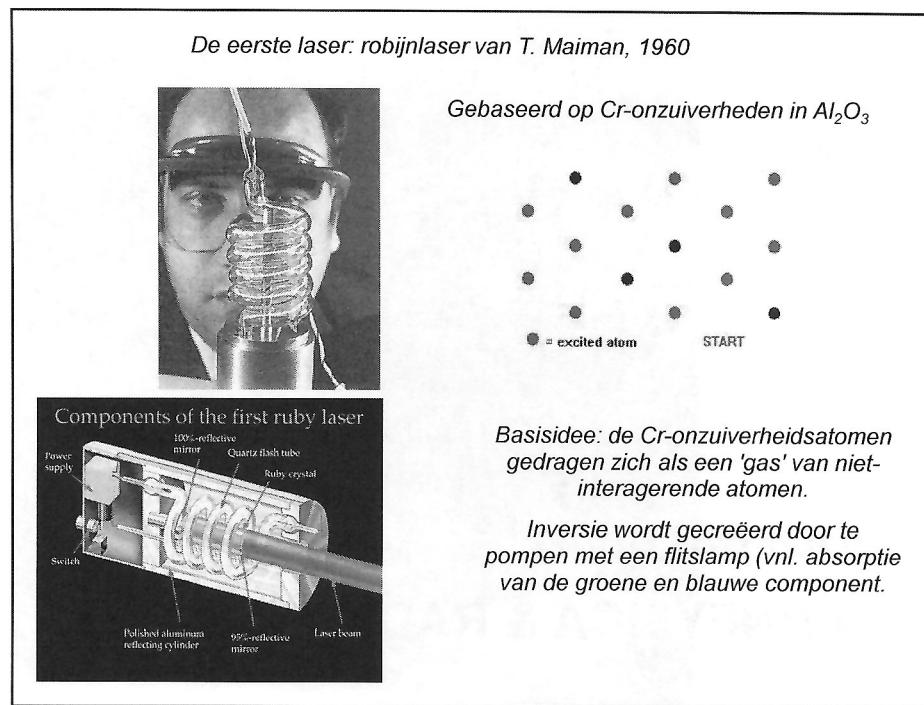
Na een zekere tijd gaat het elektron over naar een lagere energietoestand. Er wordt dan een foton uitgezonden met frequentie $v = \Delta E/h$.



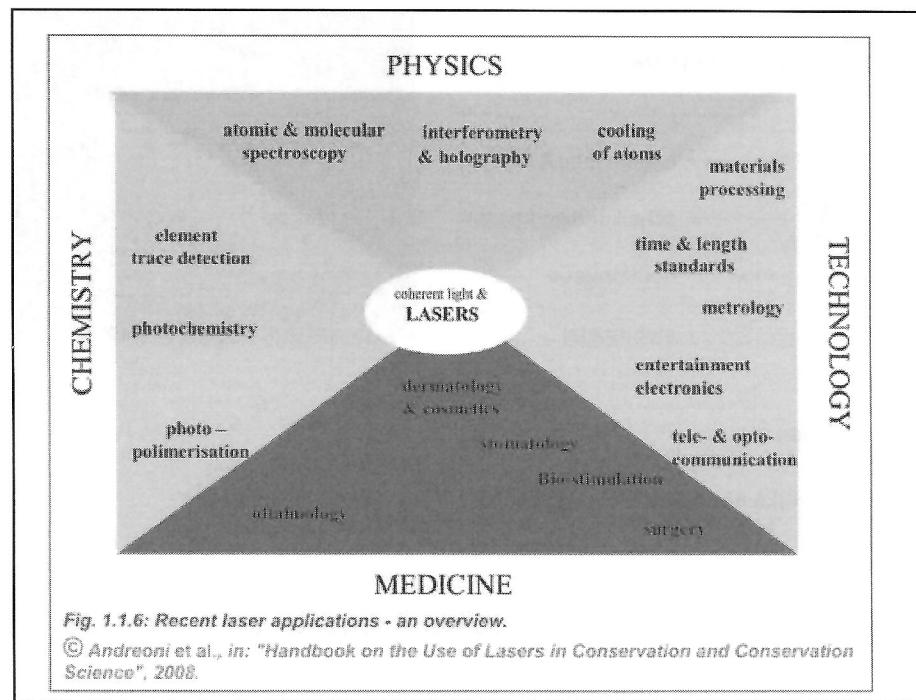
Gestimuleerde emissie

Een geëxciteerd atoom wordt 'aangespoord' om te vervallen naar de grondtoestand doordat het getroffen wordt door een invallend foton met $v = \Delta E/h$

30



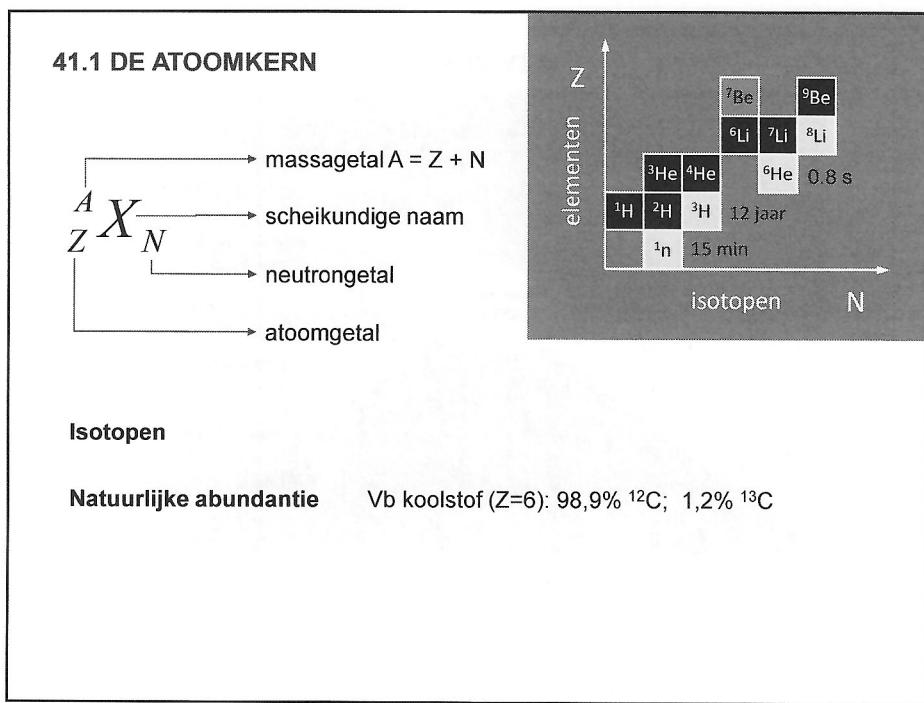
31



32



1



2

Grootte en structuur van de atoomkern

Verstrooingsexperimenten van Rutherford

Frontale botsing tussen alfa-deeltje en atoomkern

Coulomb-repulsie

Uit behoud van energie:

d = de afstand van dichtste nadering

→ bovengrens voor de grootte van de kern

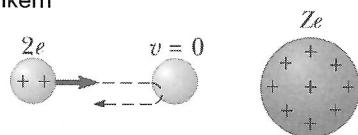
$$\text{Rutherford bepaalde dat } d = \frac{4k_e Z e^2}{m v^2}$$

↓
snelheid alfa-deeltje

voor goud: $d = 3.2 \times 10^{-14} \text{ m}$

voor zilver: $d = 2 \times 10^{-14} \text{ m}$

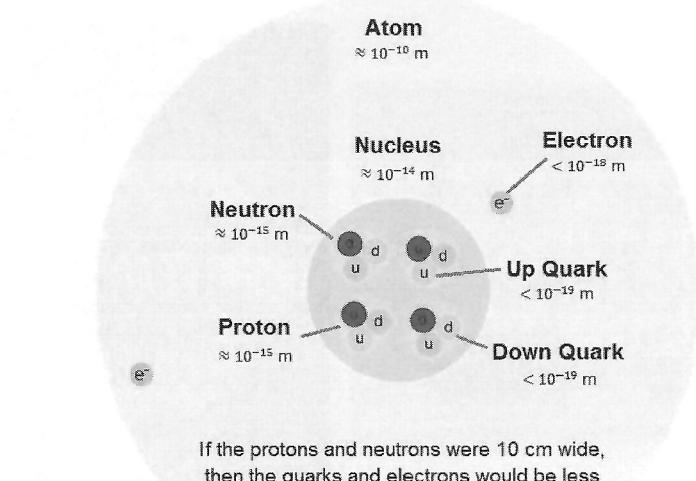
femtometer $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$



d

3

Grootte en structuur van de atoomkern



4

Grootte en structuur van de atoomkern

Uit verstrooingsexperimenten met snelle geladen deeltjes blijkt:

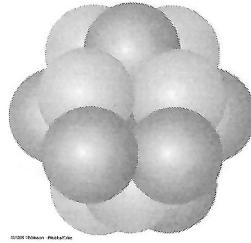
De meeste kernen zijn (quasi-)sferisch
met gemiddelde straal:

$$r = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$$

A is het massagetal

Volume van sfeer $\sim r^3 \sim A$



Het volume van een atoomkern is evenredig met het aantal nucleonen

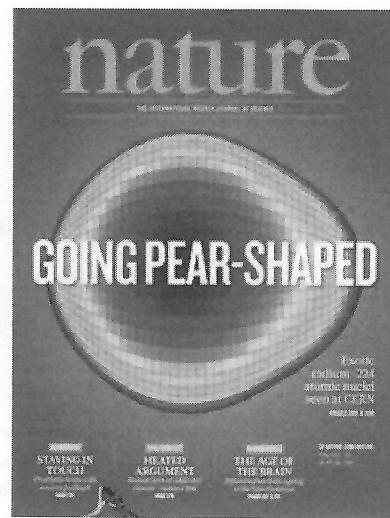
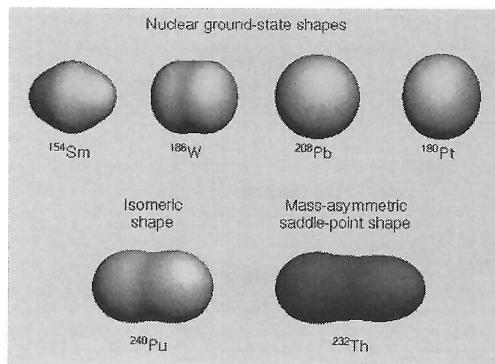
De dichtheid van alle kernen is ongeveer gelijk!

Analogie:

vergelijkbaar met vloeistofdruppel met een dichtheid die onafhankelijk is van de grootte van de druppel

5

Recent werk: 'exotische' kernvormen

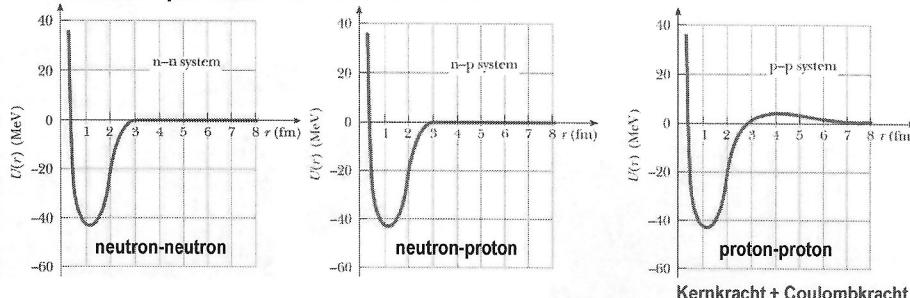


6

41.2 NUCLEAIRE BINDINGSENERGIE EN NUCLEAIRE KRACHTEN

Stabiliteit van de kernen: de kernkracht houdt kerndeeltjes samen

Interactie-potentiaal tussen twee nucleonen:



Kernkracht + Coulombkracht

- sterk aantrekgend (gevolg van sterkste kracht in de natuur)
- enkel op zeer korte afstand (~ 2 fm)
- sterk repulsief op afstanden veel kleiner dan een femtometer
- actief tussen alle kerndeeltjes, onafhankelijk van de elektrische lading,
(wel afhankelijk van de orientatie van de spin van de interagerende nucleonen)
- Coulomb-barrière bij 4 fm (enkel voor proton-proton-systeem)

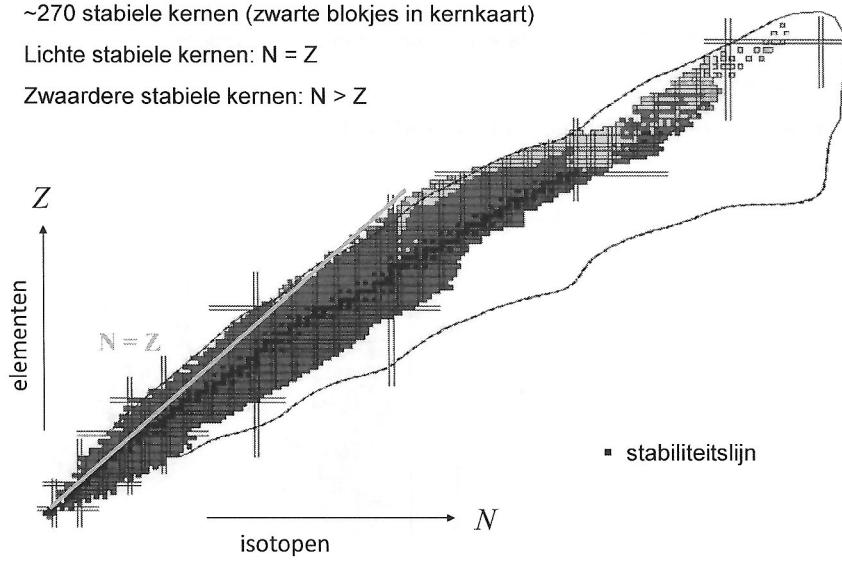
7

Stabiliteit van atoomkernen ('the nuclear chart')

~270 stabiele kernen (zwarte blokjes in kernkaart)

Lichte stabiele kernen: $N = Z$

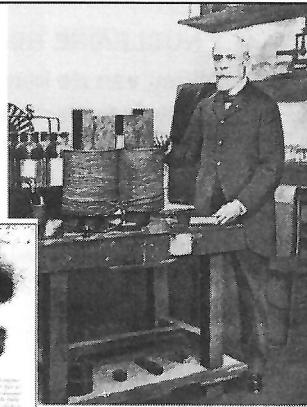
Zwaardere stabiele kernen: $N > Z$



8

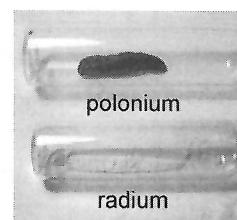
41.3 RADIOACTIVITEIT

Henri Becquerel (1896):
spontane radioactiviteit in uraniumzout



Nobelprijs 1903

Marie Skłodowska en
Pierre Curie
Polonium, Radium



9

Hoe vervalt een instabiele kern naar een stabielere kern ?

Alfa-verval: α

uitstoten van een alfadeeltje (${}^4\text{He}$ -kern: 2 protonen en 2 neutronen)

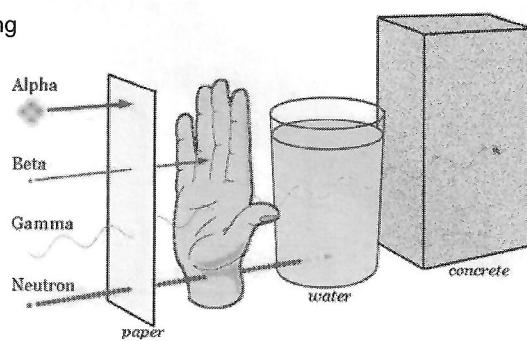
Beta-verval: β

uitstoten van een elektron (e^-) of positron (e^+ , anti-elektron)

Gamma-verval: γ

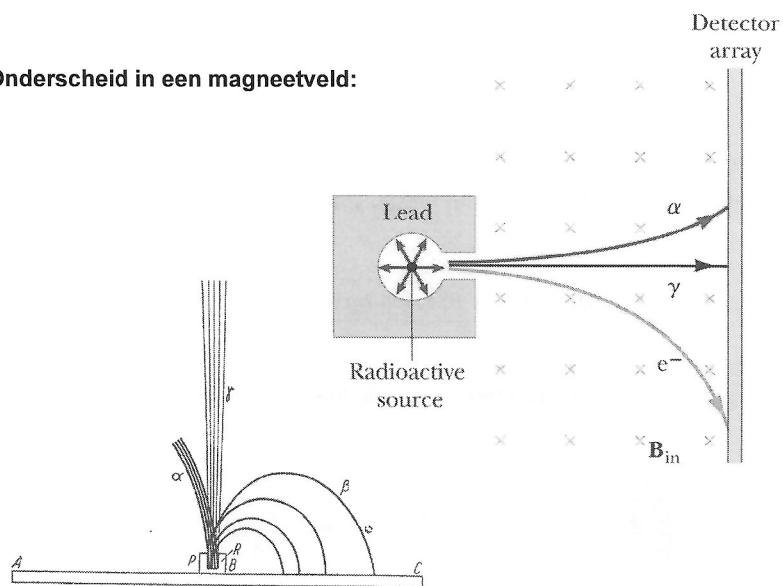
Uitstoten van hoog-energetische fotonen

elektromagnetische γ -straling



10

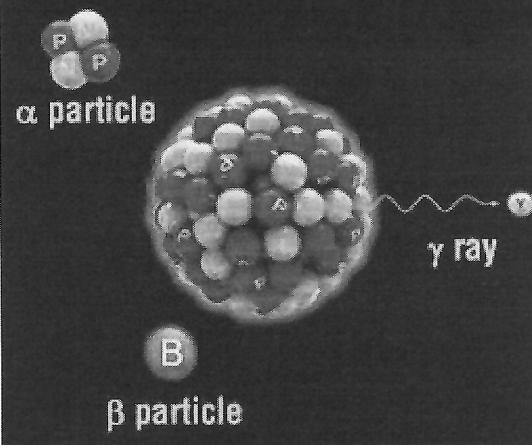
Onderscheid in een magneetveld:



uit de thesis van Marie Skłodowska

11

Spontaneous disintegration of atomic nuclei to release subatomic particles or radiation.



12

41.4 ALFA-VERVAL (transmutatie)



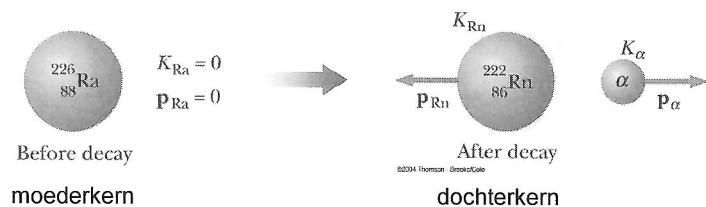
Spontaan verval enkel mogelijk als er energie vrijkomt bij overgang van begin-naar eindproducten (**desintegratie-energie Q** positief)

$$Q = (M_X - M_Y - M_\alpha) c^2 > 0 \quad (\text{kg, Joule})$$

$$Q = (M_X - M_Y - M_\alpha) \times 931.494 \text{ MeV} > 0 \quad (\text{u, MeV})$$

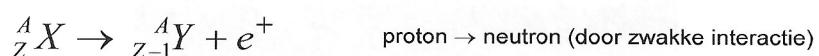
Energie-overschot

→ kinetische energie van dochterkern en alfadeeltje (met behoud van impuls !)



13

41.5 BETA-VERVAL (transmutatie)



Beta-deeltjes: elektron, positron (anti-elektron)

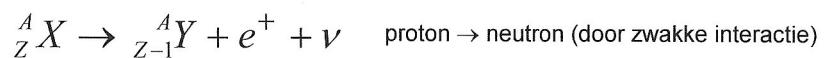
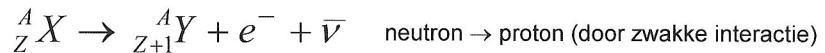
Brede verdeling kinetische energie $< Q$

Kinetische energie van
dochterkern verwaarloosbaar
o.w.v. veel grotere massa

???

14

41.5 BETA-VERVAL (transmutatie)



Beta-deeltjes: elektron, positron (anti-elektron)

Brede verdeling kinetische energie $< Q$

*Kinetische energie van
dochterkern verwaarloosbaar
o.w.v. veel grotere massa*

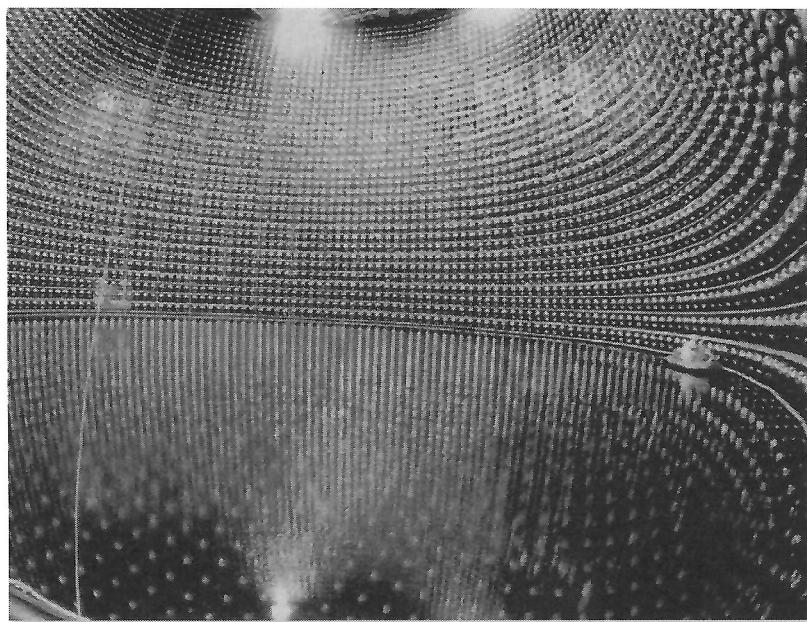
Neutrino (antineutrino) \longrightarrow Voorgesteld door W. Pauli (1930)

geen elektrische lading
massa ~ 0 ($< 0,14 \text{ eV}/c^2$)
spin $1/2$
moeilijk te detecteren

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Behoud van energie} \\ \text{Behoud van (relativistisch) impuls} \\ \text{Behoud van impulsmoment} \end{array} \right.$
Gedetecteerd door F. Reines (1956)

15

Super Kamiokande: neutrino detector



16

**The Nobel Prize
in
Physics 2015**

► Takaaki Kajita
► Arthur B. McDonald

"for the discovery of
neutrino oscillations"

Photo: © Takaaki Kajita
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2

Photo: K. MacPhee, Queen's University/SNO/LAB
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

17

41.6 GAMMA-VERVAL

Geëxciteerde kern die terugvalt naar de grondtoestand zendt hierbij γ -foton uit:

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$$

bijvoorbeeld na alfa- of betaverval

${}^5_5 B \rightarrow {}^6_6 C^* + e^- + \bar{\nu}$

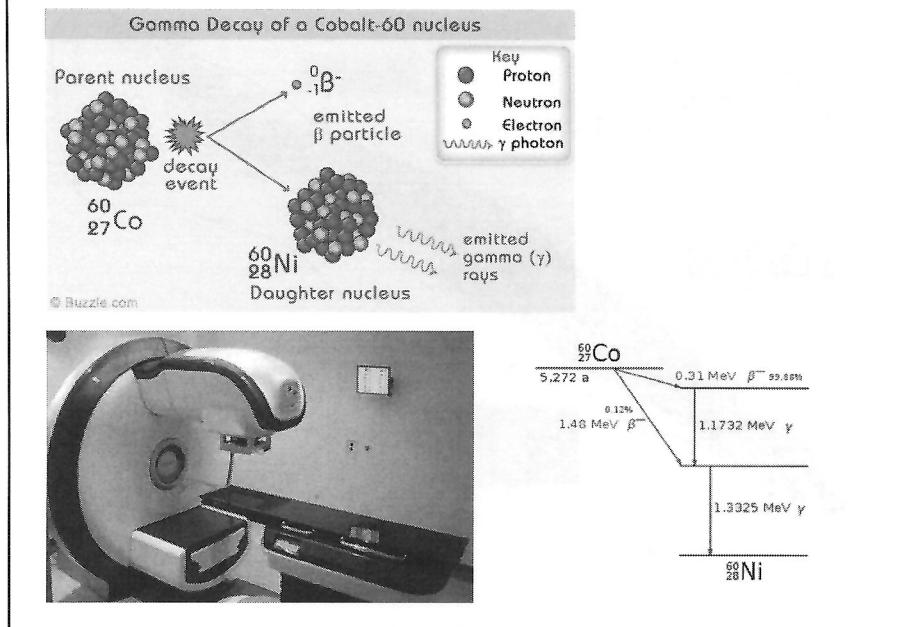
${}^6_6 C^* \rightarrow {}^6_6 C + \gamma$

Isomeer
metastabiele geëxciteerde kern

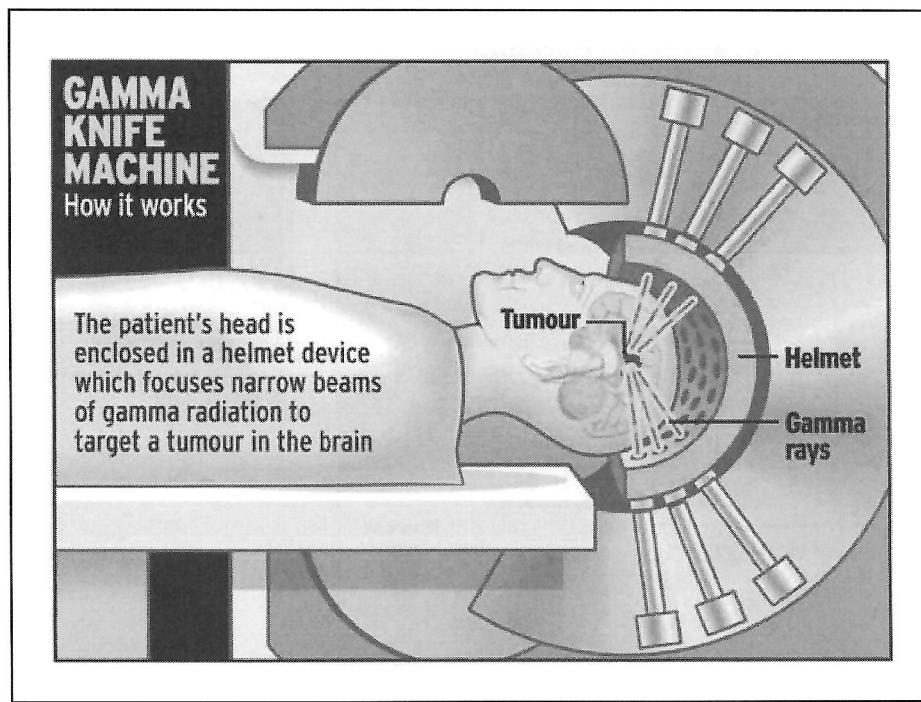
Interne conversie
Energie van geëxciteerde kern wordt via kinetische energie van elektronen afgestaan (conversie-elektronen)

18

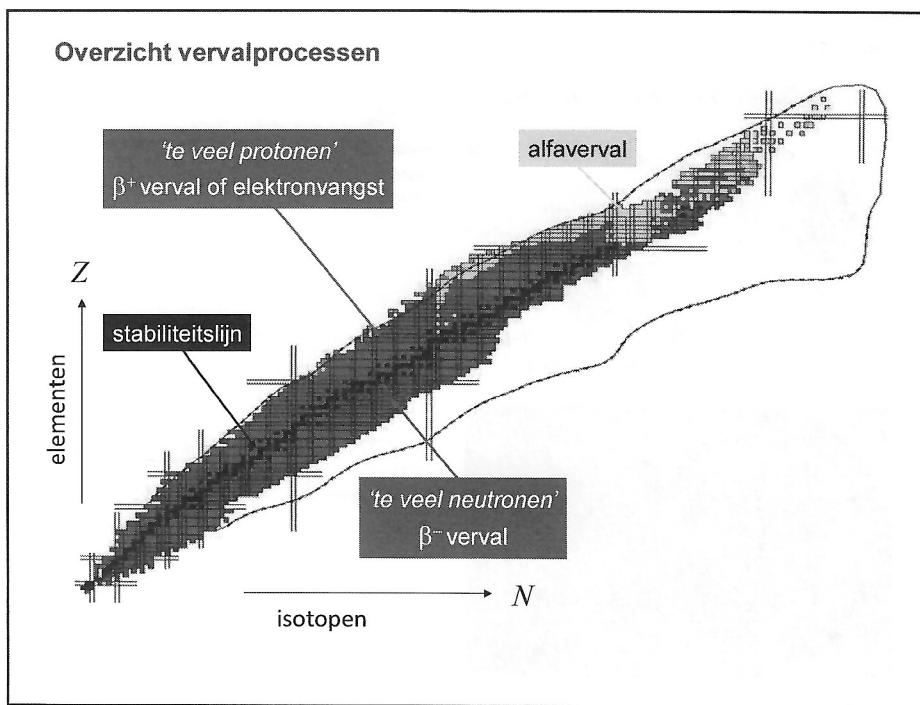
Toepassing in de oncologie



19

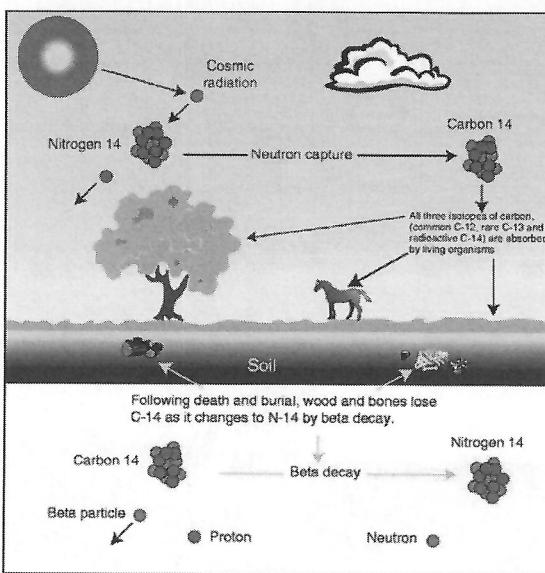


20

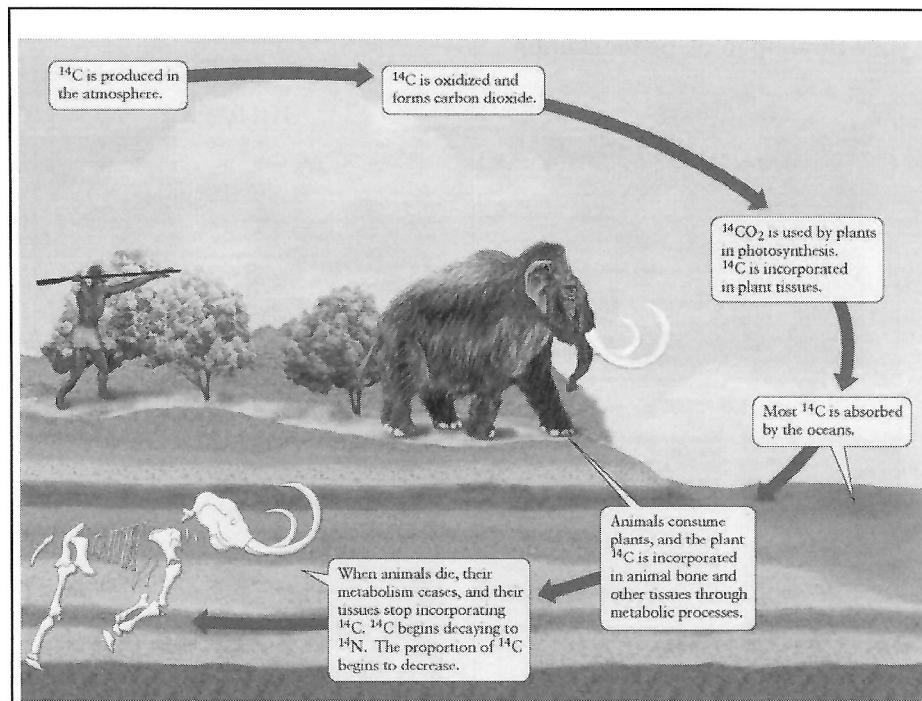


21

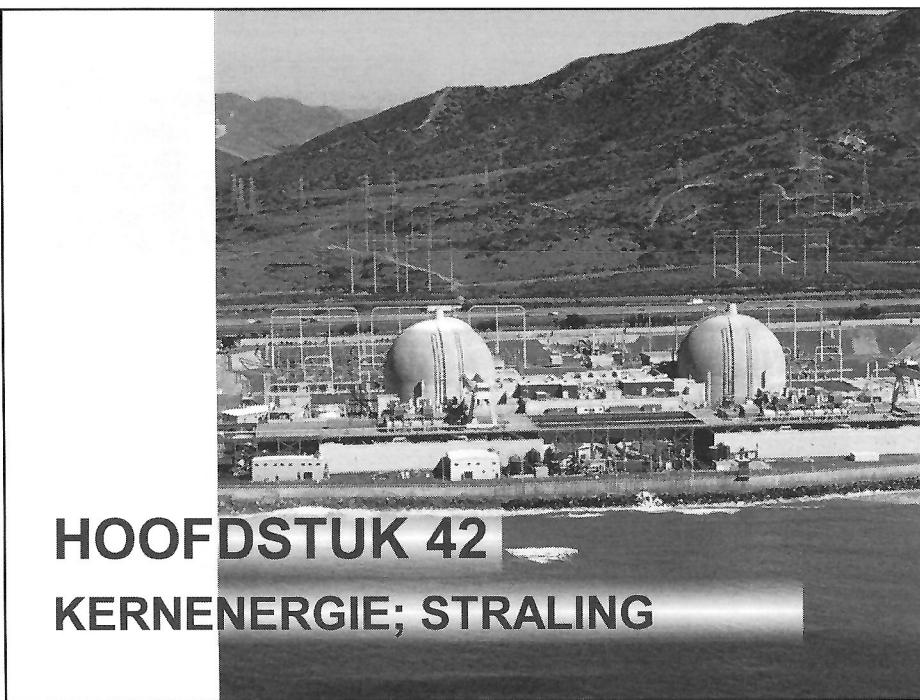
41.10 RADIOMETRISCH DATEREN



22



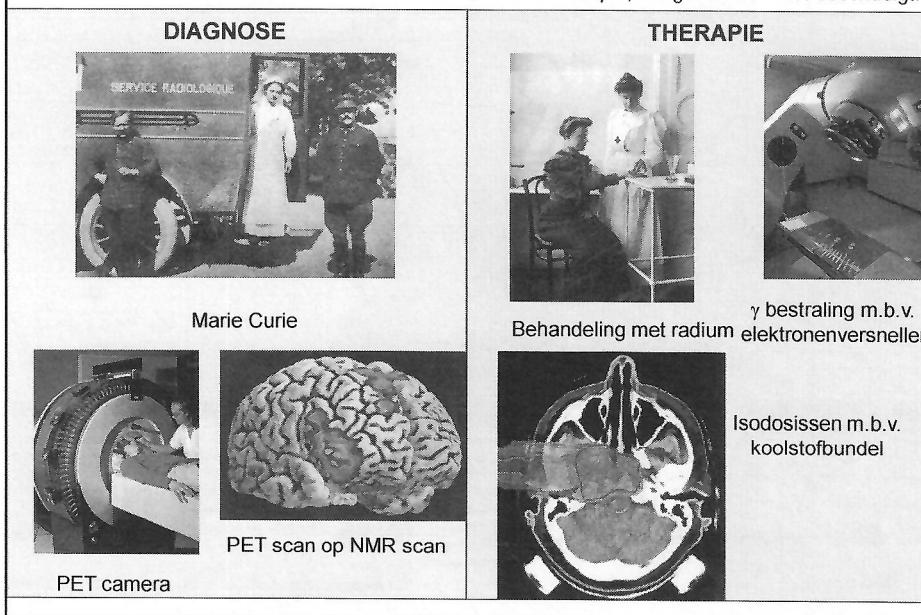
23



24

42.7 Straling in de geneeskunde

Net als een scalpel, het geneest en het beschadigt!



25

Radioisotopen

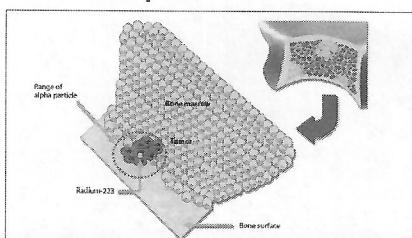
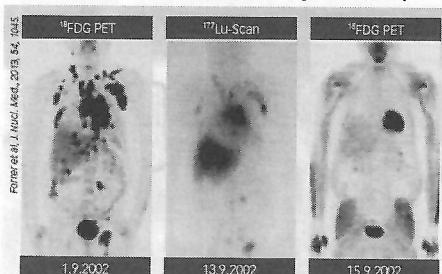


Figure 8. Bone Targeted Localized Radiation Mechanism of Action of Ra-223—This diagram demonstrates that alpha particles have a much shorter range than beta particles; thus alpha particles have a much more targeted effect within bone. Figure from Heubel et al. *Cancer Res.* 2007 [39] with permission from the American Association for Cancer Research.



Radium-223: straalt alfa-deeltjes uit; beperkte dracht; geschikt voor botkanker.



Lutetium-177: straalt beta-deeltjes uit; middellange dracht; geschikt voor lymfekanker.

26

Hadrontherapie

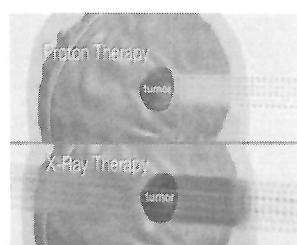
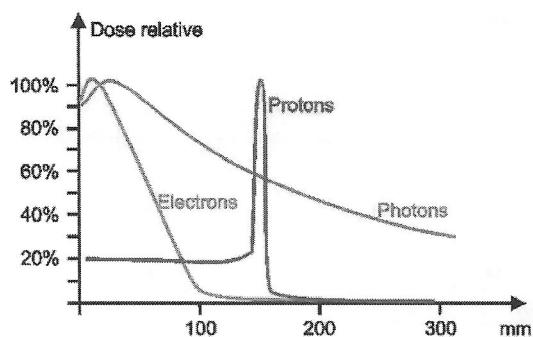
Interuniversitaire samenwerking voor protoncentrum kanker



© do 20/02/2014 - 11:35 ▲ Belga, Dominique Fiers

27

Hadrontherapie; principe



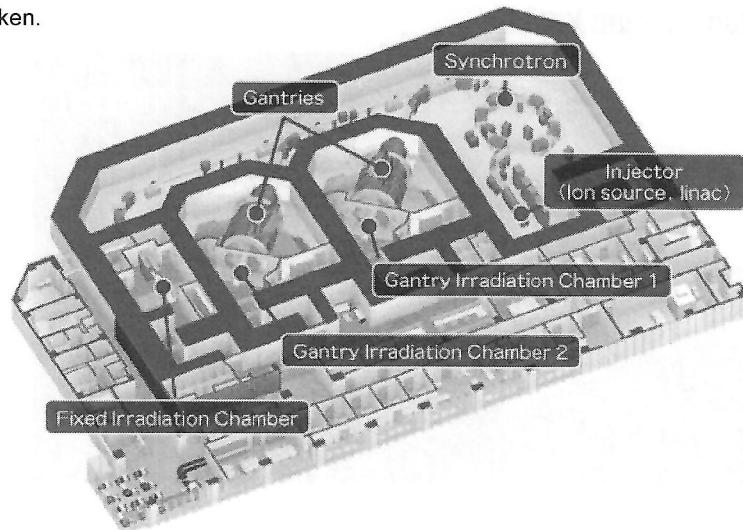
Essentieel voordeel van bestraling met protonen of koolstofionen: weefsel wordt slechts op bepaalde diepte sterk bestraald. Minder schade aan gezond weefsel.

<https://youtu.be/MS590Xtg9M4>

28

Hadrontherapie; in de praktijk

Een deeltjesversneller is nodig om de protonenbundel of ionenbundel te maken.



29

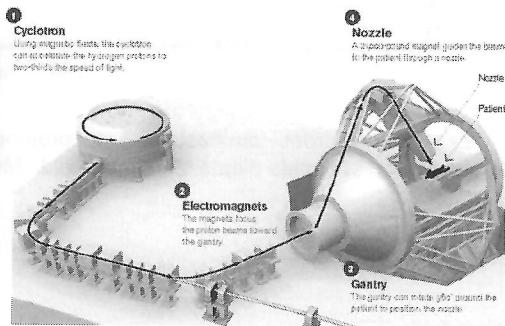
Proton radiation therapy Conventional X-ray therapy

iba | Proton Therapy



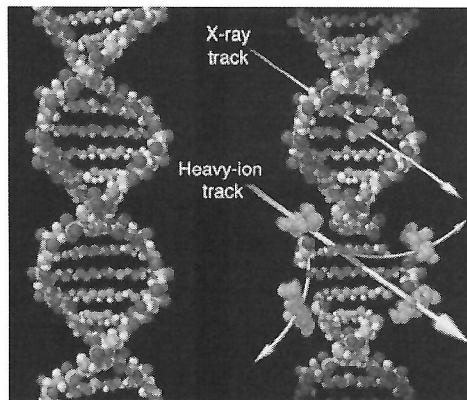
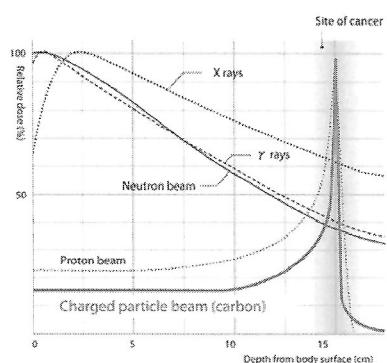
By adjusting the speed of the protons, a physician can control how deep their penetration will be. The controls their relative total energy of the tumor and cause less damage to the surrounding tissue.

Because conventional radiation doesn't release its energy at a specified depth, it can cause initial damage to the tissue surrounding the tumor.



30

Koolstofionen vs. protonen?



Koolstofionen laten nog betere positionering van de bestraling toe.
Koolstofionen induceren grotere schade aan DNA van tumorcellen.

