

1 Spektri on aineen sormenjälki

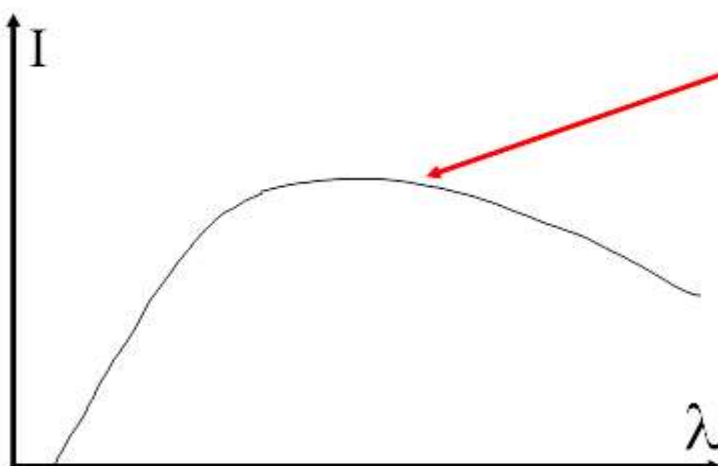
- spektri on aaltoliikkeen aallonpituus-, taajuus- tai energiajakauma



Vaaka-akselina voi olla myös taajuus tai energia.

JATKUVA SPEKTRI (= derivoituva käyrä)

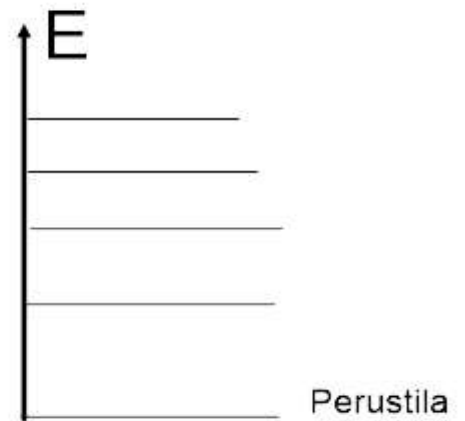
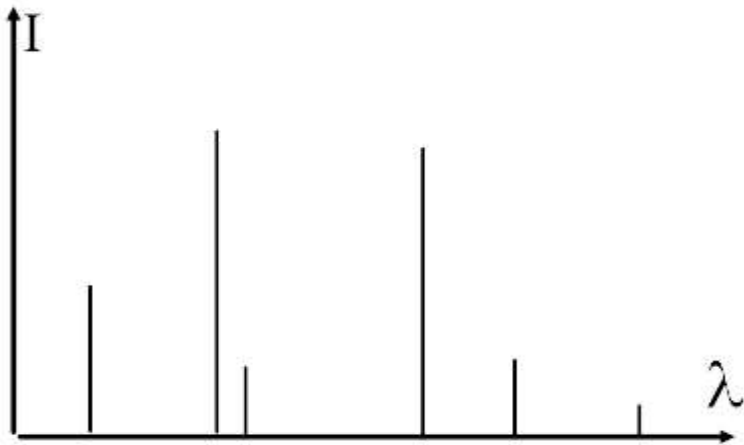
- aallonpituuden (ja energian) muutokset voivat olla äärettömän pieniä.



Ei piikkejä eikä "ryppyjä".

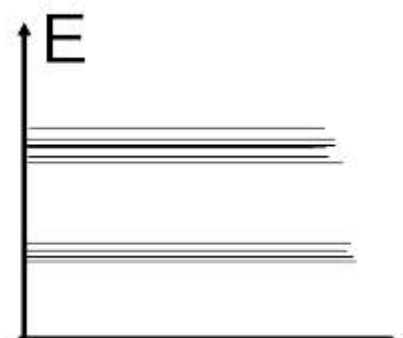
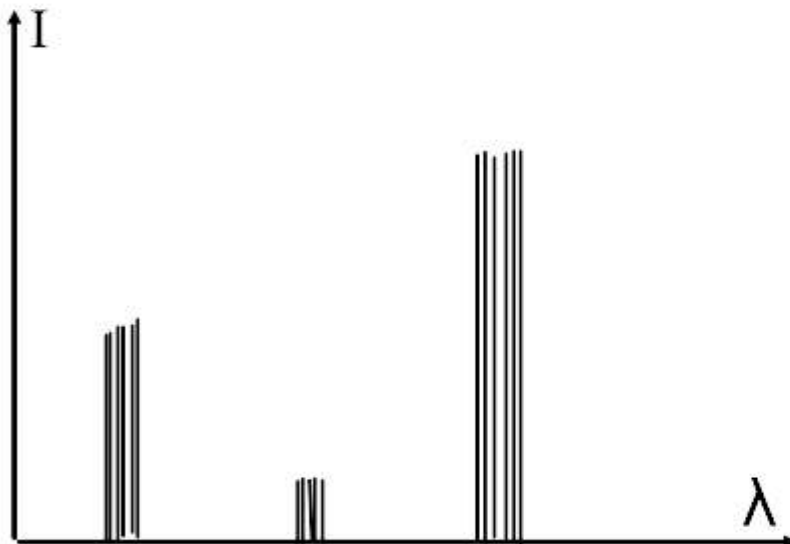
VIIVASPEKTRI (epäjatkuvu)

- säteilyn syntyyn liittyy diskreettejä eli hyppäyksellisiä energian muutoksia



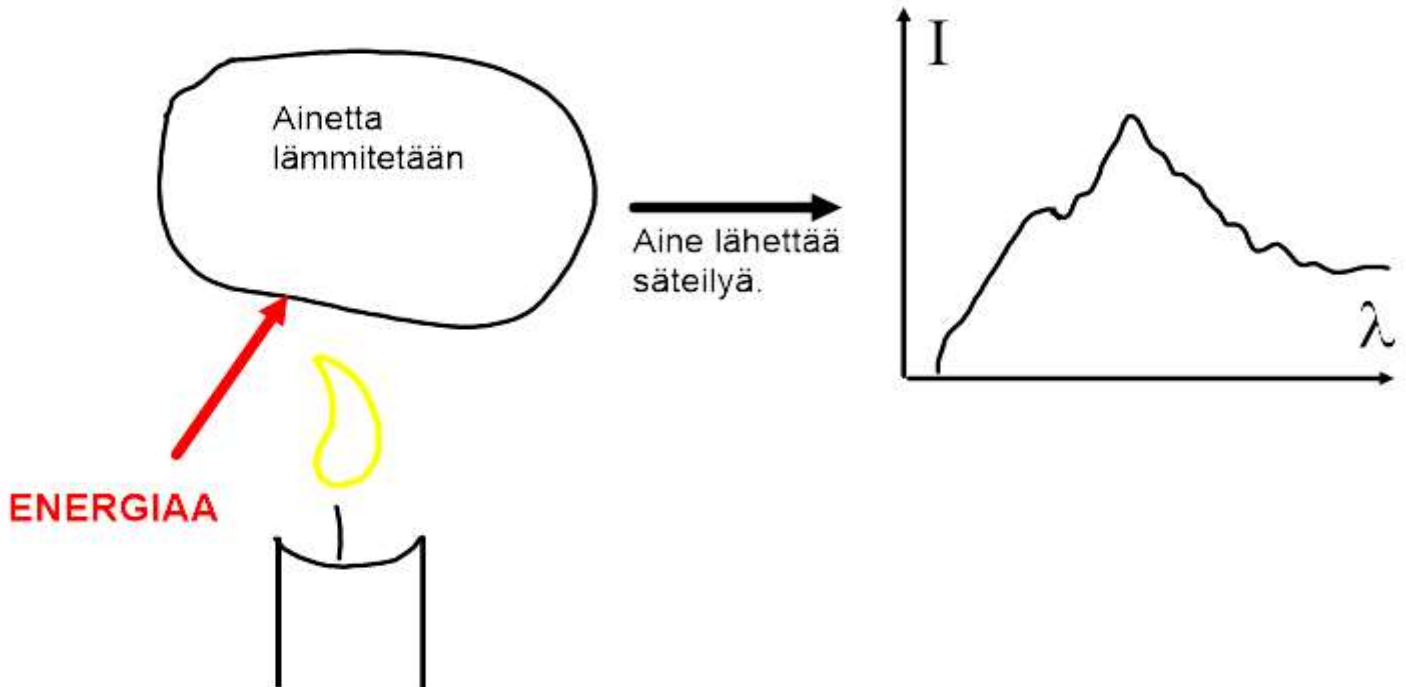
VYÖSPEKTRI (epäjatkuvu)

- säteilyn lähteessä on useita lähekkäisiä energiatiloja



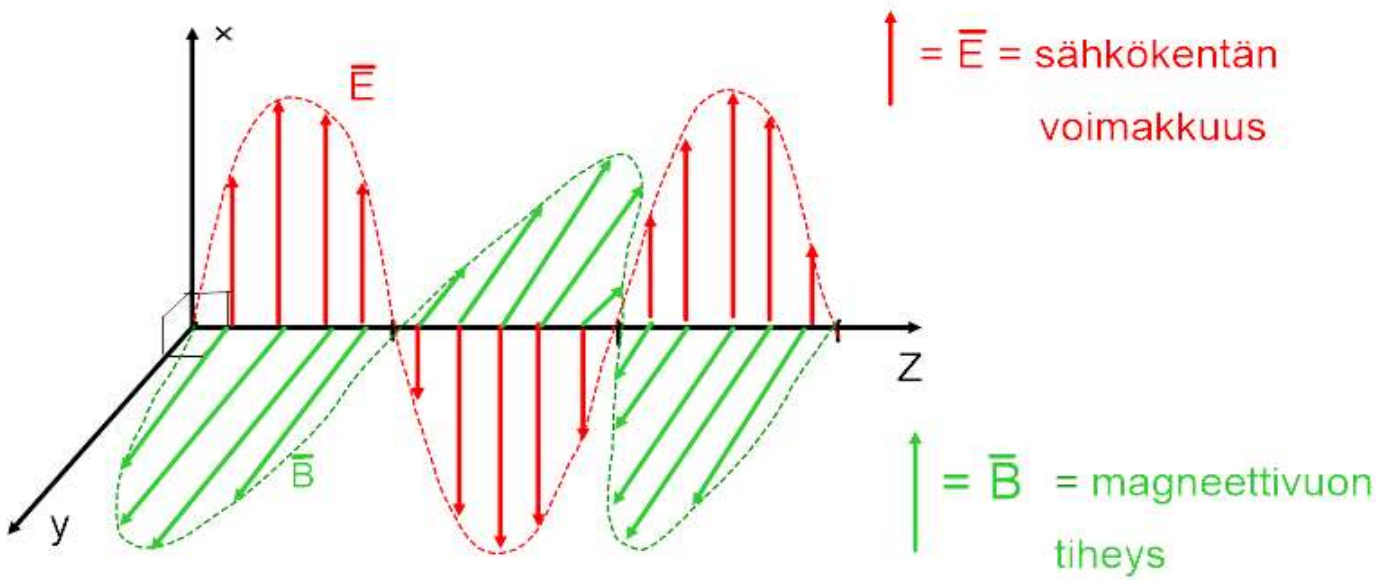
EMISSIOSPEKTRI

- ainetta viritetään ja se lähettää säteilyä



Valo aaltona ja fotoneina

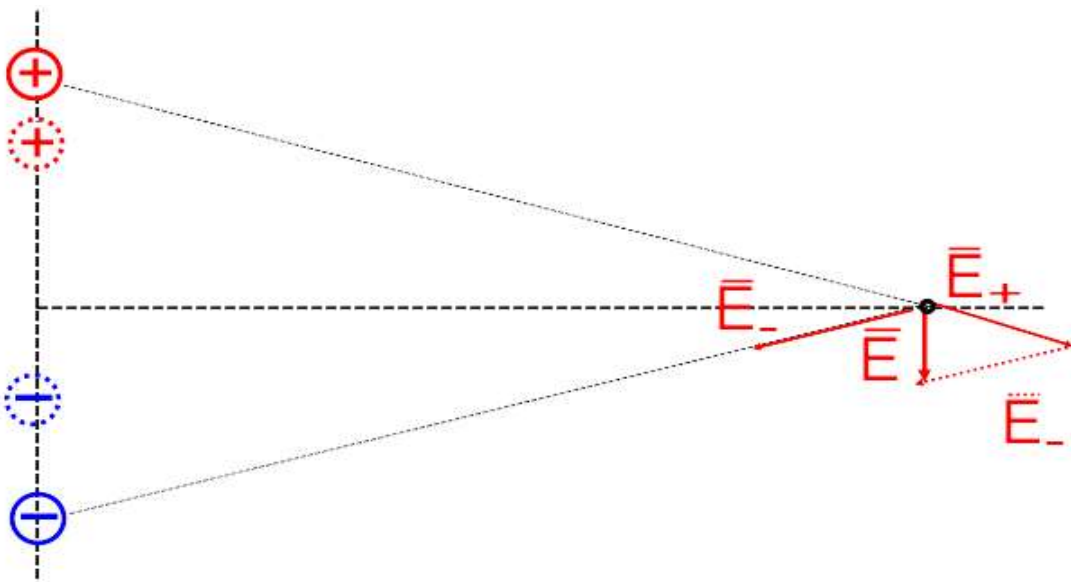
- sähkövarauksiin liittyy Coulombin voima
- liikkuviin varauksiin liittyy magneettinen voima ("magneettikenttä")
- kiihtyvässä (tai hidastuvassa) liikkeessä olevat sähkövaraukset synnyttävät sähkömagneettista säteilyä
- silloin sähkökenttä (\vec{E}) ja magneettikenttä (\vec{B}) kytkeytyvät toisiinsa



Animaatio etenevästä aallosta

Sähkömagneettisen säteilyn lähde:

Värähtelevä poolinen molekyyli



Säteilyn laji	Säteilyn aiheuttaja	Aallonpituusalue	Ominaisuuksia
Radioaallot	Värähtelypiirit	10 cm - 10 km	Etenevät ilman väliainetta
Mikroaallot	Pyörivät molekyylit	1 mm - 1 m	Tutka- ja kännykkäaalloja
Lämpösäteily	Värähtelevät molekyylit	1 μm - 1 mm	Aistitaan lämpönä
Näkyvä valo	Elektronisiirtymät ¹	380 nm - 800 nm	Havaitaan näköaistin avulla
UV-säteily	Elektronisiirtymät ²	1 nm - 380 nm	Vaurioittaa mm. ihoa
Röntgensäteily	Elektronisiirtymät ³	10 pm - 1 nm	Läpitukevaa säteilyä, tuhoaa eläviä soluja
Gammasäteily	Ytimen viritykset	10 fm - 10 pm	Läpitukevaa säteilyä, tuhoaa eläviä soluja



¹Keveiden alkuaineiden atomien uloimmilla elektronikuorilla

²Keskiraskaiden alkuaineiden uloimmilla elektronikuorilla

³Raskaiden alkuaineiden sisäkuorilla

Kaikki sähkömagneettisen säteilyn lajit toteuttavat aaltoliikkeen perusyhtälön

$$\lambda f = c$$

λ = aallonpituus

f = taajuus

c = valon (tai muun sähkömagneettisen säteilyn) etenemisnopeus

c_0 = valon nopeus tyhjiössä = $2,997 \cdot 10^8$ m/s

Valon kvanttiteoria

IDEA: Säteilyenergialla on pienin yksikkö eli KVANTTI. Kvantin energia on suoraan verrannollinen säteilyn taajuuteen.

$$E = hf$$

Kvantin energia
MAOL s. 134

E = säteilyn energia, $[E] = 1 \text{ J}$ tai $[E] = 1 \text{ eV}$

f = säteilyn taajuus, $[f] = 1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$

h = Planckin vakio = $6,627 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
= $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$

Aaltoliikkeen perusyhtälöstä $\lambda f = c$ seuraa, että $f = c/\lambda$, joten

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}$$

Kvantin energiaa kuljettaa kuvitteellinen hiukkanen, jota nimitetään FOTONIKSI. Fotonilla on liikemäärä

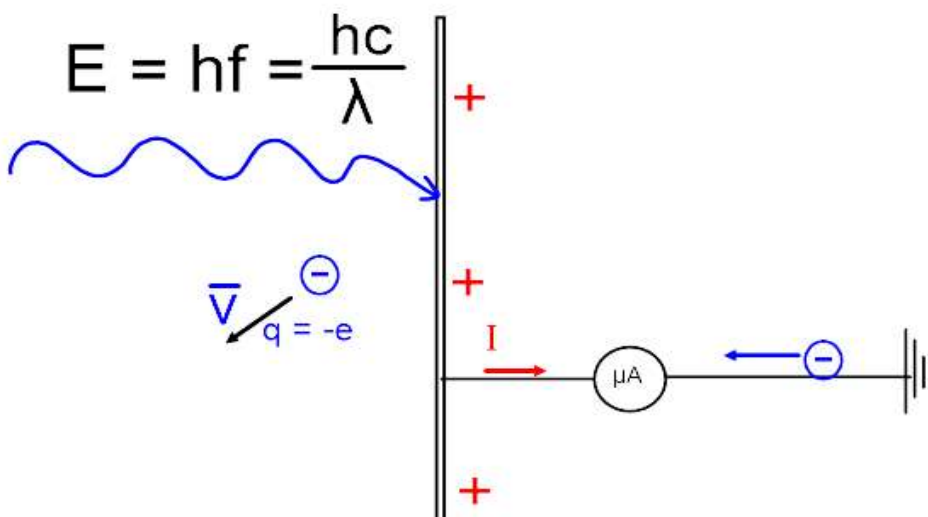
$$p = h/\lambda$$

MAOL s. 134 Klassisesti $p = mv$.

2 Valosähköilmiö

Photoelectric Effect

IDEA: Valo ja UV-säteily irrottavat elektroneja metallipinnasta.



Yllätys:

Elektronien irtoaminen oli mahdollista, jos kvantin TAAJUUS oli riittävän suuri.

Selitys:

Vain yksi fotoni voi irrottaa elektronin eli fotonit eivät voi tehdä yhteistyötä.

Fotonin energia kuluu osittain irrotustyöhön (W_0), loppu muuttuu elektronin liike-energiaksi:

$$hf = W_0 + E_k^{\max}$$



Work function = irrotustyö

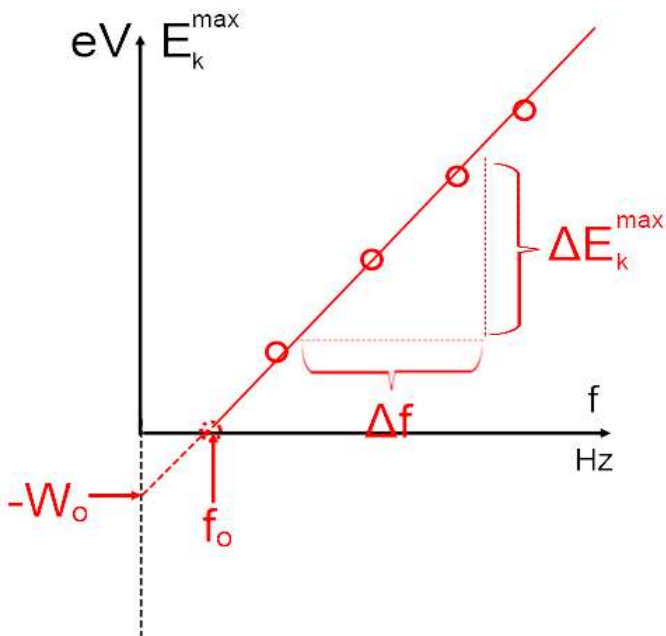
Silloin

$$E_k^{\max} = hf - W_0$$

Piirretään E_k^{\max} tulevan fotonin taajuuden
funktiona:

$$E_k^{\max} = hf - W_0$$

Kulmakerroin Vakiotermi



Planckin vakio saadaan suoran fysikaalisena
kulmakertoimena, ts.

$$h = \frac{\Delta E_k^{\max}}{\Delta f}$$

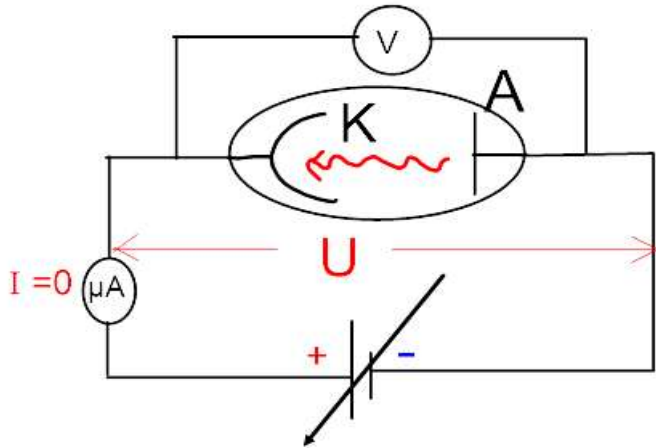
Irrotustyö W_0 voidaan päätellä rajataajuuden f_0
avulla.

Energiayhtälö: $hf = W_0 + E_k^{\max}$

Kun $f = f_0$, niin $E_k^{\max} = 0$ eli $hf_0 - W_0 = 0$ eli

$$W_0 = hf_0$$

Irrotustyö voidaan mitata kytkemällä metallipinta (= valokenno) sopivaan vastajännitteeseen:



1. Säädetään vastajännite U siten, että $I = 0$.

2. Liike-energia

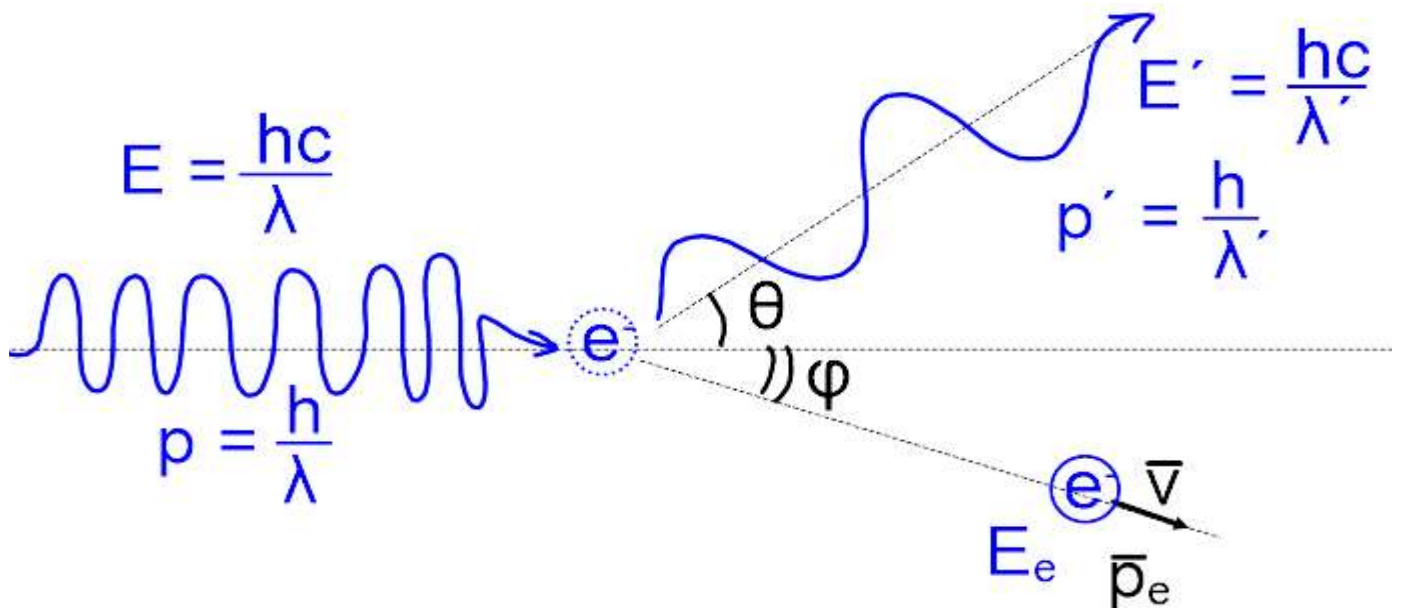
$$E_k^{\max} = eU$$

$$[E_k^{\max}] = 1 \text{ eV}.$$

Animaatio mittauksesta

Comptonin ilmiö (Comptonin sironta)

- röntgen- tai gammafotoni siroaa "vapaasta" Elektronista (eli fotonin energia on hyvin suuri):



Geogebra-animaatio

Kyseessä on fotonin ja elektronin välinen vino ja kimmoisa törmäys, jossa

- kokonaisenergia säilyy
- kokonaisliikemäärä säilyy
- käytännön koejärjestelyssä voidaan mitata energiat E ja E' sekä kulma θ , mutta ei elektronin energiaa eikä liikesuuntaa
- energian ja liikemäärän säilymislakeja soveltamalla saadaan kaava

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)$$

Tiedetään, että $E = \frac{hc}{\lambda}$ ja $E' = \frac{hc}{\lambda'}$

Silloin

$$\frac{\lambda'}{hc} - \frac{\lambda}{hc} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \quad | \cdot hc$$

$$\underbrace{\lambda' - \lambda}_{\Delta\lambda} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

eli $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$ MAOL s. 134

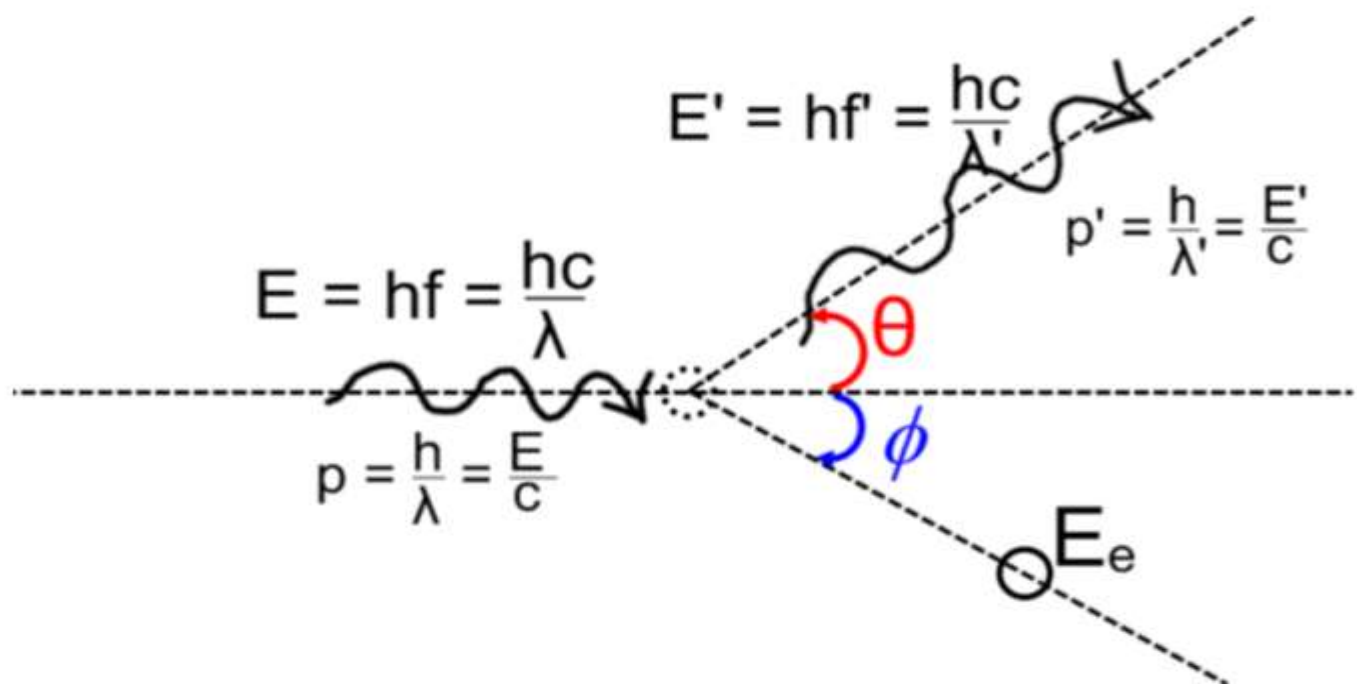
2+ Lisää Comptonin ilmiöstä

(Lue tämä jos kiinnostaa ja hermo kestää...)

Tarkastellaan fotonin siroamista ”vapaasta” elektronista eli fotonin energia on paljon suurempi kuin elektronin sidosenergia tietyn atomin ytimeen.

Kyseessä on silloin kahden hiukkasen relativistinen törmäys eli liikemäärä ja kokonaisenergia säilyvät.

Liikemäärän säilyminen tarkoittaa sitä, että liikemäärä säilyy sekä vaakasuunnassa että pystysuunnassa.



Liikemäärän vaakakomponentti säilyy eli

$$\frac{E}{c} = \frac{E'}{c} + p_e \cos \phi .$$

Vastaavasti törmäyksen jälkeen liikemäärien poikittaishakomponenttien täytyy kumota toisensa, mikä antaa ehdon

$$\frac{E'}{c} \sin \theta - p_e \sin \phi = 0 \quad \text{eli} \quad \frac{E'}{c} \sin \theta = p_e \sin \phi .$$

Näistä ehdoista voidaan laskea elektronin liikemäärän vaaka- ja pystykomponentit:

$$p_{ex} = p_e \cos \phi , \quad p_{ey} = p_e \sin \phi .$$

Toisin sanoen

$$p_e \cos \phi = \frac{E}{c} - \frac{E'}{c} \cos \theta \quad |(\)^2, \quad p_e \sin \phi = \frac{E'}{c} \sin \theta \quad |(\)^2 .$$

Laskemalla elektronin liikemäärän komponenttien neliöt puolittain yhteen saadaan kaava

$$\begin{aligned}
& p_e^2 \underbrace{(\cos^2 \phi + \sin^2 \phi)}_1 = \\
& \frac{E^2}{c^2} - \frac{2EE' \cos \theta}{c^2} + \frac{E'^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \frac{E'^2 \sin^2 \theta}{c^2} = \\
& \frac{E^2}{c^2} - \frac{2EE' \cos \theta}{c^2} + \frac{E'^2}{c^2} \underbrace{(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}_1 = \\
& \frac{E^2}{c^2} - \frac{2EE' \cos \theta}{c^2} + \frac{E'^2}{c^2}.
\end{aligned}$$

Siis
$$p_e^2 = \frac{E^2}{c^2} - \frac{2EE' \cos \theta}{c^2} + \frac{E'^2}{c^2} \quad | \cdot c^2$$

eli
$$p_e^2 c^2 = E^2 - 2EE' \cos \theta + E'^2.$$

Kokonaisenergia säilyy ennen ja jälkeen törmäyksen:

$$E + m_0 c^2 = E' + E_e,$$

josta voidaan ratkaista elektronin energia törmäyksen jälkeen:

$$\begin{aligned}
E_e &= E + m_0 c^2 - E' \quad | \cdot ()^2 \quad \text{eli} \\
E_e^2 &= E^2 + m_0^2 c^4 + E'^2 + 2m_0 c^2 E - 2EE' - 2m_0 c^2 E'.
\end{aligned}$$

Suhteellisuusteorian mukaan elektronin kokonaisenergian neliö on $E_e^2 = p_e^2 + m_0^2 c^4$, joten

$$\cancel{p_e^2 c^2} + \cancel{m_0^2 c^4} = E^2 + \cancel{m_0^2 c^4} + E'^2 + 2m_0 c^2 E - 2EE' - 2m_0 c^2 E'.$$

Tästä saadaan sieventämällä tulos

$$p_e^2 c^2 = E^2 + E'^2 + 2m_0 c^2 E - 2EE' - 2m_0 c^2 E'.$$

Liikemäärän säilymislaista saatiin edellä ehto

$$p_e^2 c^2 = E^2 - 2EE' \cos \theta + E'^2,$$

joten vertailemalla näiden yhtälöiden oikeita puolia saadaan yhtälö

$$\cancel{E^2} + \cancel{E'^2} + 2m_0 c^2 E - 2EE' - 2m_0 c^2 E' = \cancel{E^2} - 2EE' \cos \theta + \cancel{E'^2}.$$

Termit E^2 ja E'^2 eliminoituvat, joten jäljelle jää yhtälö

$$2m_0 c^2 E - 2EE' - 2m_0 c^2 E' = -2EE' \cos \theta$$

$$\text{eli } 2m_0 c^2 E - 2m_0 c^2 E' = 2EE' - 2EE' \cos \theta \quad | :2$$

eli jakamalla puolittain kahdella ja yhdistämällä samanmuotoisia termejä saadaan yhtälö

$$m_0 c^2 (E - E') = EE' (1 - \cos \theta) \quad | :EE' m_0 c^2.$$

Tästä saadaan sieventämällä Comptonin sironnan energiayhtälö eli ehdot fotonien energioille E ja E' sekä sirontakulmalle θ . Elektronista ei tarvitse tietää muuta kuin lepomassa m_0 .

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta).$$

Huh!

3 Hiukkanen ja aalto ovat malleja

IDEA: Aaltoliikkeellä on sekä aalto- että hiukkasominaisuuksia.

Peruste: Fotonilla on LIIKEMÄÄRÄ ($p = h/\lambda$), joka on selvä hiukkasominaisuus.

Klassisesti $\bar{p} = m\bar{v}$.

Toisaalta myös aineella (hiukkasilla) pitäisi olla aaltoliikkeen ominaisuuksia.

Louis de Broglie* loi hypoteesin aineaalloista, joiden aallonpituus on

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

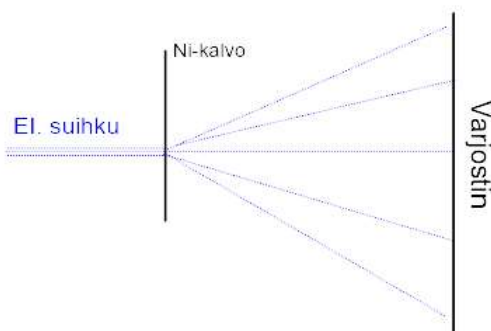
$$\text{Vrt. } p = \frac{h}{\lambda}$$

Hiukkasen klassinen liikemäärä.

*Fysiikan Nobel-palkinto 1929.

Elektronin aalto-ominaisuudet

Kokeellinen todiste: Elektronisuihkun interferenssikuvio nikkelikalvosta.



Davisson ja Germer, 1927
Fysiikan Nobel-palkinto 1937

Nykyisin elektronidiffraktiota käytetään paljon kiinteän aineen tutkimuksessa, esim. LEED-menetelmässä. LEED = Low Energy Electron Diffraction

ELEKTRONIMIKROSKOOPPI

- hyödyntää elektronien de Broglie-aallonpituutta
- erotuskyky parhaimmillaan noin 1nm

PYYHKÄISYELEKTRONIMIKROSKOOPPI

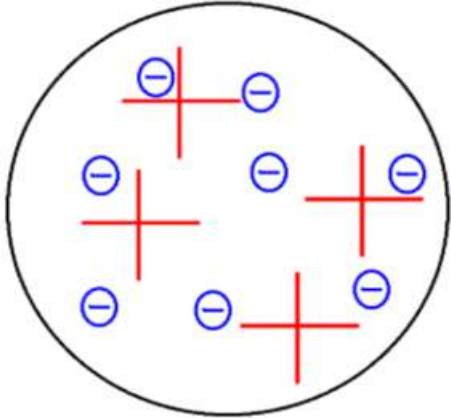
- Scanning Electron Microscope = SEM
- elektronien sirontakuvio ohuen näytteen pinnasta
- parhaimmillaan voidaan saavuttaa 200000-kertainen suurennus

LÄPÄISYELEKTRONIMIKROSKOOPPI

- Transmission Electron Microscope = TEM
- suureen nopeuteen kiihdytetyt elektronit kulkevat näytteen läpi
- läpi menneet elektronit törmäävät fluorisoivaan pintaan
- kuva muodostuu fluorisoivan pinnan valaisevista pisteistä
- noin miljoonakertainen suurennus eli erotuskyky on noin 1nm

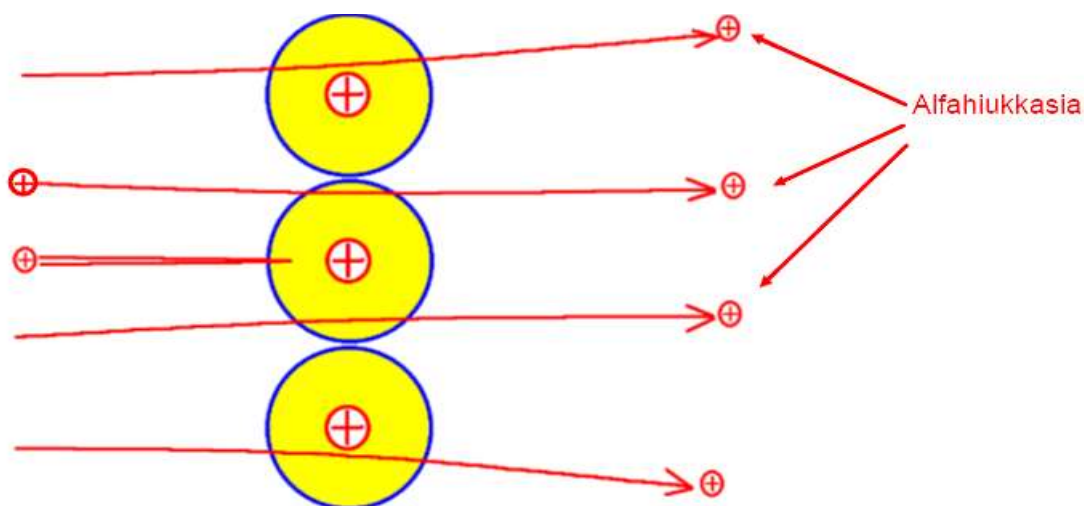
4 Atomin energia on kvantittunut

Historiaa: Thomsonin malli (1904)

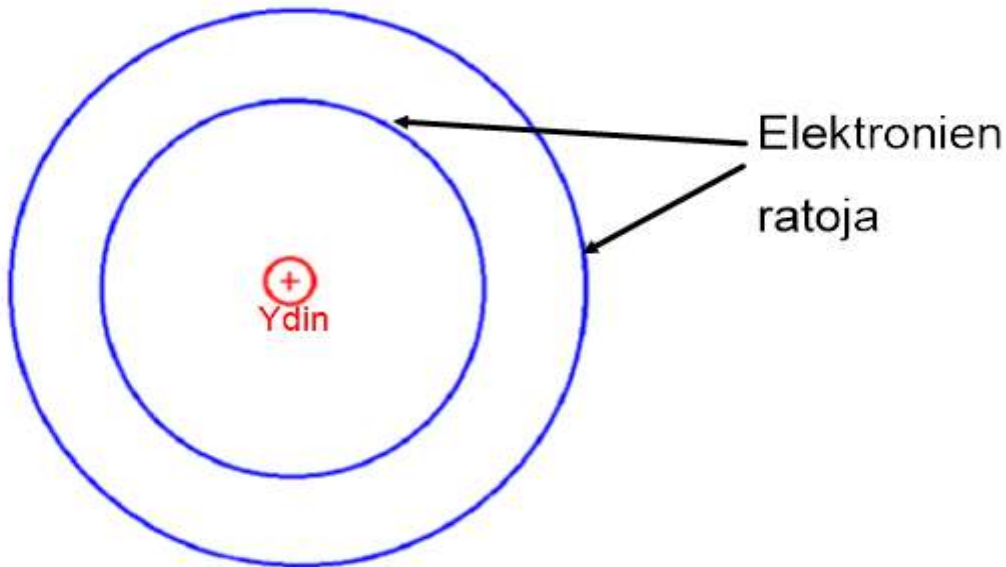


- positiivinen, tasaisesti jakautunut taustavaraus, jossa pienet elektronit värähtelevät
- ”rusinakakumalli”

Historiaa: Rutherfordin atomimalli [Simulaatio](#)



- sirontakokeiden tulos: atomissa on PIENI ja POSITIIVISESTI VARAUTUNUT YDIN



- elektronin liikerata on ympyrä: (= "tasainen ympyräliike")
- sähköstaattinen voima pitää radalla
- liikeyhtälö elektronille:

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

- sallittuja ratoja kiertävään elektroniin liittyy kvanttiehto

$$2\pi r_n = n \frac{h}{m_e v} = n \lambda_{dB}$$

Radan pituus on de Broglie -aallon-Pituuden monikerta

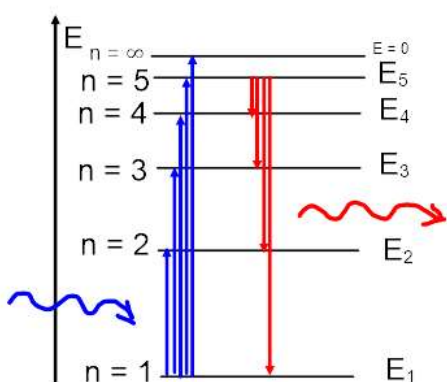
- tämä tarkoittaa sitä, että elektronin rataliikkeen pyörimismäärä on kvantittunut eli se saa vain tiettyjä arvoja:

$$\underbrace{m_e v r_n}_{\text{Pyörimismäärä}} = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar$$

- kun elektroni siirtyy radalta toiselle se emittoi tai absorboi kvantin $E_m - E_n = hf$

Energiatasokaavio

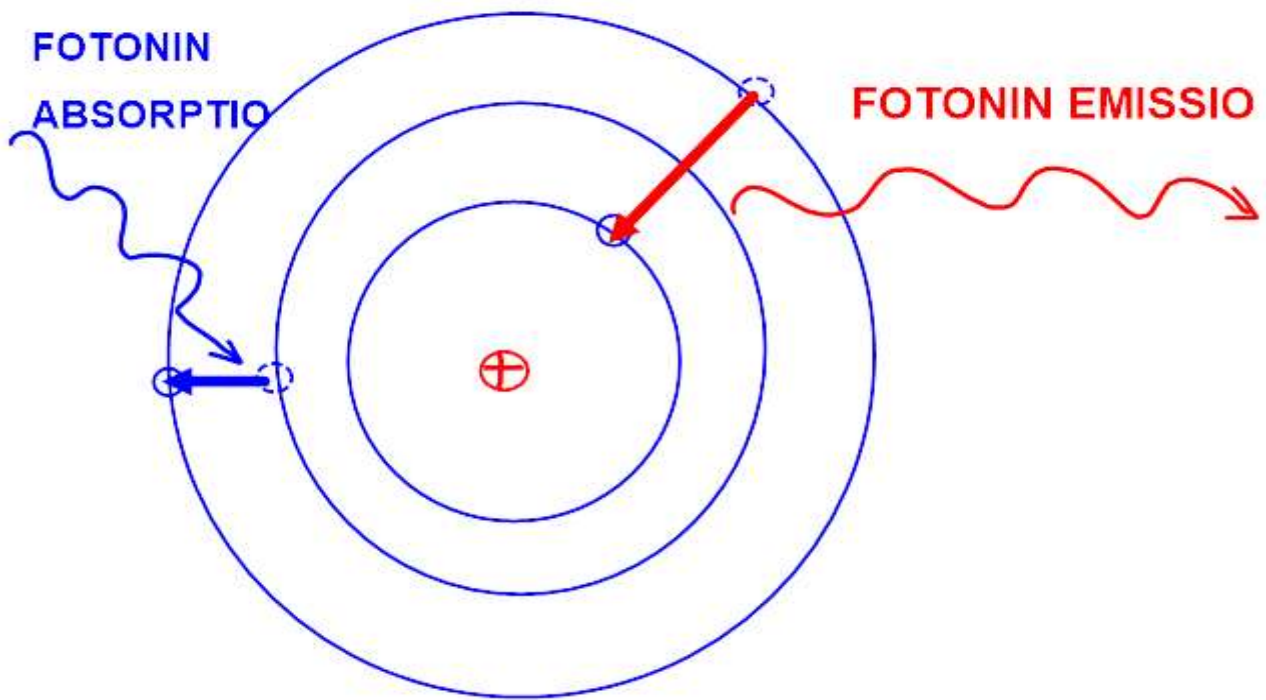
Atomin elektronien energiat muuttuvat hyppäyksittäin eli ovat DISKREETTEJÄ. Energiatiloja kuvataan energiatasokaavioilla (sidotun tilan kokonaisenergia on negatiivinen):



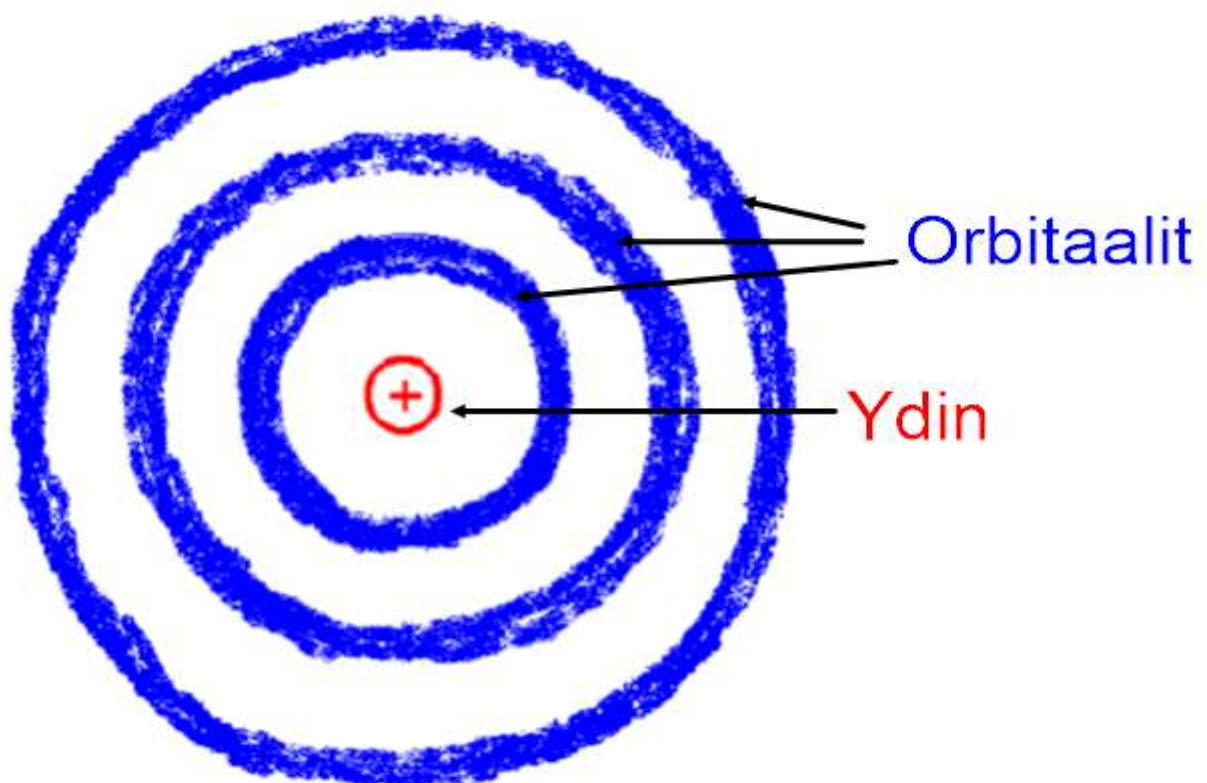
n = vetyatomin PÄÄKVANTTILUKU

Absorptioon tarvitaan ulkoista energiaa.

Emissio tarkoittaa siirtymää alempaan energiatilaan, jolloin vapautuu energiaa.



Kvanttimekaniikan atomimalli



- elektronin tarkan paikan sijasta puhutaan aaltofunktiosta $\Psi = \text{"Psi"}$, joka saadaan ratkaisemalla Schrödingerin aaltoyhtälö

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 \Psi + V(x, y, z) \Psi = E \Psi,$$

$$\nabla^2 \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}.$$

- kyseinen aaltoyhtälö on toisen kertaluvun differentiaaliyhtälö, jonka tarkka ratkaiseminen onnistuu vain tietyissä erikois-tapauksissa
- aaltofunktion neliö ($|\Psi|^2$) kuvaa elektronin esiintymisen todennäköisyyttä (vastaa **tiheysfunktion** käsitettä matematiikassa)
- aaltofunktion avulla voidaan laskea mm. elektronin liikemäärä, pyörimismäärä ja kokonaisenergia
- nämä suureet ovat kvantittuneita eli ne saavat diskreettejä eli hyppäyksellisesti muuttuvia arvoja

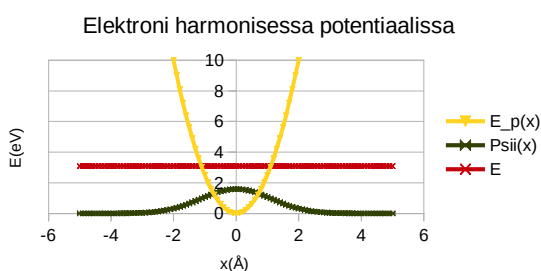
- monihiukkassysteemin (= atomissa on useita elektroneja) tarkka ratkaisu on mahdotonta: tarvitaan numeerisia ratkaisuja (jotka ovat käytännössä riittävän tarkkoja)
- kvanttimekaniikkaan liittyy epätarkkuusperiaate: Kahden suureen (esim. paikka ja liikemäärä) samanaikainen ja äärettömän tarkka mittaaminen on periaatteessa mahdotonta

ESIMERKKI: Harmoninen värähtelijä

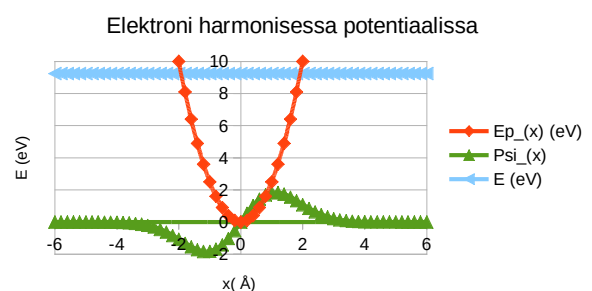
- Elektroni potentiaalikuopassa
- Potentiaalienergia

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2, k = 80 \text{ N/m}.$$

Perustila: $E_0 = 3,09 \text{ eV}$

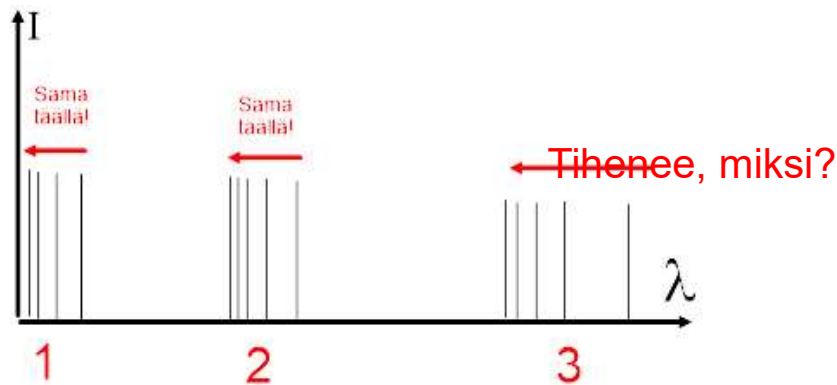


1. viritystila: $E_1 = 9,24 \text{ eV} = 3E_0$



Vetyatomin spektri

Ongelma: Vedyn spektriviivojen paikat:



- 1: Lyman-sarja: UV-säteilyä
- 2: Balmer-sarja: Näkyvää valoa
- 3: Paschen-sarja: Lämpösäteilyä

Balmerin havainto:

Vedyn näkyvän valon alueen spektriviivat voidaan laskea kaavasta

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$m = 3, 4, 5, 6, \dots$$

R_H = vedyn Rydbergin vakio
 $\approx 1,097 \cdot 10^7 \text{ 1/m}$

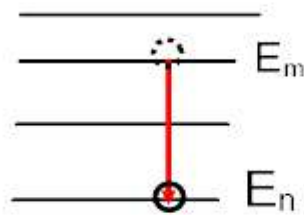
Yleistys: Vetyatomien KAIKKI spektriviivat saadaan kaavasta

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

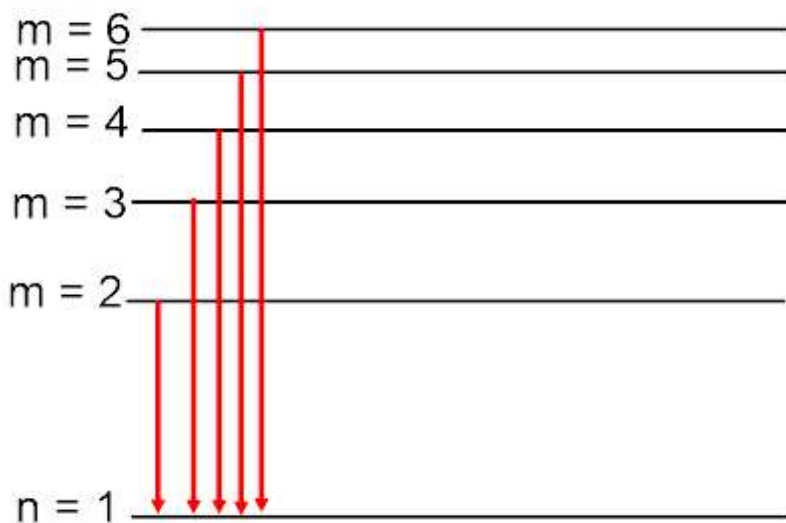
$$m = n+1, n+2, \dots$$

Taustalla on fotonin emissio:



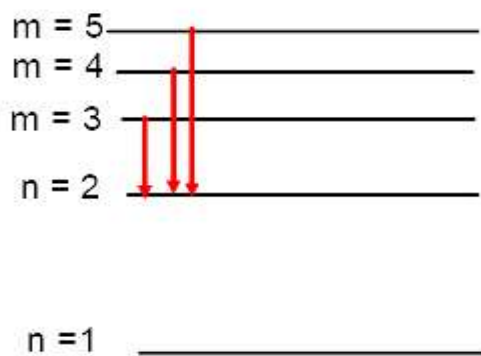
$$\longrightarrow E_m - E_n = \frac{hc}{\lambda}$$

n = 1: Lyman-sarja (UV-säteily)



Viritystilassa oleva vetyatomien elektroni palaa perustilaan.

$n = 2$: Balmer-sarja (Näkyvä valo)



Korkea viritystila purkautuu kakkoskuorelle.

$n = 3$: Paschen-sarja (Lämpösäteily)



Korkea viritystila purkautuu kolmoskuorelle.

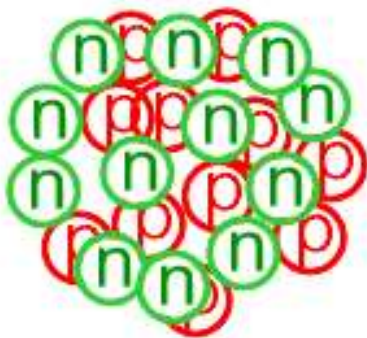
5 Atomin ydin koostuu protoneista ja neutroneista

Rakenneosat:



Nukleonien läpimitta on noin 10^{-15} m.

Rutherfordin sirontakoe (Virginian yliopisto)



← 10^{-14} m →

Neutronien lukumäärä on yleensä hiukan suurempi kuin protonien lukumäärä.

Ytimen läpimitta on noin 10^{-14} m.

Nimityksiä:

Protonit ja neutronit ovat **NUKLEONEJA**.

NUKLIDI = YDINLAJI, jolla on tietty lukumäärä protoneja ja neutroneja.

Saman alkuaineen erimassaisia versioita kutsutaan **ISOTOOPEIKSI**.

Tunnuslukuja:

Z = järjestysluku eli varausluku =
ytimen protonien lukumäärä

N = neutroniluku
= ytimen neutronien lukumäärä

A = massaluku eli nukleonien
yhteismäärä:

$$A = Z + N$$

Alkuaineita tunnetaan 118 kpl ja erilaisia nuklideja on yli 3000 kpl.

Nuklidien merkinnät:

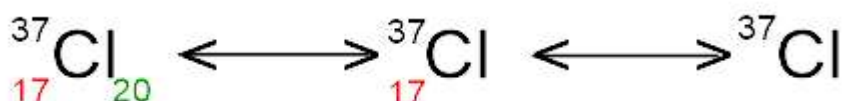
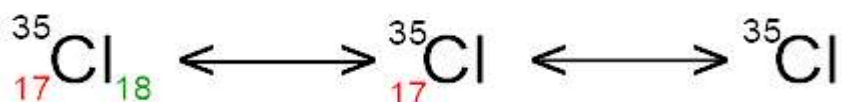
X = alkuainesymboli, esim. S



ESIMERKKEJÄ:



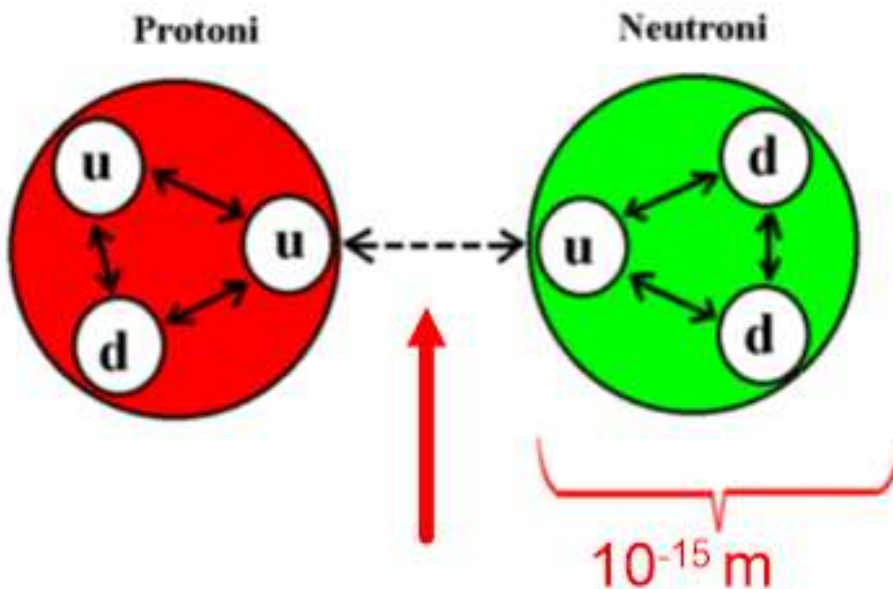
Luonnon kloorin isotoopit:



Ydin ja vahva vuorovaikutus

Merkitys: Attraktiivinen vuorovaikutus nukleonien välillä (siksi ydin pysyy koossa)

Vahva vuorovaikutus sitoo aineen pienimmät rakenneosaset eli KVARKIT protoneiksi ja neutroneiksi. Näitä nimitetään NUKLEONEIKSI.



Jäännösvuorovaikutus
(toinen kvarkki on lähellä)

- kvarkkeihin liittyvä jäännösvuorovaikutus sitoo ytimen rakenneosaset (positiiviset protonit ja varauksettomat neutronit) yhteen
- vahva vuorovaikutus on huomattavasti vahvempi kuin sähköinen voima, muuten atomien ytimet eivät pysyisi koskaan koossa
- vahvalla vuorovaikutuksella on HYVIN LYHYT KANTAMA eli voima häviää, jos etäisyys toiseen kvarkkiin on paljon suurempi kuin kvarkkien välinen etäisyys nukleonissa (noin 10^{-15} m)
- erittäin pienillä etäisyyksillä vahva vuorovaikutus voi olla hylkivä voima eli ytimillä on tietty koko eivätkä ne "romahda kasaan"

Atomimassayksikkö

$$1u = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C}) = \frac{1}{12} \frac{12,00 \cdot 10^{-3} \text{kg}}{N_A}$$
$$\approx 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{MAOL s. 70}$$

Massa ja energia

Einsteinin kaava:

$$E = mc^2$$

E = energia, [E] = 1J

m = massa, [m] = 1kg

c = valon nopeus = $2,998 \cdot 10^8$ m/s

Jos 1,0 kg ainetta muutetaan sähköenergiaksi, saadaan 25 000 000 000 kWh sähköä, mikä vastaa noin kolmasosaa Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta.

Käytännön laskutapa:

Jos 1u muutetaan energiaksi, siihen liittyvä energian muutos on

$$E = 1u \cdot c^2 = 149,24191 \cdot 10^{-12} \text{ J} \\ = 931,49432 \text{ MeV}$$

(MAOL s. 69)

ESIMERKKI

Ydinreaktiossa havaitaan massan muutos
 $\Delta m = 0,0025 \text{ u}$.

Vastaava energian muutos on

$$Q = 0,0025 \cancel{\text{ u}} \cdot 931,49 \frac{\text{MeV}}{\cancel{\text{ u}}} \approx \underline{\underline{2,3287 \text{ MeV}}}$$

Atomia muodostettaessa syntyy massavaje

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - m_{\text{atomi}}$$



Elektronit mukana!

m_{atomi} = muodostettavan isotoopin atomi-massa, jossa siis elektronit ovat mukana. Massavajetta vastaava sidosenergia on

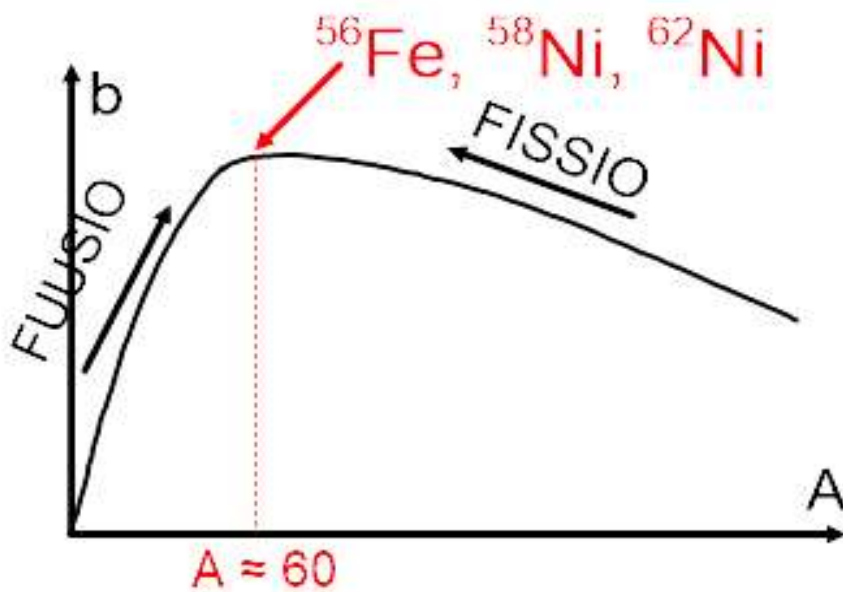
$$E_B = \Delta mc^2$$

Sidosenergiaa parempi ytimen vakauden mitta on sidososuus eli sidosenergia nukleonia kohti

$$b = \frac{E_B}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A}$$

$$[b] = \frac{1 \text{ MeV}}{\text{Nukleoni}}$$

Sidososuus riippuu ytimen järjestys-luvusta Z (tai massaluvusta A):



Vakain ydin on ^{62}Ni

6 Kvantittumiseen perustuva teknologia

Light

Amplification by

Stimulated

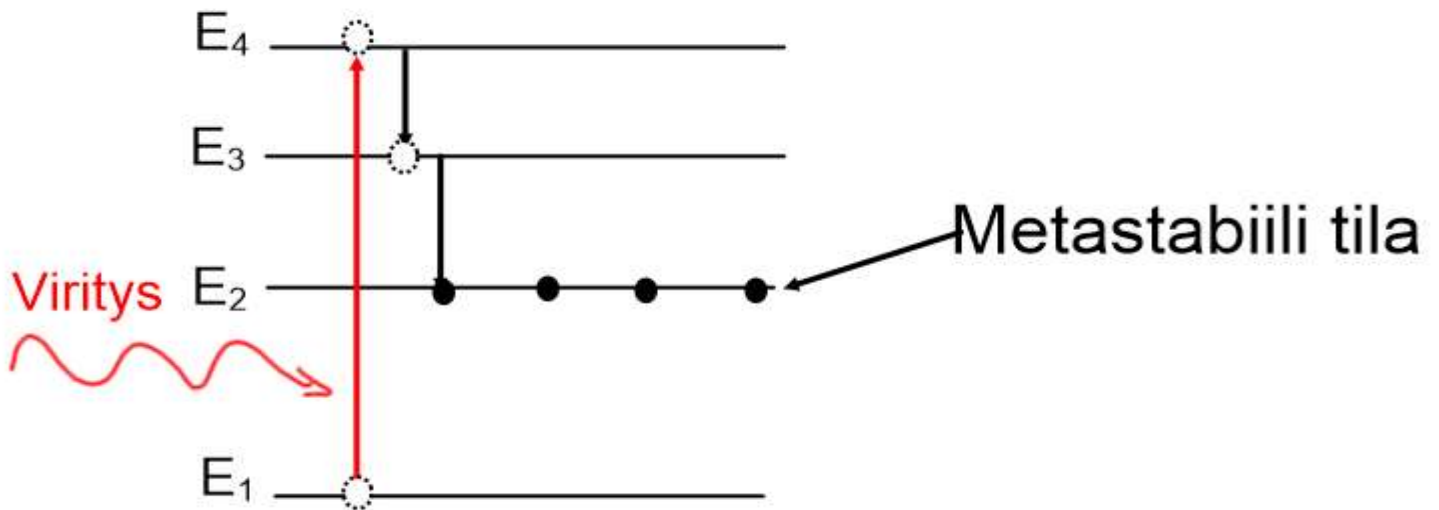
= LASER

Emission of

Radiation

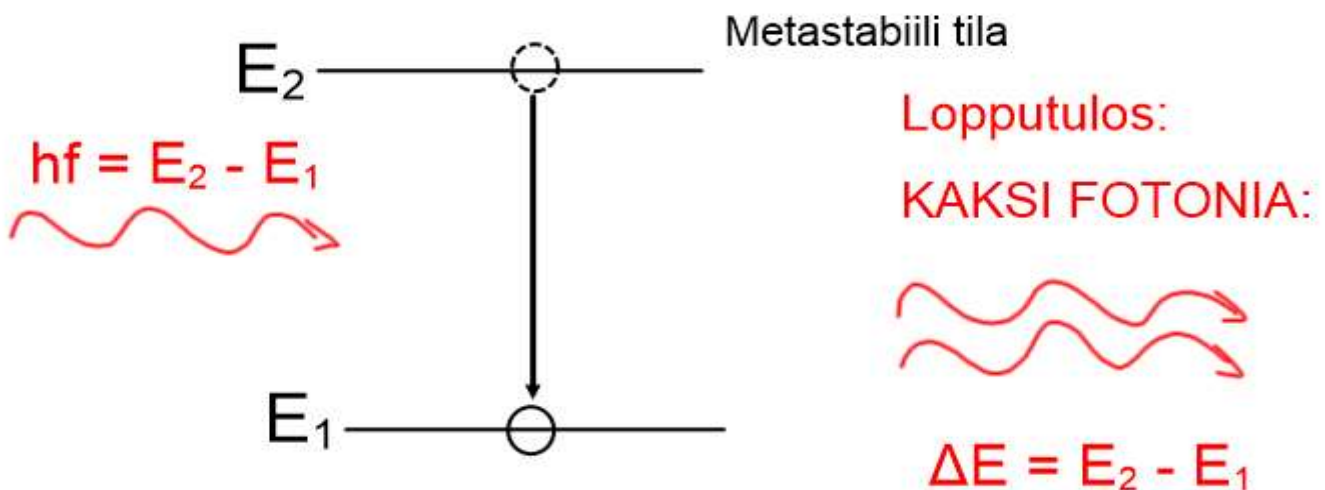
Mikä on STIMULOITU EMISSIO?

Lähtökohta: Laseraineessa täytyy olla pitkäikäinen elektronien viritystila eli META-STABIILI TILA:

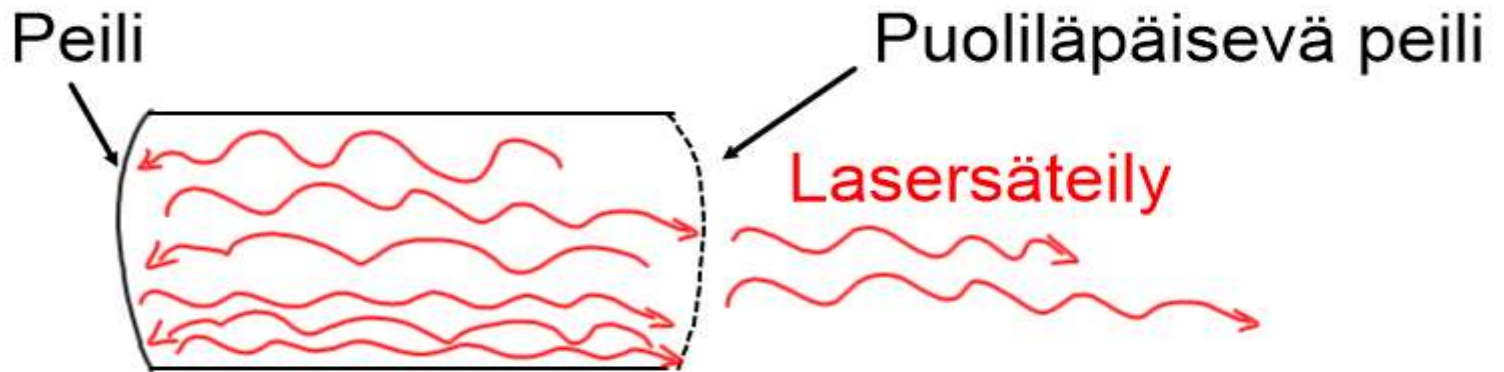


STIMULOITU EMISSIO

- "sopivan kokoinen" fotonin voi purkaa viritystilaa:



Resonaattorin rakenne:



Laserin lähettämä sähkömagneettinen aalto on

- monokromaattista (vain yksi aallonpituus)
- koherenttia (aaltorintamien vaihe-ero on aina yhtä suuri)
- usein hyvin intensiivistä
- polarisoitua

7 Aineen rakenteen tutkiminen

Menetelmiä:

- **MIKROSKOPIA** on menetelmä, joka antaa kohteesta suurennettun kuvan
- **SPEKTROSKOPIA** tarkoittaa sitä, että aine kertoo itse itsestään sähkö-magneettisen säteilyn SPEKTRIEN avulla
- **RÖNTGENDIFFRAKTIO** antaa tietoa aineen atomien elektroniverhon rakenteesta ja kiinteän aineen kiderakenteesta
- **SIRONTA** merkitsee hiukkasten suunnanmuutosta, se mahdollistaa ytimien ja alkeishiukkasten tutkimisen

Mikroskopiat

OPTINEN MIKROSKOOPPI

- suurennussuhde on parhaimmillaan noin 1000
- erotuskyky valon aallonpituudesta johtuen on noin $1 \mu\text{m}$
- yhden mikrometrin läpimittainen objekti näkyy silloin mikroskoopin kuvassa noin yhden millimetrin läpimittaisena

ATOMIVOIMAMIKROSKOOPPI

Video

- **A**tomic **F**orce **M**icroscope = **AFM**
- tutkitaan pinnan värähtelyjä ohuen neulan avulla
- tutkittavaa näytettä ei tarvitse viedä tyhjiöön, joten...
- ... voidaan tutkia hyvin monenlaisia näytteitä (myös sellaisia, joissa on vettä)

TUNNELONTIMIKROSKOOPPI

Video

- **S**canning **T**unneling **M**icroscope = **STM**
- tutkitaan pinnan elektronitiheyttä hyvin terävän neulan avulla
- voidaan parhaimmillaan erottaa jopa yksittäisiä atomeja
- Fysiikan Nobel-palkinto vuonna 1986

Röntgensäteilyn käyttö aineen tutkimisessa

Energia-alue: 1 keV E 100 keV

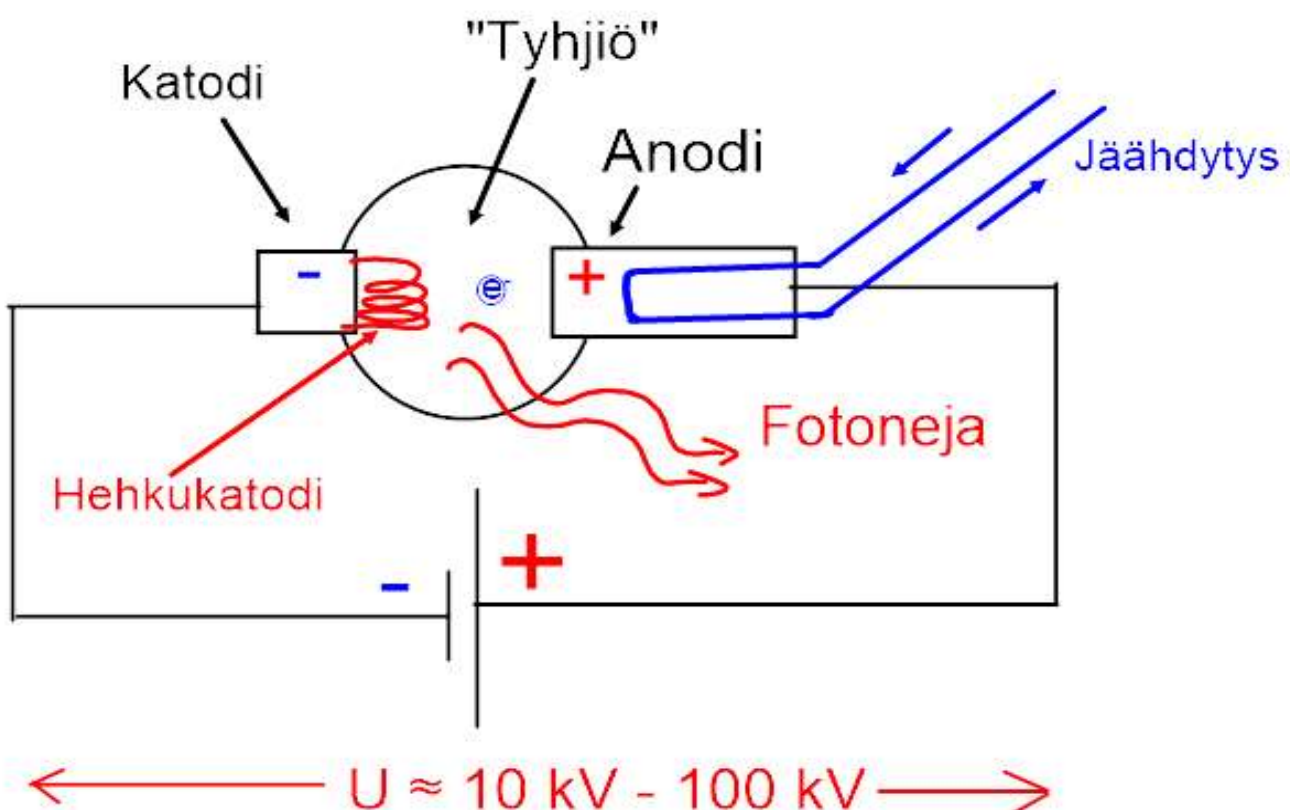
Aallonpituudet: 10 pm $\leq \lambda \leq$ 1 nm

Röntgensäteily voi olla $\leq \leq$

- luonnollista (elektronisiirtymiä raskaiden atomien sisäkuorilla, "epäjatkuvaa")
- keinotekoisista (hidastuvien elektronien jarrutussäteily, "jatkuvaa")

Röntgenputken rakenne:

[Video](#)



Säteilyn synnyn fysikaalinen perusta:

Anodiin törmäävät elektronit ovat
HIDASTUVASSA LIIKKEESSÄ.

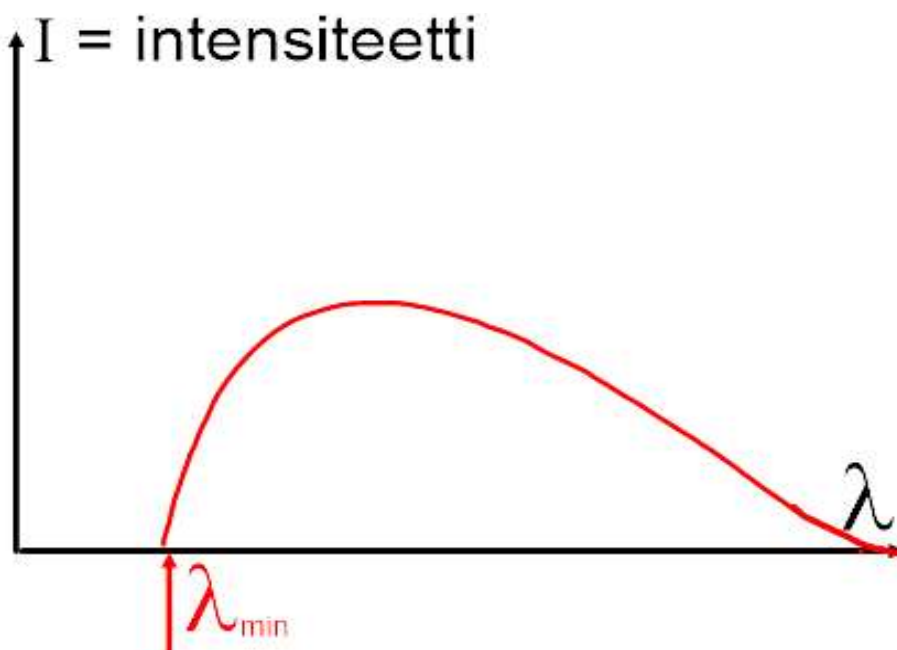
Fotonien energia:

Yhden elektronin kiihdytystyö muuttuu
(parhaimmillaan) yhden fotonin energiaksi:

$$eU = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = hf_{\max}$$

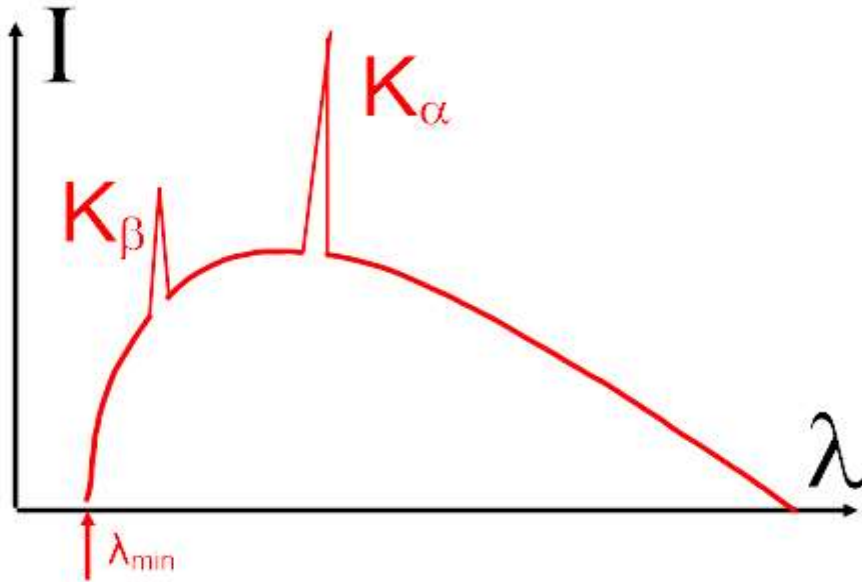
Valtaosa elektronien liike-
energiasta muuttuu
lämmöksi.

Tällaisella JARRUTUSSÄTEILYLLÄ on
JATKUVA SPEKTRI, joka alkaa tietystä
minimiaallopituudesta λ_{\min} .



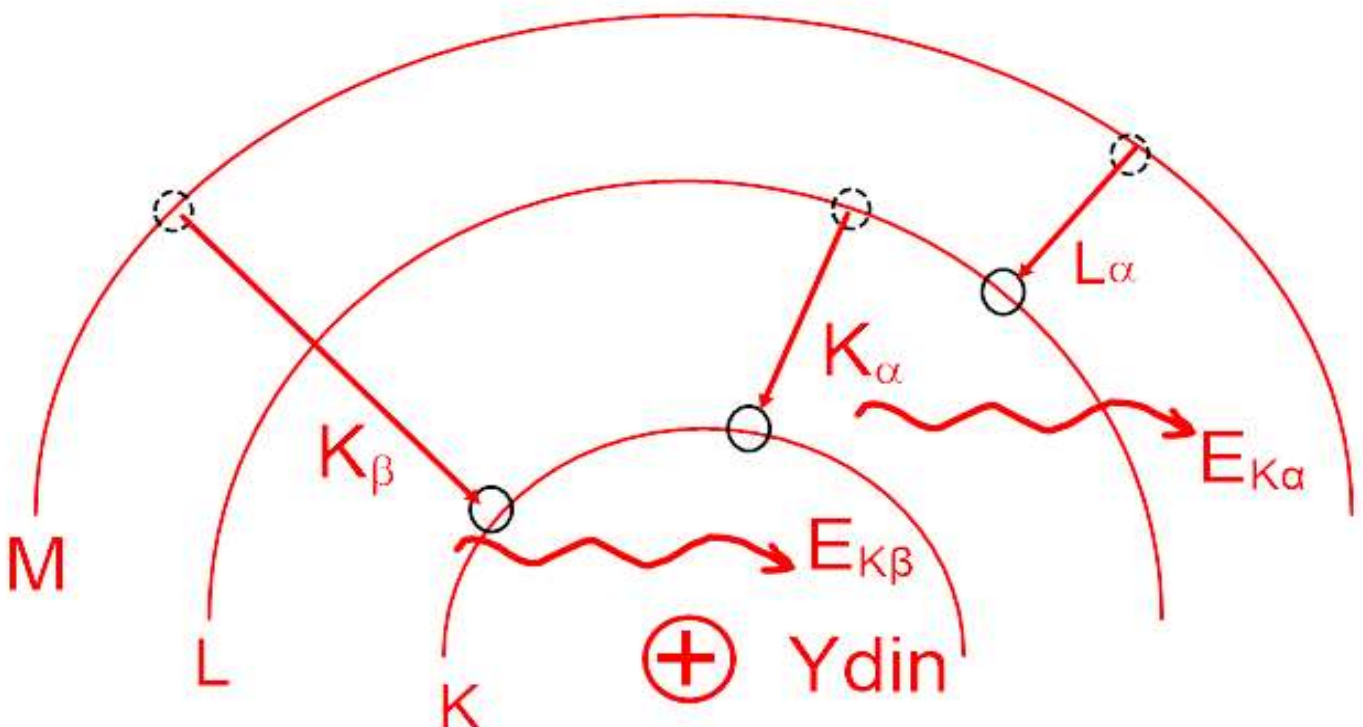
Jatkuva spektri
= derivoituva käyrä

Röntgensäteilyn spektrissä voi olla myös piikkejä, jotka johtuvat OMINAIS-SÄTEILYSTÄ eli KARAKTERISTISESTA RÖNTGENSÄTEILYSTÄ:



Ominaisäteily on peräisin anodiaineesta.

Ominaisäteily on peräisin anodiaineen atomien elektronisista virityksistä:



Aineen tunnistaminen röntgensäteilyllä

- ominaissäteilyyn liittyvät siirtymät ovat kullekin alkuaineella tyypillisiä, joten niitä voidaan käyttää alkuaineiden tunnistamiseen
- tunnistamiseen käytetään yleensä K_{α} - ja K_{β} -siirtymiä, koska niiden intensiteetti on suurin

Lähde: http://ramontxrf.260mb.net/Periodic_Table_and_X-ray_Energies.pdf?i=1

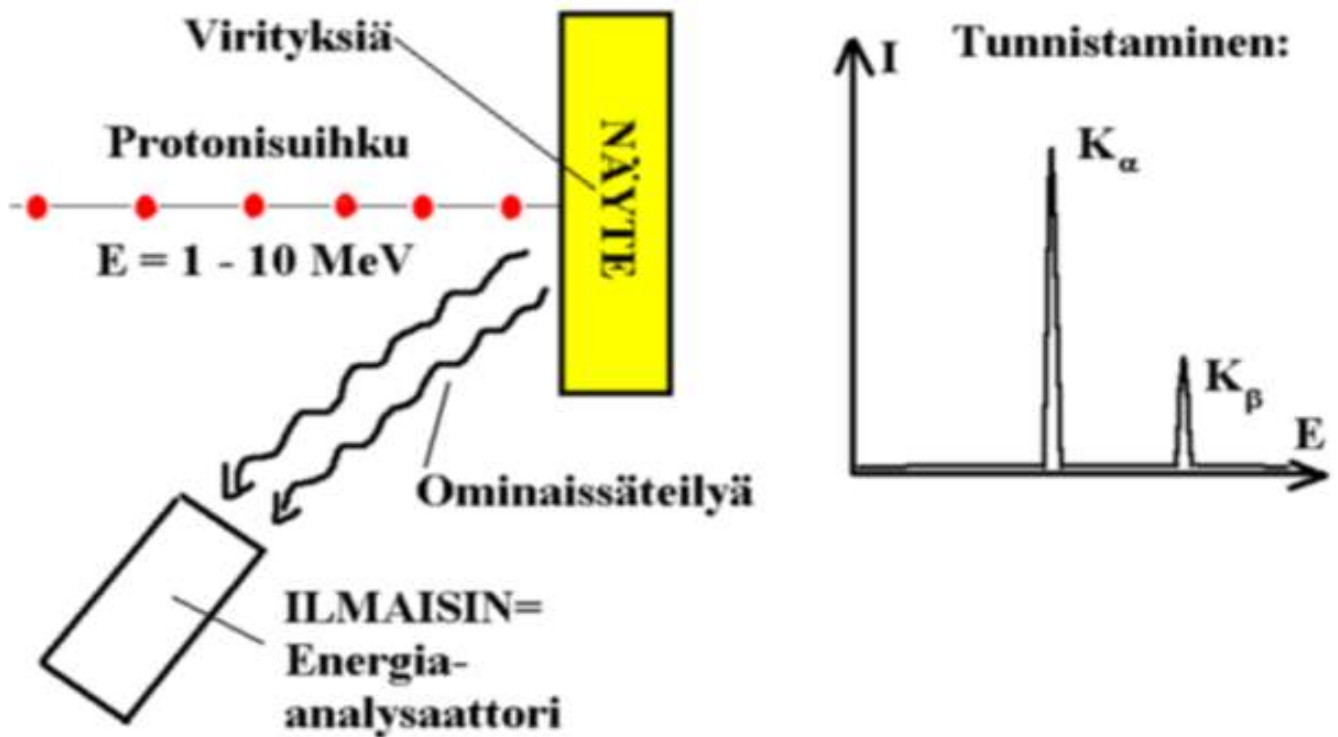
Periodic Table of Elements and X-ray Energies

www.bruker.com/hxrf

1 H 1.01 0.0007 Hydrogen	2 He 4.00 0.0002 Helium																																																																																																			
3 Li 6.94 0.53 Lithium	4 Be 9.01 1.85 Beryllium K α 0.108	5 B 10.81 2.34 Boron K α 0.183	6 C 12.01 2.27 Carbon K α 0.277	7 N 14.01 0.001 Nitrogen K α 0.392	8 O 16.00 0.001 Oxygen K α 0.525	9 F 19.00 0.001 Fluorine K α 0.677	10 Ne 20.18 0.0009 Neon K α 0.849	11 Na 22.99 0.97 Sodium K α 1.040	12 Mg 24.31 1.74 Magnesium K α 1.254	13 Al 26.98 2.70 Aluminium K α 1.486	14 Si 28.09 2.33 Silicon K α 1.740	15 P 30.97 1.82 Phosphorus K α 2.010	16 S 32.07 2.07 Sulfur K α 2.309	17 Cl 35.45 0.003 Chlorine K α 2.622	18 Ar 39.95 0.002 Argon K α 2.958	19 K 39.10 0.86 Potassium K α 3.314	20 Ca 40.08 1.54 Calcium K α 3.692 L α 0.341	21 Sc 44.96 2.99 Scandium K α 4.093 L α 0.395	22 Ti 47.87 4.54 Titanium K α 4.512 L α 0.452	23 V 50.94 6.11 Vanadium K α 4.953 L α 0.510	24 Cr 52.00 7.15 Chromium K α 5.415 L α 0.572	25 Mn 54.94 7.44 Manganese K α 5.900 L α 0.637	26 Fe 55.85 7.87 Iron K α 6.405 L α 0.705	27 Co 58.93 8.86 Cobalt K α 6.931 L α 0.775	28 Ni 58.69 8.91 Nickel K α 7.480 L α 0.849	29 Cu 63.55 8.93 Copper K α 8.046 L α 0.928	30 Zn 65.38 7.13 Zinc K α 8.637 L α 1.012	31 Ga 69.72 5.91 Gallium K α 9.251 L α 1.098	32 Ge 72.64 5.32 Germanium K α 9.886 L α 1.188	33 As 74.92 5.78 Arsenic K α 10.543 L α 1.282	34 Se 78.96 4.81 Selenium K α 11.224 L α 1.379	35 Br 79.90 3.12 Bromine K α 11.924 L α 1.481	36 Kr 83.80 0.004 Krypton K α 12.648 L α 1.585	37 Rb 85.47 1.53 Rubidium K α 13.396 L α 1.692	38 Sr 87.62 2.64 Strontium K α 14.165 L α 1.806	39 Y 88.91 4.47 Yttrium K α 14.958 L α 1.924	40 Zr 91.22 6.51 Zirconium K α 15.775 L α 2.044	41 Nb 92.91 8.57 Niobium K α 16.615 L α 2.169	42 Mo 95.94 10.22 Molybdenum K α 17.480 L α 2.292	43 Tc (98) 11.50 Technetium	44 Ru 101.07 12.37 Ruthenium K α 18.367 L α 2.423	45 Rh 102.91 12.41 Rhodium K α 19.279 L α 2.558	46 Pd 106.42 12.02 Palladium K α 21.177 L α 2.838	47 Ag 107.87 10.50 Silver K α 22.163 L α 2.983	48 Cd 112.41 8.69 Cadmium K α 23.173 L α 3.133	49 In 114.82 7.31 Indium K α 24.210 L α 3.286	50 Sn 118.71 7.29 Tin K α 25.271 L α 3.444	51 Sb 121.76 6.69 Antimony K α 26.359 L α 3.604	52 Te 127.60 6.23 Tellurium K α 27.473 L α 3.768	53 I 126.90 4.93 Iodine K α 28.612 L α 3.938	54 Xe 131.29 0.006 Xenon K α 29.775 L α 4.110	55 Cs 132.91 1.87 Cesium K α 30.973 L α 4.285	56 Ba 137.33 3.59 Barium K α 32.194 L α 4.466	57 La 138.91 6.15 Lanthanum K α 33.442 L α 4.647	58 Ce 140.12 6.77 Cerium L α 4.839 M α 0.884	59 Pr 140.91 6.77 Praseodymium L α 5.035 M α 0.927	60 Nd 144.24 7.01 Neodymium L α 5.228 M α 0.979	61 Pm (145) 7.26 Promethium L α 5.432 M α 1.023	62 Sm 150.36 7.52 Samarium L α 5.633 M α 1.078	63 Eu 151.96 5.24 Europium L α 5.849 M α 1.131	64 Gd 157.25 7.90 Gadolinium L α 6.053 M α 1.181	65 Tb 158.93 8.23 Terbium L α 6.273 M α 1.240	66 Dy 162.50 8.55 Dysprosium L α 6.498 M α 1.293	67 Ho 164.93 8.80 Holmium L α 6.720 M α 1.348	68 Er 167.26 9.07 Erbium L α 6.949 M α 1.404	69 Tm 168.93 9.32 Thulium L α 7.180 M α 1.462	70 Yb 173.04 6.97 Ytterbium L α 7.416 M α 1.526	71 Lu 174.47 9.84 Lutetium L α 7.655 M α 1.580	72 Hf 178.49 13.31 Hafnium L α 7.899 M α 1.646	73 Ta 180.95 16.65 Tantalum L α 8.146 M α 1.712	74 W 183.84 19.25 Tungsten L α 8.398 M α 1.775	75 Re 186.21 21.02 Rhenium L α 8.652 M α 1.843	76 Os 190.23 22.61 Osmium L α 8.911 M α 1.907	77 Ir 192.22 22.65 Iridium L α 9.175 M α 1.980	78 Pt 195.08 21.46 Platinum L α 9.442 M α 2.050	79 Au 196.97 19.28 Gold L α 9.713 M α 2.123	80 Hg 200.59 13.53 Mercury L α 9.989 M α 2.195	81 Tl 204.37 11.85 Thallium L α 10.269 M α 2.271	82 Pb 207.20 11.34 Lead L α 10.551 M α 2.342	83 Bi 208.98 9.81 Bismuth L α 10.839 M α 2.423	84 Po (209) 9.32 Polonium L α 11.131 M α 2.499	85 At (210) 7.00 Astatine L α 11.427 M α 2.577	86 Rn (222) 0.01 Radon L α 11.727 M α 2.654	87 Fr (223) 1.87 Francium L α 12.031 M α 2.732	88 Ra (226) 5.50 Radium L α 12.339 M α 2.806	89 Ac (227) 10.07 Actinium L α 12.652 M α 2.900	90 Th 232.04 11.72 Thorium L α 12.968 M α 2.996	91 Pa 231.04 15.37 Protactinium L α 13.291 M α 3.082	92 U 238.03 18.95 Uranium L α 13.614 M α 3.171	93 Np (237) 18.95 Neptunium L α 13.946 M α 3.250	94 Pu (244) 19.84 Plutonium L α 14.282 M α 3.339	95 Am (243) 15.69 Americium L α 14.620 M α 3.438	96 Cm (247) 14.79 Curium L α 15.1 M α 3.51	97 Bk (247) 14.79 Berkelium	98 Cf (251) 15.1 Californium	99 Es (252) 13.5 Einsteinium	100 Fm (257) 9.81 Fermium	101 Md (258) 9.32 Mendelevium	102 No (259) 7.00 Nobelium	103 Lr (262) 10.3 Lawrencium

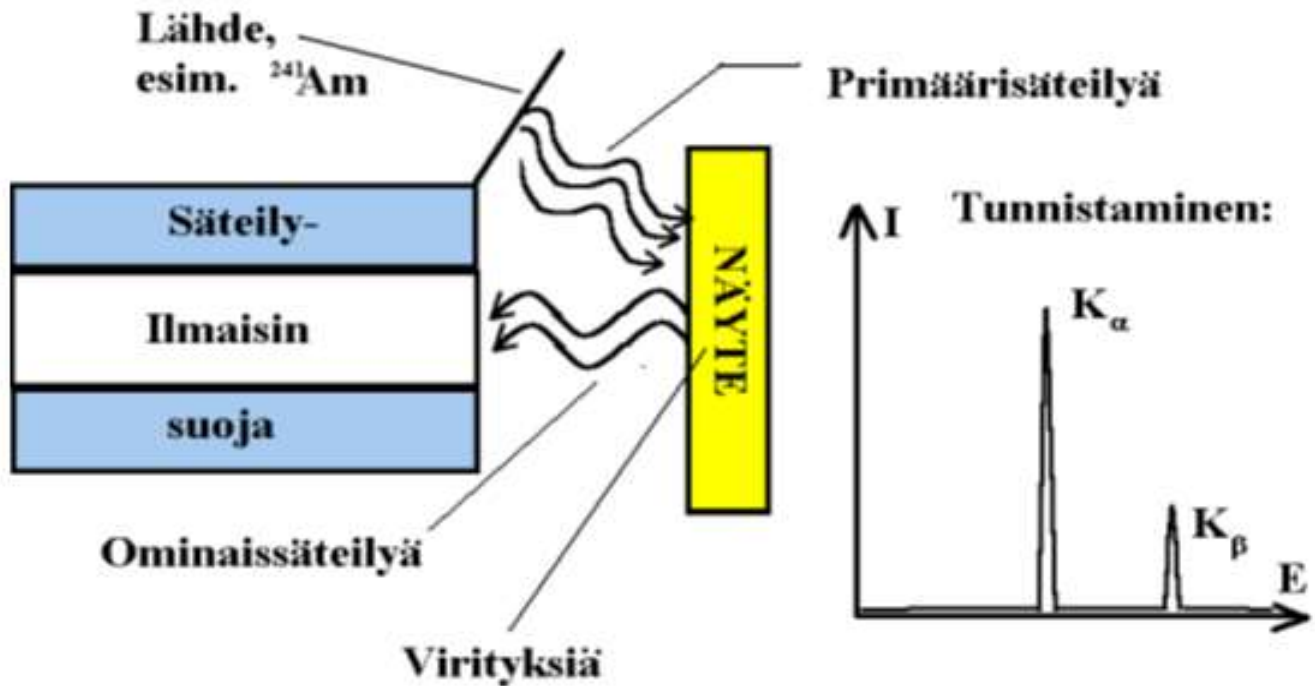
Atomic number
35 79.90
Br 3.12
Atomic weight
Density (g/cm³)
Symbol
Element name
Energy (keV)
Spectral line

PIXE= Particle Induced X-ray Emission



- kohtioatomien virittämiseen käytetään matalaenergistä protonisuihkua
- nopea menetelmä
- näyte ei vahingoitu eikä aktivoidu
- alkuaineiden tunnistaminen perustuu ominaisäteilyn piikkien tunnistamiseen
- menetelmää käytettäessä tarvitaan hiukkaskiihdytin

Röntgenfluoresenssi



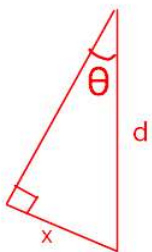
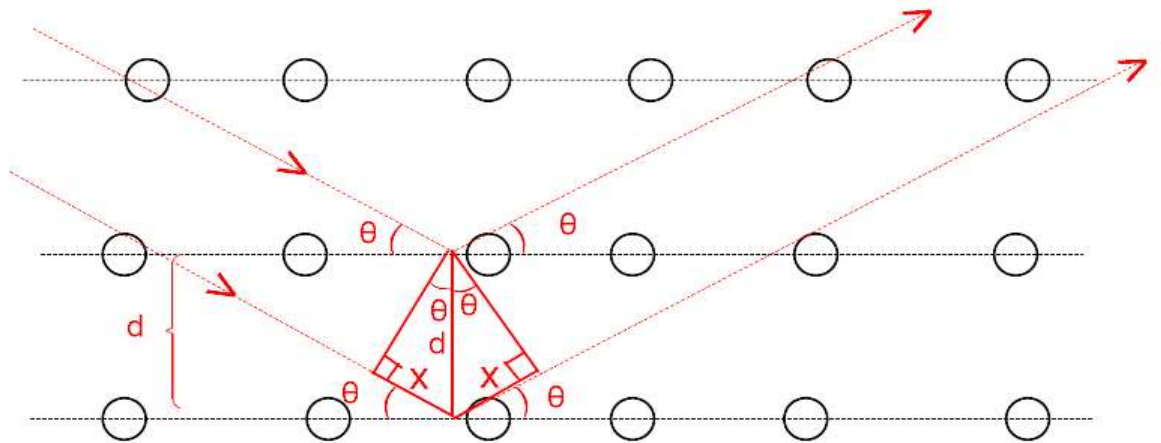
- kohtioatomien virittämiseen käytetään radioaktiivista lähdettä, joka emittoi yleensä hyvin matalaenergistä gammasäteilyä
- nopea menetelmä
- näyte ei vahingoitu eikä aktivoitu
- alkuaineiden tunnistaminen perustuu ominaisäteilyn piikkien tunnistamiseen
- menetelmää käytettäessä tarvitaan melko intensiivinen röntgen- tai gammasäteilyn lähde, mikä voi olla säteilysuojelullinen ongelma

Röntgendiffraktio

[Katso animaatio](#)

Lähtökohta: Röntgensäteilyn aallonpituus on ”hyvä mittakeppi” eli se on samaa suuruus-luokkaa kuin atomien etäisyydet kiinteässä aineessa (noin 10^{-10} m).

Braggin laki



$$\sin\theta = \frac{x}{d} \quad x = d\sin\theta$$

Vahvistavan interferenssin ehto:

Säteiden matkaero on aallonpituuden monikerta, ts. $2x = n\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Toisaalta $x = d\sin\theta$

Yhdistämällä nämä ehdot saadaan Braggin laki

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

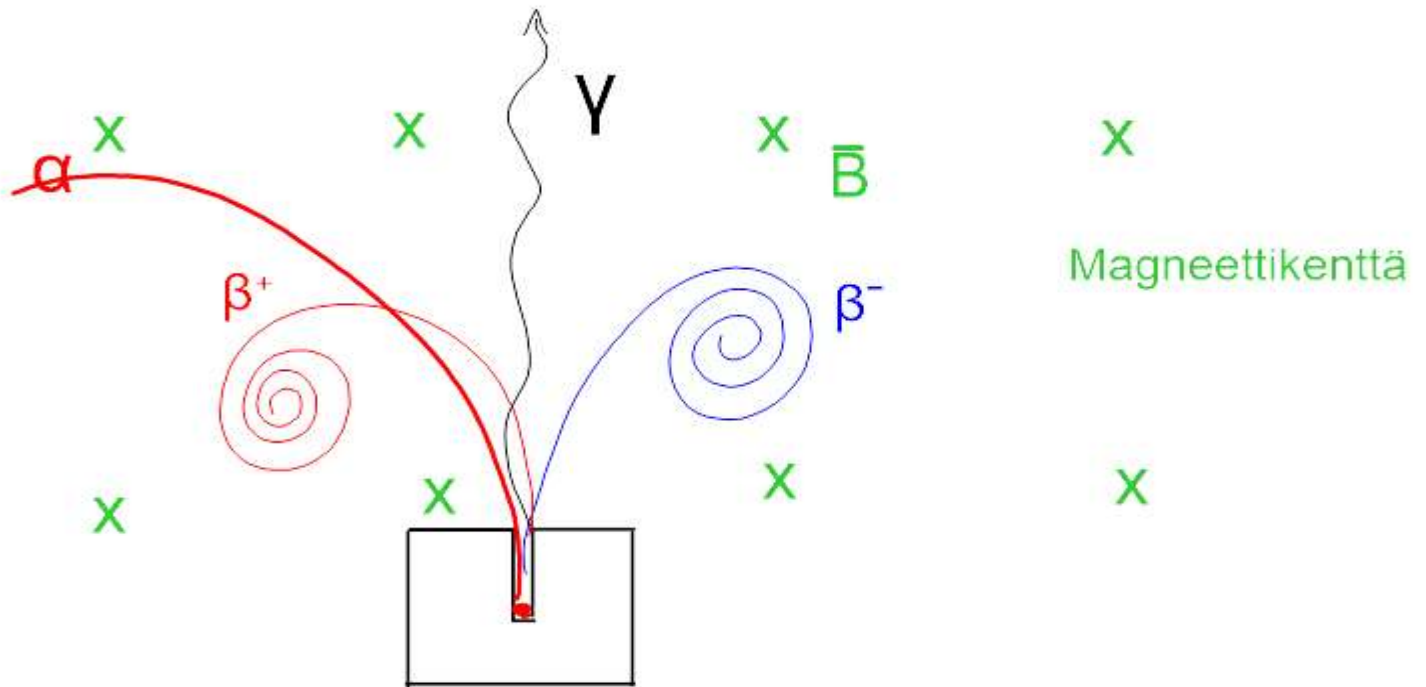
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

8 Radioaktiivisen aineen ydin lähettää säteilyä

Video (alfa, beeta ja gamma)

Luokittelu:

Geigerlaskuri havaitsee säteilyä



Tulkinnat:

α : Raskas hiukkanen, positiivinen varaus

β^- : Kevyt hiukkanen, negatiivinen varaus

β^+ : Kevyt hiukkanen, positiivinen varaus

γ : Ei ole varattu hiukkanen

Radioaktiivisuuden lajit

Tutki taulukkokirjan isotooppiluettelo (s. 104) ja koeta etsiä vastaukset seuraaviin ongelmiin:

1. Mitä yhteistä on niillä alkuaineilla, joilla on paljon stabiileja tai hyvin pitkäikäisiä isotooppeja?
2. Millainen nuklidi on tyypillisesti α -aktiivinen?
3. Mitä yhteistä on sellaisilla nuklideilla, jotka ovat β^- -aktiivisia?
4. Millaiset nuklidit ovat β^+ -aktiivisia?
5. Millaiset nuklidit hajoavat elektronisieppausmekanismilla (EC)?
6. Mitä yhteistä on niillä nuklideilla, jotka hajoavat joko β^+ -aktiivisuuden kautta tai elektronisieppauksella?

Ratkaisuja:

1. Jos järjestysluku on parillinen, kyseisellä alkuaineella on tavallista runsaammin pysyviä isotooppeja.
2. Alfa-aktiiviset nuklidit ovat RASKAITA, tyypillisesti massaluku $A > 200$.
3. Jos nuklidi on β^- -aktiivinen, se on kyseisen alkuaineen raskaimpia isotooppeja. Tällaisessa nuklidissa on kokoonsa nähden LIKAA neutroneja.
4. Keveiden alkuaineiden keveimmät isotoopit ovat yleensä β^+ -aktiivisia.
5. Elektronisieppaus on tyypillinen raskaiden alkuaineiden keveimmille isotoopeille.
6. Molemmat radioaktiivisuuden muodot esiintyvät kyseisten alkuaineiden keveimmissä isotoopeissa, ts. kyseisissä nuklideissa on kokoonsa nähden LIIAN VÄHÄN neutroneja tai liikaa sähkövarausta.

MAAGISET LUVUT vaikuttavat ytimen vakauteen, ts. jos järjestysluku tai neutroniluku on jokin luvuista

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 tai 184

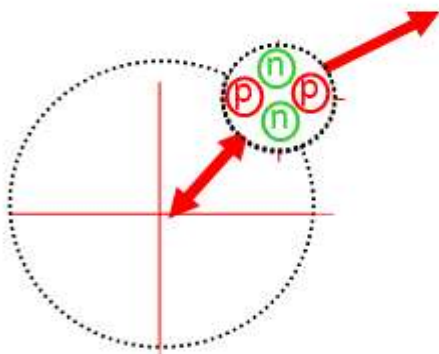
kyseinen nuklidi on tavallista vakaampi.

Alfasäteily

Alfa-aktiiviset nuklidit ovat yleensä melko raskaita ($Z > 80$, $A > 200$)

Mekanismi:

[Video alfahajoamisesta](#)



- ytimeen voi syntyä kahden protonin ja kahden neutronin rakenne eli α -hiukkanen
- α -hiukkanen vaelttaa muiden nukleonien joukossa kuten itsenäinen ydin
- tällä rakenteella on tietty todennäköisyys poistua ytimestä (voimas repulsio reunalla)

Alkuaine X muuttuu alkuaineeksi Y:



Kyseessä on ydinreaktio, jossa säilyvät mm.

- kokonaisenergia
- liikemäärä
- pyörimismäärä
- nukleonien lukumäärä (= massalukujen summa)
- sähkövaraus (= järjestyslukujen summa)

9 Hajoamisenergia ydinreaktioissa

Alfa- ja beetahajoamisessa vapautuva reaktioenergia riippuu ytimen massavajeen Δm suuruudesta:

$$Q = \Delta mc^2.$$

Käytännön laskutapa:

Jos 1u muutetaan energiaksi, siihen liittyvä energian muutos on

$$\begin{aligned} E &= 1u \cdot c^2 = 149,24191 \cdot 10^{-12} \text{ J} \\ &= 931,49432 \text{ MeV} \end{aligned}$$

(MAOL s. 69)

ESIMERKKI

Ydinreaktiossa havaitaan massan muutos $\Delta m = 0,0025 \text{ u}$.

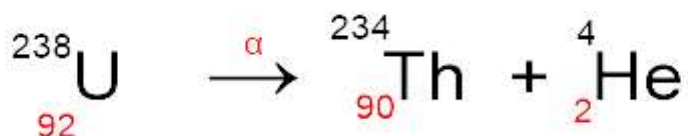
Vastaava energian muutos on

$$Q = 0,0025 \cancel{\text{u}} \cdot 931,49 \frac{\text{MeV}}{\cancel{\text{u}}} \approx \underline{2,3287 \text{ MeV}}$$

ESIMERKKI 1 s. 96

Uraanin (${}_{92}^{238}\text{U}$) α -hajoaminen

Reaktioyhtälö:



Reaktion massavaje:

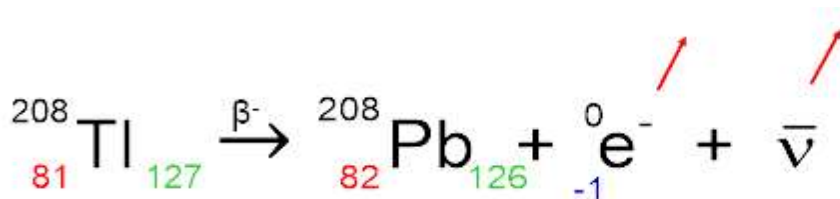
$$\begin{aligned}\Delta m &= \underbrace{m\left({}_{92}^{238}\text{U}\right) - 92m_e}_{\text{U-ydin}} - \underbrace{\left\{m\left({}_{90}^{234}\text{Th}\right) - 90m_e\right\}}_{\text{Th-ydin}} - \underbrace{\left\{m\left({}_2^4\text{He}\right) - 2m_e\right\}}_{\text{He-ydin}} \\ &= \underbrace{m\left({}_{92}^{238}\text{U}\right) - m\left({}_{90}^{234}\text{Th}\right) - m\left({}_2^4\text{He}\right)}_{\text{Löytyvät taulukkokirjasta}} = \dots \\ &\approx 0,0045877\text{u}\end{aligned}$$

Massavaje voidaan tässä tapauksessa laskea isotooppien massojen avulla eli elektronien massat kumoutuvat.

Energia beetahajoamisessa

ESIMERKKI 2 s. 98

Talliumin isotooppi ${}^{208}\text{Tl}$ on β^- -aktiivinen.
Reaktioyhtälö:



Reaktion massavaje:

$$\begin{aligned}\Delta m &= \underbrace{m({}_{81}^{208}\text{Tl}) - 81m_e}_{\text{Tl-ydin}} - \{ \underbrace{m({}_{82}^{208}\text{Pb}) - 82m_e}_{\text{Pb-ydin}} + \underbrace{m_e}_{-81m_e} \} \\ &= m({}_{81}^{208}\text{Tl}) - \cancel{81m_e} - m({}_{82}^{208}\text{Pb}) + \cancel{81m_e} \\ &= m({}_{81}^{208}\text{Tl}) - m({}_{82}^{208}\text{Pb}) = \dots \approx 0,005361\text{u}\end{aligned}$$

Elektronien massat eliminoituvat!

ESIMERKKI 3 s. 99

${}^{39}\text{Ca}$ -ydin on β^+ -aktiivinen. Reaktioyhtälö:



Pitäisi olla Ca-39, 0,00581384 u ja 5,509 MeV

Reaktion massavaje:

$$\begin{aligned}\Delta m &= m\left({}_{20}^{39}\text{Ca}\right) - 20m_e - \left\{m\left({}_{19}^{39}\text{K}\right) - 19m_e + m_e\right\} \\ &= m\left({}_{20}^{39}\text{Ca}\right) - 20m_e - \left\{m\left({}_{19}^{39}\text{K}\right) - 18m_e\right\} \\ &= m\left({}_{20}^{39}\text{Ca}\right) - m\left({}_{19}^{39}\text{K}\right) - 2m_e \approx \dots \\ &\approx 0,00591384\text{u} \text{ eli } Q \approx 5,509 \text{ MeV}\end{aligned}$$

Elektronien massat eivät häviä!

ESIMERKKI 4 s. 100

a) ${}^{57}\text{Co}$ hajoaa elektronisieppauksella.
Reaktioyhtälö:



Pitäisi olla Co-57, 0,000898 u ja 0,836 MeV

$$\Delta m = m(\underbrace{{}^{39}_{20}\text{Ca}}_{\text{Ca-ydin}}) - 20m_e - \{m(\underbrace{{}^{39}_{19}\text{K}}_{\text{K-ydin}}) - 19m_e + m_e\}$$

b) Reaktion mas

$$= m({}^{39}_{20}\text{Ca}) - 20m_e - \{m({}^{39}_{19}\text{K}) - 18m_e\}$$

$$= m({}^{39}_{20}\text{Ca}) - m({}^{39}_{19}\text{K}) - 2m_e \approx \dots$$

$$\Delta m = m(\underbrace{{}^{57}_{27}\text{Co}}_{\text{Co-ydin}}) - 2$$

$$\approx 0,00591384u \text{ eli } Q \approx 5,509 \text{ MeV}$$

$n_e\}$

$$= m({}^{57}_{27}\text{Co}) - 20m_e - m({}^{57}_{26}\text{Fe}) + 20m_e$$

$$= m({}^{57}_{27}\text{Co}) - m({}^{57}_{26}\text{Fe}) = \dots$$

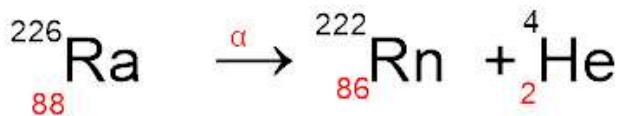
$$\approx 0,000898u \text{ eli } Q \approx 0,836 \text{ MeV}$$

Elektronien massat eliminoituvat!

ESIMERKKI 1 s. 86

Radiumin (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) α -hajoaminen

Reaktioyhtälö:

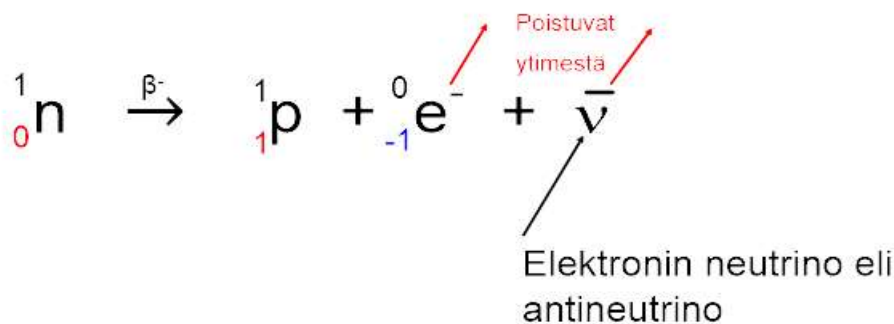


Reaktiotuote ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ on myös alfa-aktiivinen. Näin syntyy rakennusten radon-ongelma.

Beetahajoaminen liittyy ytimen protonien ja neutronien epätasapainoon.

β^- -hajoaminen

Lähtökohta: Ytimessä on kokoonsa nähden LIIKAA neutroneja. Seuraus: Neutroni muuntuu protoniksi:



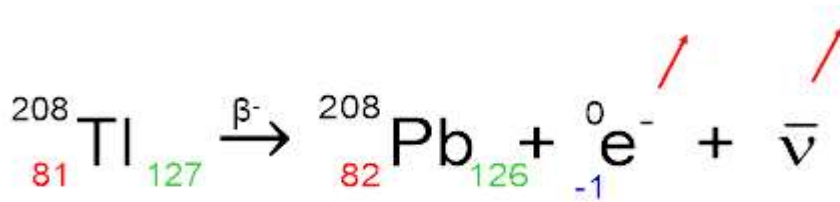
Elektroni (e^-) ja antineutrino ($\bar{\nu}$) poistuvat ytimestä. Tuoteydin on eri alkuainetta:



ESIMERKKI 2 s. 88

Talliumin isotooppi ^{208}Tl on β^- -aktiivinen.

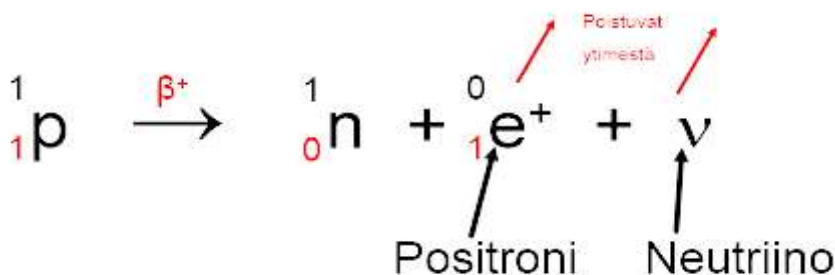
Reaktioyhtälö:



β^+ -hajoaminen

Lähtökohta: Ytimessä on neutroneja liian vähän tai LIKAA VARAUSTA.

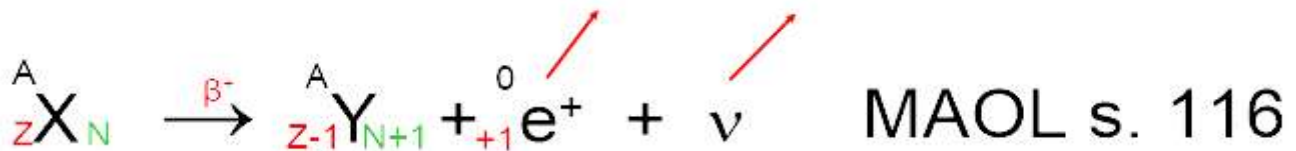
Seuraus: Protoni muuntuu neutroniksi:



MAOL s. 116

Positroni (e^+) ja neutriino (ν) poistuvat ytimestä.

Tuoteydin on jälleen eri alkuainetta:



ESIMERKKI 3 s. 89

${}^{39}\text{Ca}$ -ydin on β^+ -aktiivinen.

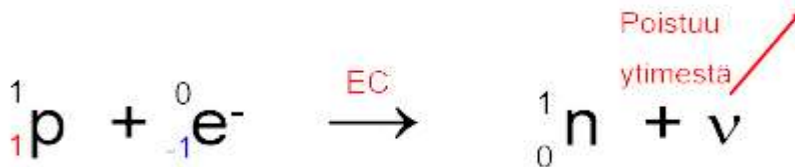
Reaktioyhtälö:



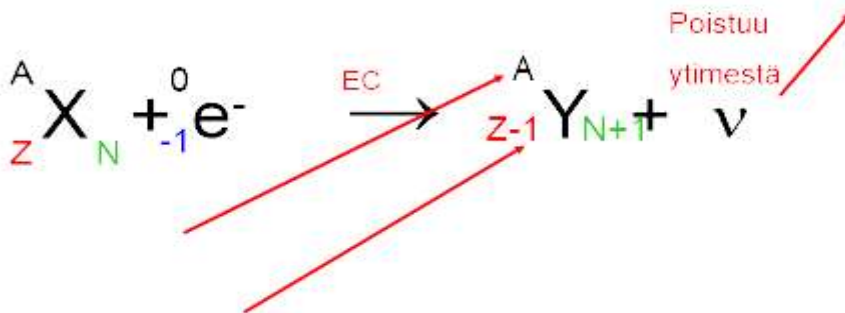
Elektronisieppaus **EC = Electron Capture**

Lähtökohta: RASKAASSA ytimessä on ytimen kokoon nähden liikaa varausta (tai neutroneja liian vähän).

Seuraus: Ytimen protoni reagoi "oman" K-elektronin kanssa:



Tuoteytimen järjestysluku PIENENEE yhdellä:



Elektronisieppaus johtaa samaan lopputulokseen kuin β^+ -hajoaminen, mutta se on yleensä energeettisesti edullisempi.

ESIMERKKI 5 s. 90

^{57}Co hajoaa elektronisieppauksella.

Reaktioyhtälö:



10 Radioaktiivisen atomin ydin hajoaa satunnaisesti

Aktiivisuus

$$\text{Aktiivisuus} = \frac{\text{Hajonneiden ytimien lukumäärä}}{\text{Käytetty aika}}$$

Jos N = radioaktiivisten ytimien luku-määrä, niin keskimääräinen aktiivisuus

$$A_k = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|$$

Keskimääräinen aktiivisuus

Hetkellinen aktiivisuus:

$$A(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \text{eli} \quad \boxed{A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right|}$$

Aktiivisuuden yksikkö: $[A] = 1/s$
 $= 1\text{Bq}$ (becquerel)

$1 \text{ Ci} = 1 \text{ curie} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$.

Radioaktiivinen hajoaminen noudattaa eksponenttilakia:

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}$$

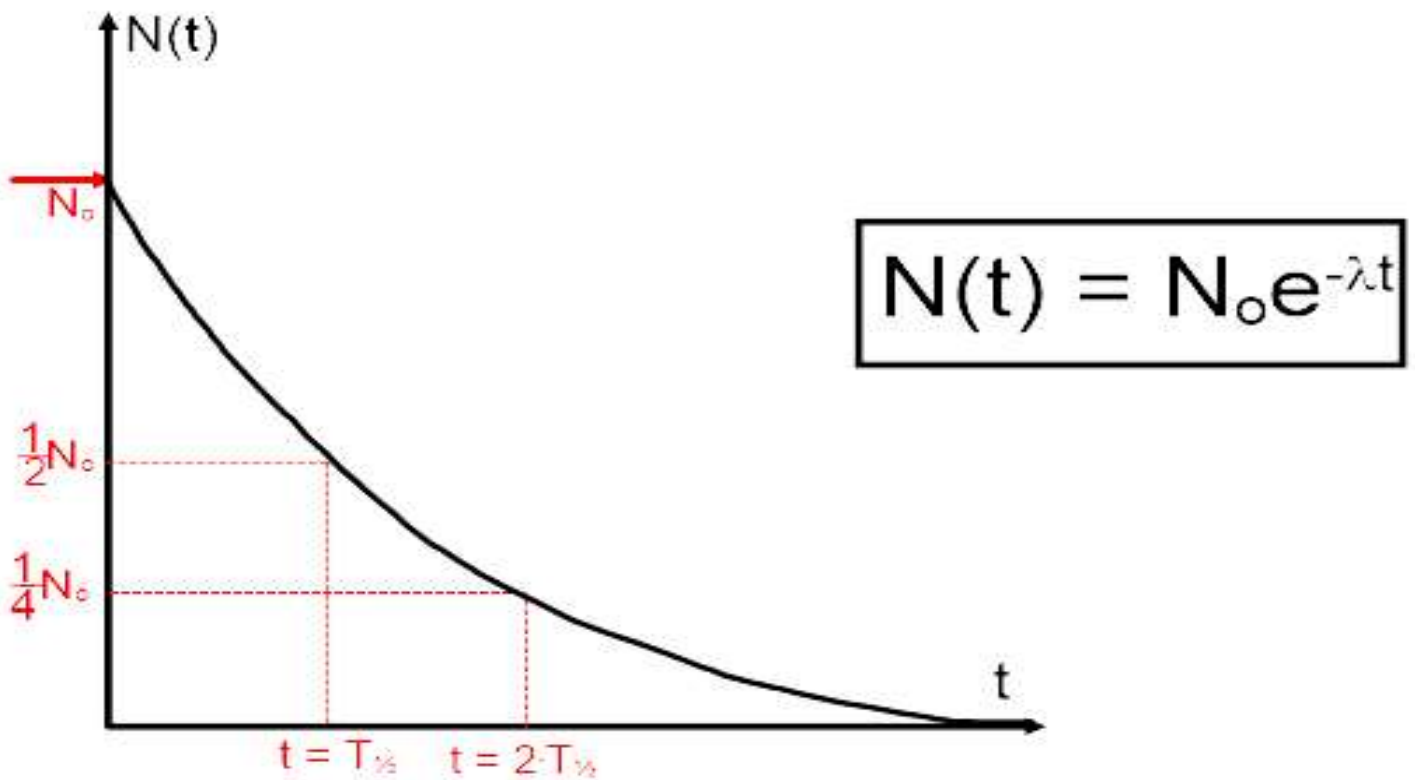
$N(t)$ = ytimien lukumäärä ajanhetkellä t

$N_0 = N(t = 0)$,

t = aika,

λ = hajoamisvakio, $[\lambda] = 1/s$

Animaatio hajoamislaista



Hajoamisvakion ja puoliintumisajan yhteys:

Kun $t = T_{1/2}$, niin $N = \frac{1}{2}N_0$.

Hajoamislaki: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, ts.

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad | :N_0$$

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2} \quad | \ln() \quad \text{eli } -\lambda T_{1/2} \underbrace{\ln e}_1 = \underbrace{\ln 1}_0 - \ln 2$$

$$-\lambda T_{1/2} = -\ln 2 \quad \text{eli} \quad \boxed{\lambda T_{1/2} = \ln 2}$$

Jos $N = N_0 e^{-\lambda t}$, niin aktiivisuus

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \left| N_0 e^{-\lambda t} \cdot (-\lambda) \right|$$
$$= \left| -\lambda \underbrace{N_0 e^{-\lambda t}}_{N(t)} \right| = \lambda N(t)$$

Siis $A(t) = \lambda N(t)$ MAOL s. 135

Lisäksi $A(t) = \left| -\lambda N_0 e^{-\lambda t} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$

$A_0 = A(t = 0)$

= alkuperäinen aktiivisuus

Myös aktiivisuus pienenee eksponentiaalisesti.

Siis $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ $[A] = 1/s = 1\text{Bq}$ (becquerel)

Jos tiedetään aineen massa m , niin ainemäärä

$$n = \frac{m}{M} \quad M = \text{moolimassa, } [M] = 1 \text{ g/mol ja}$$

ytimien eli atomien lukumäärä on

$$N_o = nN_A = \frac{mN_A}{M}$$

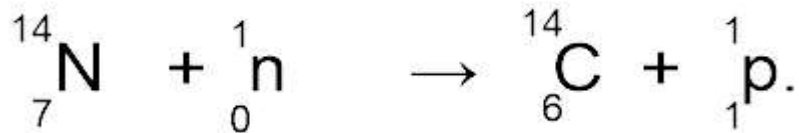
$N_A = \text{Avogadron vakio}$
 $6,022 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol.}$

Radiohiiliajoitus

Elävissä kasveissa ja eläimissä on pieni määrä radioaktiivista hiilen isotooppia .

¹⁴C
Kun eliö kuolee eli aineenvaihdunnan kautta ei tule uutta radioaktiivista hiilen isotooppia, kuolleen eliön kudosten ¹⁴C-pitoisuus alkaa laskea. Radiohiilen määrän suhteellisesta muutoksesta voidaan päätellä hiilipitoisen ¹⁴C₆ fossiilin ikä.

Radiohiili syntyy ilmakehän typpiatomien reagoiessa kosmisen säteilyn neutronien kanssa:



Radioaktiivinen hiili hapettuu hiilidioksidiksi ja päätyy yhteyttävien kasvien kautta luonnon kiertokulkuun.

11 Ionisoiva säteily ja ihminen

IONISOIVA SÄTEILY voi olla

- alfasäteilyä (heliumatomien ytimiä)
- beetasäteilyä (elektroneja tai niiden antihhiukkasia eli positroneja)
- gammasäteilyä (sähkömagneettista eli valon kaltaista säteilyä, joka syntyy atomien ytimissä)
- röntgensäteilyä (syntyy atomien elektroni-verhossa tai on aiheutettu keinotekoisesti)

Ionisoiva säteily IONISOI nimensä mukaisesti eli tekee neutraaleista atomeista ioneja. Samalla se pystyy pilkkomaan molekyyliä.

Biologiselta kannalta erityisen haitallista on DNA-molekyylien rikkoutuminen, jolloin elävien solujen toiminta häiriintyy.

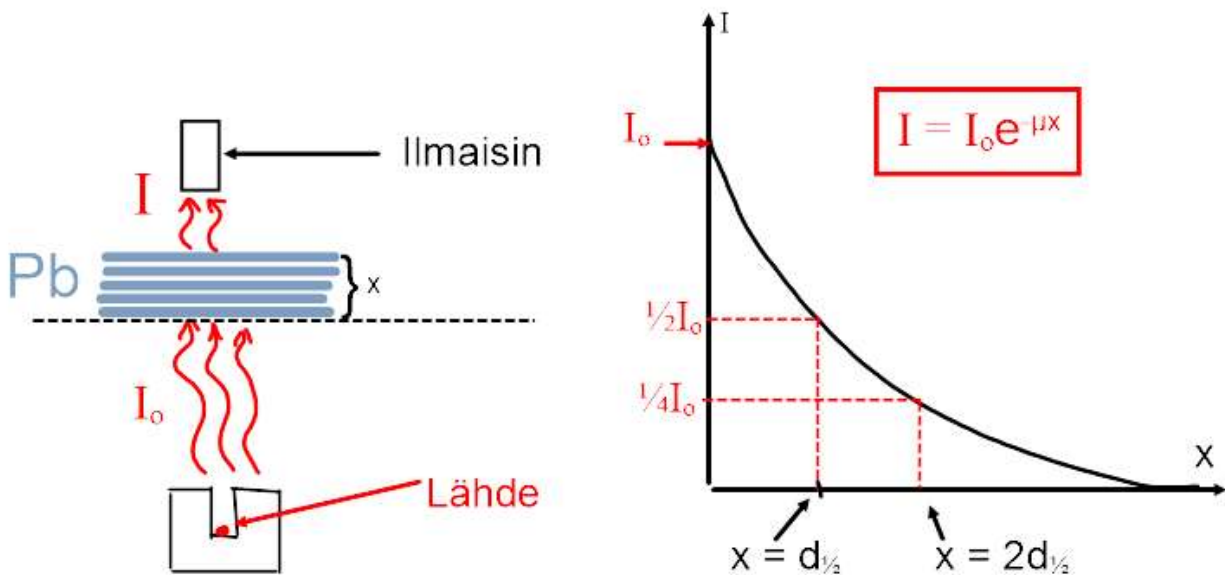
RADIOAKTIIVISTA SÄTEILYÄ on

- alfasäteily
- beetasäteily
- gammasäteily ja
- neutronisäteily

Radioaktiivinen säteily on peräisin atomien YTIMISTÄ. Neutronisäteily ei ionisoi, koska neutronilla ei ole sähkövarausta, mutta se voi aiheuttaa uusia ydinreaktioita, kun neutroni törmää ytimeen.

Gammasäteilyn heikkeneminen

Gammasäteilyä esiintyy hyvin usein α - ja β -säteilyn yhteydessä.



Vaimeneminen noudattaa eksponenttilakia

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Heikkennyslaki, MAOL s. 134

μ = gammasäteilyn matkavaimennuskerroin, $[\mu] = 1/m$

Puoliintumispaksuus: Kun $x = d_{1/2}$, niin $I = \frac{1}{2}I_0$.

Heikennyslaki:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{eli} \quad \frac{1}{2} I_0 = \cancel{I_0} e^{-\mu d_{1/2}} \quad | : I_0 \quad \text{eli} \quad e^{-\mu d_{1/2}} = \frac{1}{2} \quad | \ln()$$

$$-\mu d_{1/2} \ln e = \underbrace{\ln 1}_1 - \underbrace{\ln 2}_0$$

$$-\mu d_{1/2} = -\ln 2$$

eli

$$\boxed{\mu d_{1/2} = \ln 2}$$

Ionisoiva säteilyn määrän mittaaminen

Tunnuslukuja:

Absorboitunut annos

- kuvaa energian absorboitumista kudokseen massayksikköä kohti:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

$$[D] = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy (gray)}$$

Ekvivalenttiannos

- kuvaa ionisoivan säteilyn biologisia haittavaikutuksia
- painottaa kunkin säteilylajin absorboitunutta annosta D_i kyseisen säteilyn laatukertoimella w_i

$$H = \sum_i w_i D_i$$

- $[H] = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Sv}$ (sievert)
- ks. MAOL s. 103 (laatukertoimia on merkitty Q-kirjaimella: $H = QD$)

Efektiivinen annos

- pyrkii kuvaamaan ionisoivan säteilyn terveyshaittoja
- kunkin kudoksen saamaa ekvivalenttiannosta painotetaan kudskohtaisella painotuskertoimella:

$$E = \sum_i w_i H_i$$

- $[E] = 1 \text{ Sv}$ (sievert)

Annosnopeus

- kuvaa aikayksikössä (tunnissa) kertynyttä ekvivalenttiannosta
- annosnopeuden yksikkö on 1 Sv/h
- luonnon taustasäteilyn annosnopeus Suomessa on tyypillisesti
(0,10 – 0,30) μ Sv/h

Mistä eri annokset tulevat tai mitä ne aiheuttavat?

Lähde:

<https://www.stuk.fi/aiheet/sateilyvaara/esimerkkeja-sateilyannoksista>

Tapahtuma	Annos (mSv)	Seuraus
Hammaskuvaus	0,01	-
Keuhkokuvaus	0,15	-
Lentäjän työ	2,00	Annostarkkailu
Väestön vuosiannos	3,20	-
Onnettomuus	1000,00	Säteily sairaus
Paha onnettomuus	6000,00	Säteily sairaus, kuolema

12 Säteilyä hyödynnetään terveydenhuollossa

Tarkastelun kohteet:

- röntgenkuvaus
- tietokonetomografia
- magneettikuvaus (MRI)
- sädehoito
- isotooppilääketiede

Röntgenkuvaus

Video

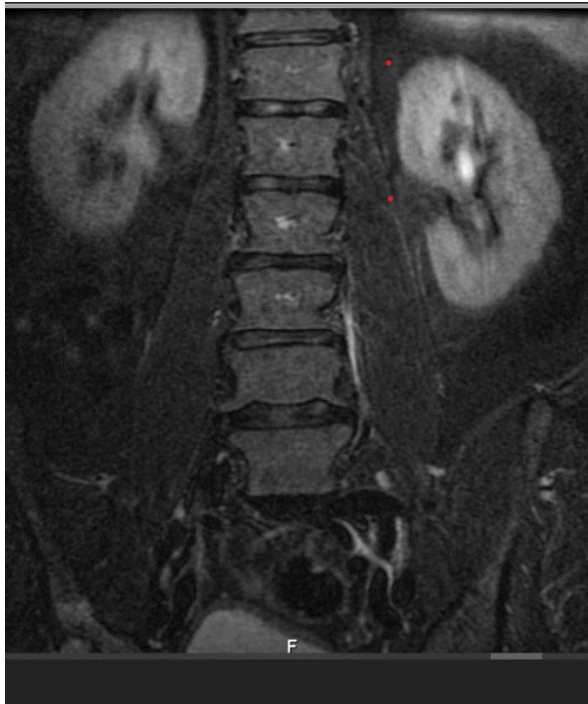
- kudoksen läpi mennyt säteily tallennetaan kameralle
- erilaiset kudokset absorboivat säteilyä eri tavalla
- luukudos absorboi röntgensäteilyä eniten
- muita kudostyyppejä on vaikea erottaa keskenään
- röntgensäteily on ionisoivaa säteilyä, ja nykyään kuvia otetaan terveydenhoidossa hyvin harkitusti

- eri suunnista otetut röntgenkuvat yhdistetään tietokoneiden avulla
- lopputuloksena saadaan kolmiulotteinen kuva elimistöstä
- tällä tavalla tehdään muun muassa hammaslääkärien käyttämä panoramaröntgenkuvaus

Magneettikuvaus

- menetelmä tunnetaan myös nimellä **Magnetic Resonance Imaging (MRI)**
- idea: voimakkaassa magneettikentässä ($B = 4 \text{ T}$) solukon vetyatomit vuorovaikuttavat korkeataajuisen sähkökentän kanssa
- vuorovaikutus riippuu vetyatomien tiheydestä ja kemiallisesta ympäristöstä
- MRI:n avulla saadaan eroteltua erilaiset pehmytkudostyypit (lihakset, sidekudokset, rasvakudos, veri)

- voimakas magneettikenttä voidaan tehdä vain suprajohdetekniikalla, minkä vuoksi magneettikuvaus on aika kallis menetelmä



Starring:
E. Kautto

Sädehoito

- käytetään yleensä syöpäsolukon tuhoamiseen
- syöpäsolut jakaantuvat nopeasti ja kestävät huonosti ionisoivaa säteilyä
- ongelmana on kuitenkin aina säteilyn kohdistaminen syöpäsolukkoon ja terveiden solujen suojeleminen
- sädehoidossa voidaan käyttää röntgensäteilyä, gammasäteilyä ja hiukkassäteilyä

Isotooppilääketiede

- tiedetään, että tietyt alkuaineet kerääntyvät tiettyihin kudoksiin
- jos elimistöön injektoidaan jonkun alkuaineen radioaktiivista isotooppia, se saadaan kerääntymään tiettyyn kudokseen
- hajotessaan kyseinen isotooppi antaa lähettämänsä säteilyn avulla tietoa kyseisen kudoksen aineenvaihdunnasta

- Elimistöön verenkierron kautta injektoitavien aineiden tulee olla kliinisesti puhtaita ja myös radiologisessa mielessä puhtaita eli niissä ei saa olla vieraita isotooppeja
- jos isotoopin puoliintumisaika on hyvin lyhyt, esimerkiksi vain muutamia tunteja, saavutetaan verraten suuri aktiivisuus pienellä ($A = \lambda N$) nuklidimäärällä, jolloin potilaan saama annos jää pieneksi
- silloin kyseinen isotooppi täytyy valmistaa sairaalassa tai hyvin lähellä sairaalaa

- usein lääketieteessä käytettävät aineet ovat keveitä beeta(+)-aktiivisia aineita, kuten ^{18}F , ^{15}O , ^{13}N ja ^{11}C
- tällaiset nuklidit on helppo tunnistaa, koska positronin ja elektronin annihilaatiossa vapautuu aina kaksi gammafotonia, joten ilmiö ja fotonien energia ($E = 511 \text{ keV}$) on helppo havaita
- lisäksi kyseiset aineet on helppo valmistaa sairaalakäyttöön suunnitellulla syklotronilla
- Positroniaktiiviset aineet ovat myös hyvin käyttökelpoisia ns. PET-kameran sovelluksissa

Tyypillisiä lääketieteessä käytettäviä radionuklideja, puoliintumisaikoja ja valmistusreaktioita

Isotooppi	$T_{1/2}$	Valmistusreaktio
^{18}F	1,87 h	$^{18}_8\text{O} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + ^1_0\text{n}$
^{15}O	2,03 min	$^{14}_7\text{N} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{15}_8\text{O} + ^1_0\text{n}$
^{13}N	9,96 min	$^{16}_8\text{O} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{13}_7\text{N} + ^4_2\text{He}$
^{11}C	20,38 min	$^{14}_7\text{N} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{11}_6\text{C} + ^4_2\text{He}$

PET-kameran periaate

13 Energia ydinreaktioissa

ESIMERKKI 1 Rutherfordin ydinreaktio

- Ensimmäinen merkittävä keinotekoinen ydinreaktio



ESIMERKKI 2 DT-fuusioreaktio

- Tavoiteltu fuusioreaktio, koska se tuottaa käytettyyn massaan nähden runsaasti energiaa.
- Deuteriumia saadaan vedestä, mutta mistähän saadaan tritiumia?



Animaatio fuusiosta

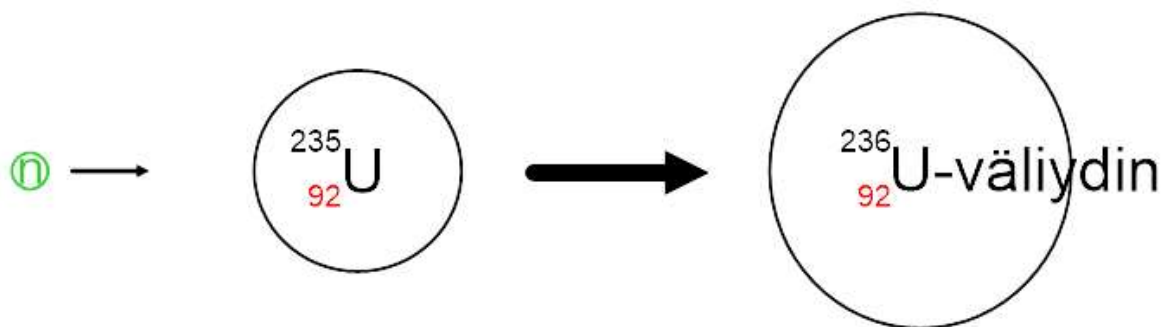
ESIMERKKI 4 Uraanin fissio

Animaatio

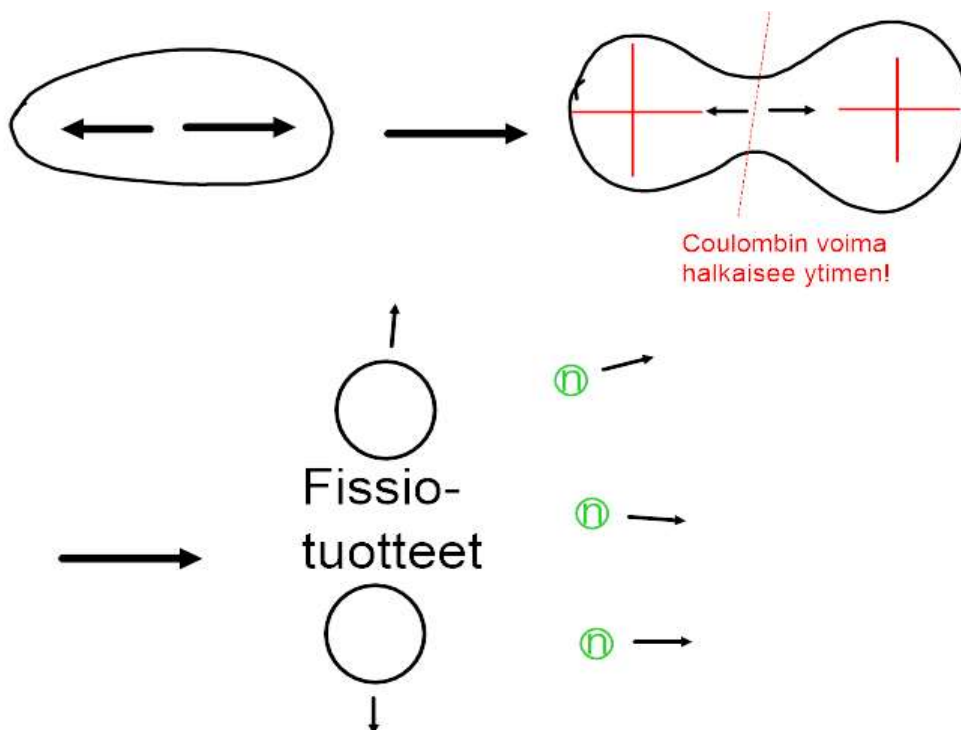
- Tällä hetkellä ydinenergiaa tuotetaan kaupallisesti fissiotekniikalla.

IDEA: Raskas ydin (esim. uraani) halkeaa hiukkaspommituksen avulla.

Uraanin fission mekanismi:



Kun väliydin muodostuu, vapautuu runsaasti sidosenergiaa. Ydin alkaa värähdellä ja lopulta se halkeaa:



Reaktiossa vapautuu neutroneja, jotka voivat aiheuttaa toisen uraaniytimen fission (ketjureaktio). Tyypillinen fission reaktioyhtälö:



Fission tuotteet ovat yleensä β -aktiivisia, koska niissä on kokoonsa nähden liikaa neutroneja.

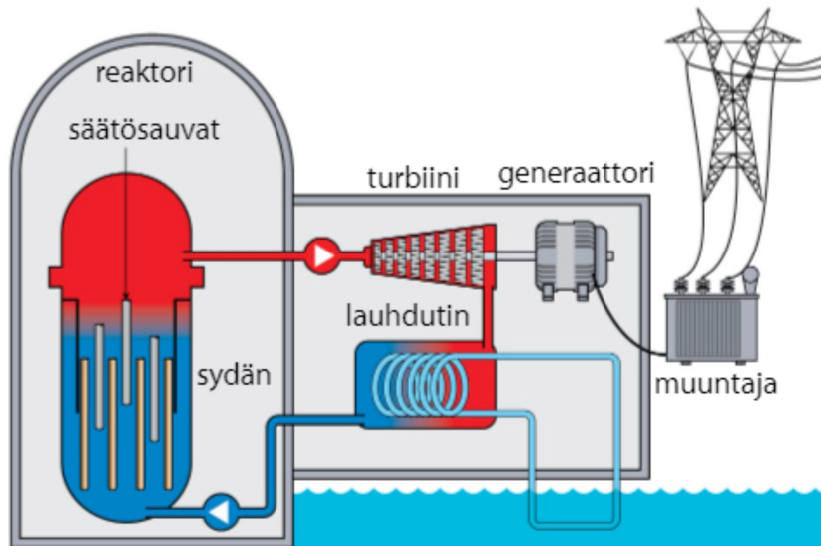
14 Ydinvoimalaitos tuottaa sähköä ja lämpöä

Fissiovoimalaitokset

Fissiovoimalat ovat joko kiehutusvesireaktoreita (BWR) tai painevesireaktoreita (PWR)

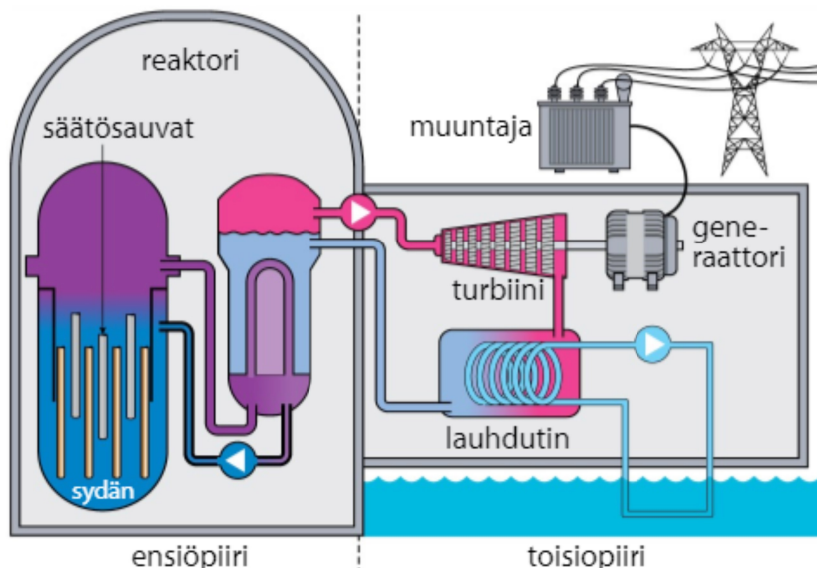
Kiehutusvesireaktori

- Rakenne on yksinkertaisempi, mutta sama vesi kiertää reaktorissa ja turbiinissa, joten turbiinisali aktivoituu.



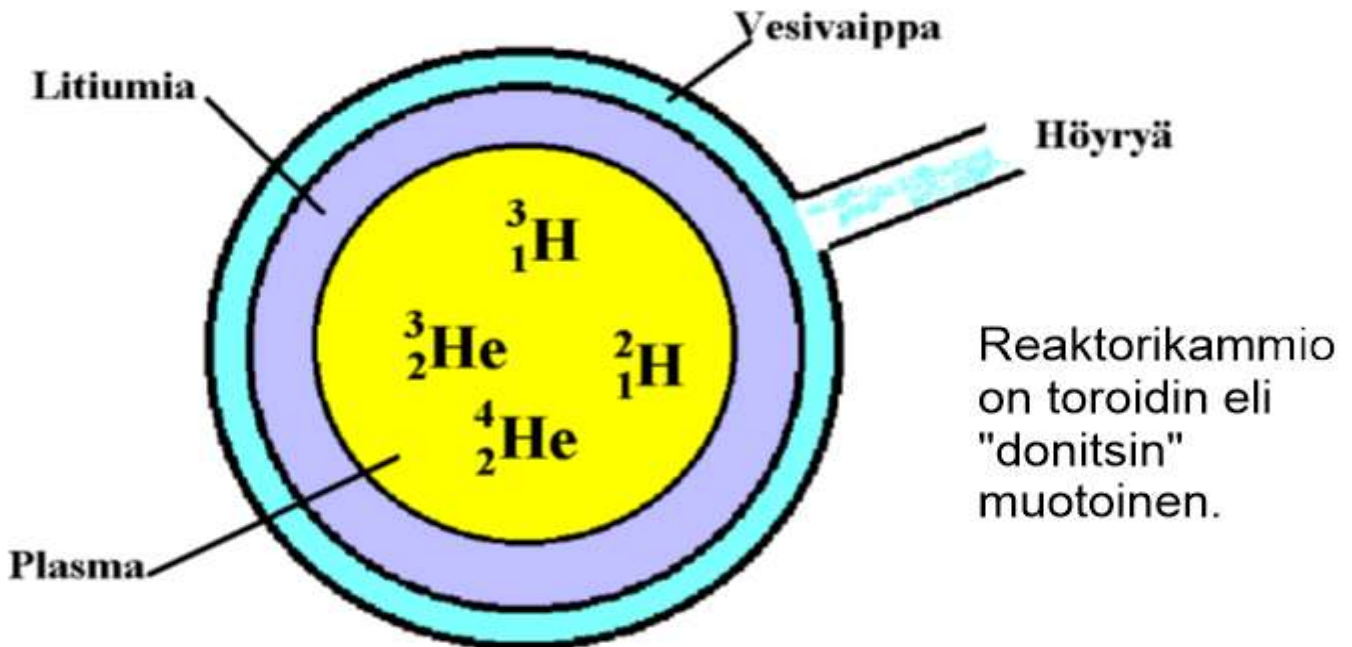
Painevesireaktori

- Reaktori ja lämmönvaihdin toimivat hyvin korkeassa paineessa, mikä on merkittävä riski; toisaalta turbiinisali ei aktivoituu.

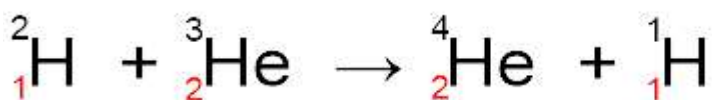
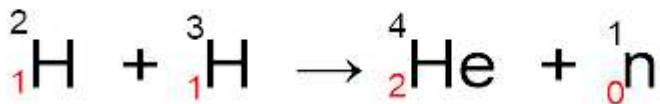
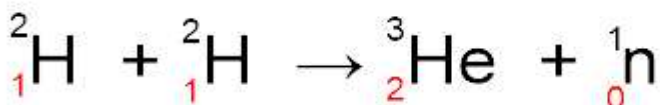
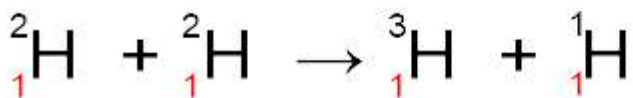


Fuusioreaktori

Fuusioreaktori näyttää kolmiulotteisesti toroidilta (= donitsi), reaktiokammion poikkileikkaus on ympyrä:



Plasmatilassa tapahtuvia reaktioita:



Heliumnuklidit jäävät plasmatilaan, mutta protonit ja neutronit sinkoutuvat litium-vaippaan.

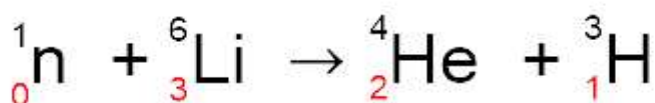
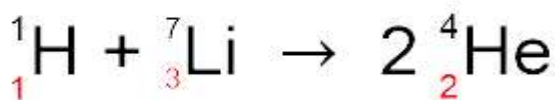
Reaktioenergia jakautuu toisaalta helium-ytimien ja toisaalta protonien tai neutronien liike-energiaksi.

Liikemäärän säilymlaki aiheuttaa sen, että valtaosa reaktioenergiasta menee protoneille ja neutroneille.

Ongelma: Miten otetaan talteen protonien ja neutronien liike-energia? Erityisesti neutronien pysäyttäminen on vaikeaa.

Ratkaisu:

Protonit ja neutronit luovuttavat liike-energiansa litiumvaippaan reagoidessaan litiumytimien kanssa. Luonnon litium sisältää sekä isotooppia ${}^6_3\text{Li}$ että isotooppia ${}^7_3\text{Li}$.



Oleellista: Neutronien reaktiot litiumin kanssa tuottavat tritiumia (${}^3_1\text{H}$), joka syötetään plasmatilaaan reagoimaan deuteriumin (${}^2_1\text{H}$) kanssa.

Litiumvaippa kuumenee protonien ja neutronien liike-energiasta ja ydinreaktioista. Lämmön avulla voidaan tuottaa höyryä. Höyry pyörittää turbiinia ja turbiini generaattoria.