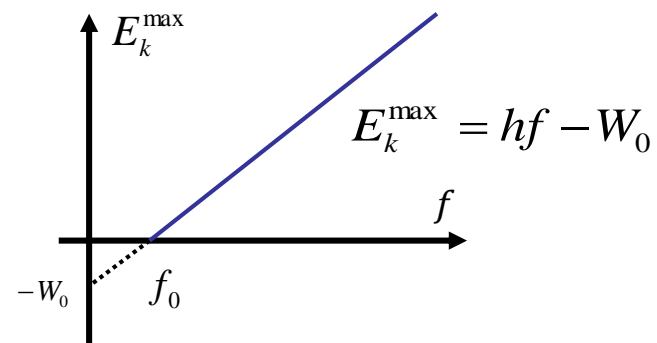
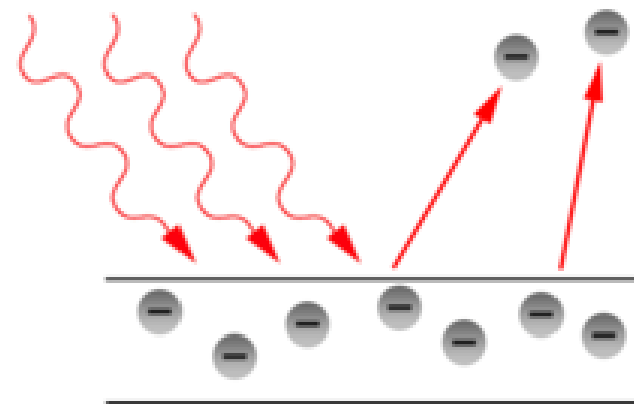


Valosähköinen ilmiö

- Tietyn taajuuden f_0 ylittävä sähkömagneettinen säteily (riittävän suurienergiset fotonit) pystyy irrottamaan elektroneja metallista
 - Säteilyn intensiteetti ei vaikuta
- Valosähköinen ilmiö on eräs todiste valon hiukkasluonteesta
 - Sovelluksia: valodiodi, aurinkopaneeli, valaistusmittari...
- Fotonin energia (hf) kuluu
 - Elektronin irrotustyöhön W_0
 - Elektronien kineettiseksi energiaksi E_k



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



Nopeimpien (helpoimmin irtoavien)
elektronien liike-energia

**Yo-tehtävä
K2002/15**

Valokennon elektrodia valaistiin monokromaattisella valolla (kuvio). Jännitelähteen avulla piiriin säädettiin sellainen vastajännite, että virran kulku juuri ja juuri lakkasi. Eri aallonpituuksilla saatiin seuraavat pysäytysjännitteiden arvot:

λ/nm	389	427	447	471	492	546
U/V	0,90	0,66	0,50	0,33	0,25	0,02

Määritä sopivaa graafista esitystä käyttäen Planckin vakio ja valosähköisen ilmiön kynnystaajuus (rajataajuus) elektrodimateriaalille.

Fotoelektronien suurin liike-energia on $E_k^{max} = hf - W_0$, jossa W_0 on katodimateriaalin irrotustyö.

Sähköinen voima tekee työn $W = -eU$ elektronien kulkiessa katodilta anodille, missä U anodin ja katodin välinen jännite.

Kun vastajännite on yhtä suuri kuin pysäytysjännite, sähkövirta ei kulje katodilta anodille. Tällöin pätee

$$eU = E_k^{max} = hf - W_0.$$

Planckin vakio on (f, eU) –kuvaajan fysikaalinen kulmakerroin, ja kynnystaajuus saadaan suoran ja f –akselin leikkauskohdasta.

Lasketaan taajuudet aallonpituuksista aaltoliikkeen perusyhtälöä käyttäen ($f = c/\lambda$) ja taulukoidaan arvot:

Aallonpituutta 389 nm vastaava taajuus: $f = \frac{2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{389 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 7,7067 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

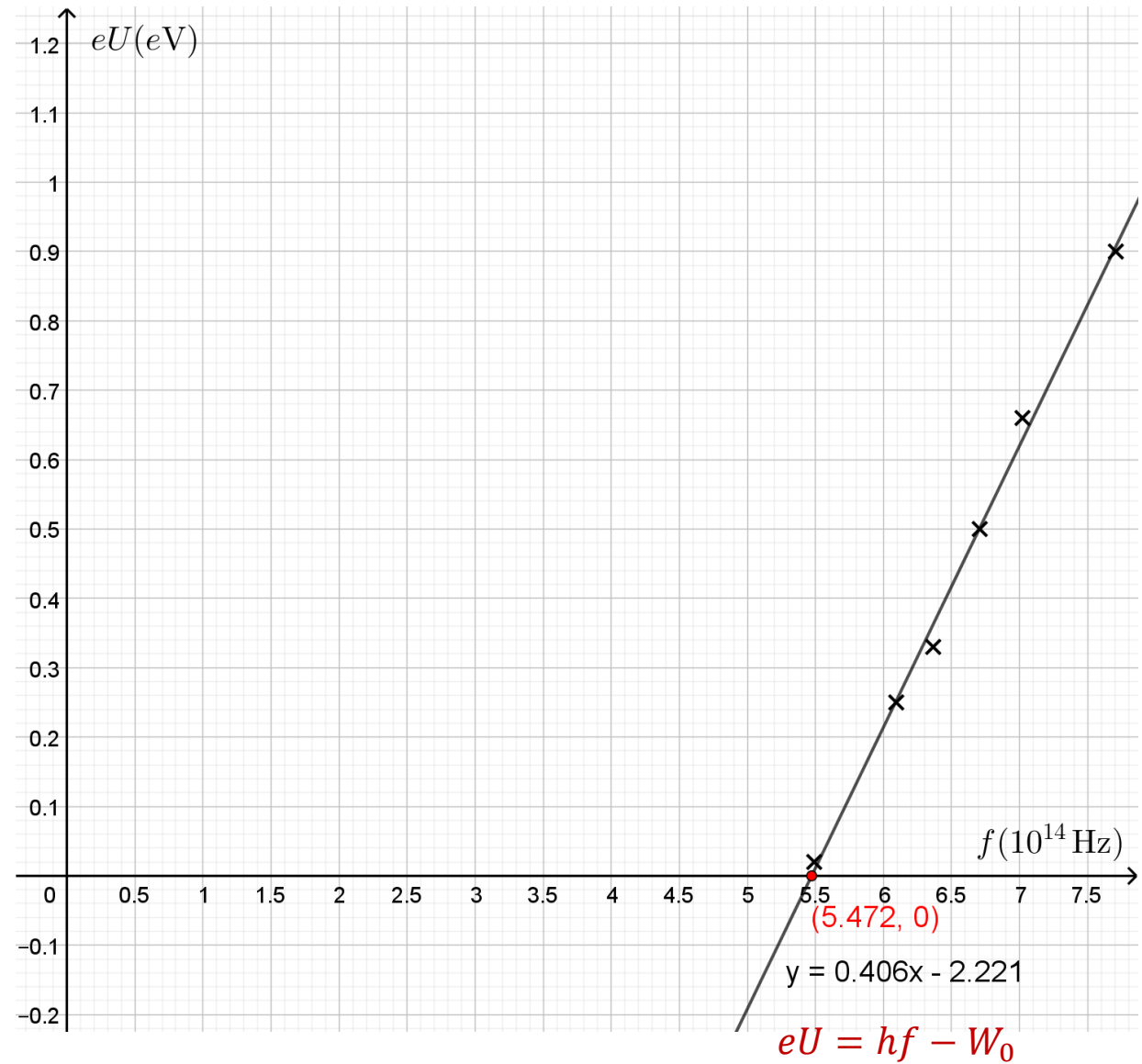
aallonpituus (nm)	taajuus (10^{14} Hz)	eU (eV)
389	7.707	0.9
427	7.021	0.66
447	6.707	0.5
471	6.365	0.33
492	6.093	0.25
546	5.491	0.02

Suoran kulmakerroin on Planckin vakio:

$$h \approx 0,406 \frac{eV}{10^{14} \text{ Hz}} \approx 4,1 \cdot 10^{-15} eVs$$

Kynnystaajuus on

$$f_0 \approx 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

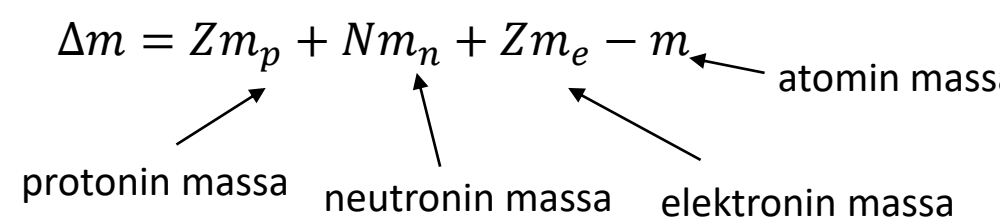


Sidosenergia ja massavaje

- Ytimeen sitoutuneena nukleoneilla on pienempi potentiaali-energia kuin vapaana
 - Vrt. gravitaation potentiaalienergia, kun jokin kappale (tai kappaleet) on maan pinnalla ja kun kappale ovat ilmassa
 - Potentiaalienergia peräisin vahvasta vuorovaikutuksesta
 - Tämä **vapautunut** energia vastaa energiamäärää, joka tarvitaan ytimen nukleonien erottamiseen toisistaan = ytimen *sidosenergia* E_B
- Ytimen muodostuessa vapautunut energiamäärä E_B ilmenee *massavajeena* Δm .
 - Ytimen massa on pienempi kuin nukleonien massa erillään.

$$\Delta m = \frac{E_B}{c^2}$$
$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m$$

protonin massa neutronin massa elektronin massa atomin massa

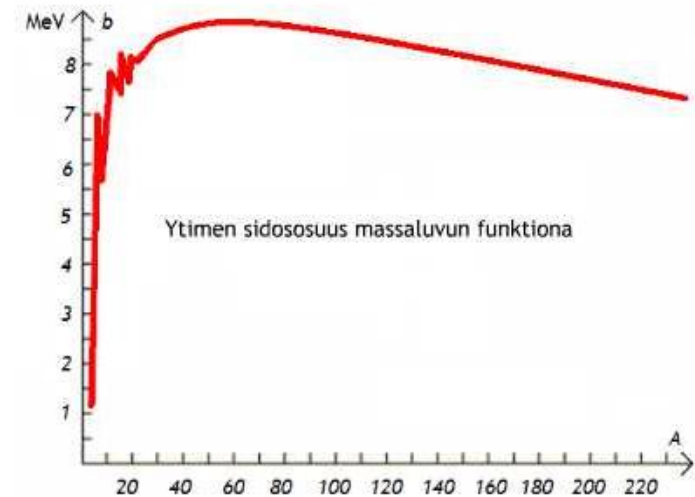


Sidososuus

- *Sidososuus* b = sidosenergia nukleonia kohti:

$$b = \frac{E_B}{A}$$

- Keskiraskaiden ytimien sidosuus on suurin
 - keskiraskaat ytimet ovat rakenteeltaan lujimpia
 - rauta ja nikkeli ovat pysyvimpiä ytimiä
- *Fuusiassa* kevyet atomiytimet yhdistyy raskaammiksi (kohti keskiraskaita)
- *Fissiassa* raskaat ytimet hajoaa kevyemmiksi (kohti keskiraskaita)
- Molemmissa tapauksissa sidosuus kasvaa jolloin vahvan vuorovaikutuksen potentiaalienergiaa (ydinenergiaa) vapautuu



Aktiivisuus

- *Aktiivisuus* A kuvaa ytimien hajoamisnopeutta
- Keskimääräinen aktiivisuus A_k on ydinten hajoamisten määrä aikayksikössä

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

- ΔN on ytimien määrän muutos ja Δt hajoamisiin kuluva aika
- Aktiivisuuden yksikkö on $[A] = 1/s = 1 \text{ Bq}$ (bequerel)
- Hetkellinen aktiivisuus A on suoraan verrannollinen hajoavien ydinten määrään N

$$A = \lambda N$$

- λ on radioaktiivisesta aineesta riippuva *hajoamisvakio*, joka kuvaa yksittäisen ytimen hajoamisen todennäköisyyttä

Hajoamislaki

- Hetkellinen aktiivisuus A voidaan kirjoittaa kahdella tavalla:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- Tästä voidaan integroimalla johtaa *hajoamislaki* eli aktiivisten ytimien määrä ajanhetkellä t (N_0 = alkuperäinen määrä)

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

- Myös aktiivisuus vähenee eksponentiaalisesti vastaavalla tavalla

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (A(t) = -\frac{d}{dt}N(t) = A_0 e^{-\lambda t})$$

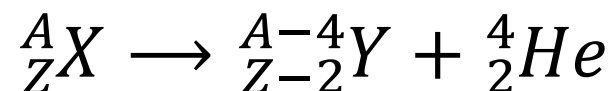
– Tässä A_0 on alkuperäinen aktiivisuus

- *Puoliintumisaika* $T_{1/2}$ on aika, jonka kuluessa keskimäärin puolet radioaktiivisista ytimistä on hajonnut
- Hajoamisvakion ja puoliintumisajan välillä on yhteys

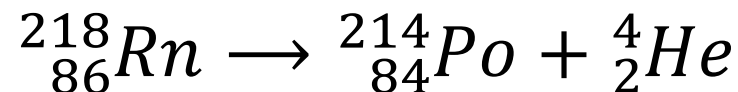
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (\text{Ratkaise yhtälö } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t})$$

Alfahajoaminen

- Alfahajoamisessa radioaktiivisen isotoopin ydin lähettää alfahiukkasen, joka koostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista.
- Alfahiukkanen on siis heliumydin: $\alpha = {}^4_2\text{He}$
- Jäljelle jää ydin (ns. tytärydin), jossa massaluku A on pienentynyt neljällä ja järjestysluku Z kahdella



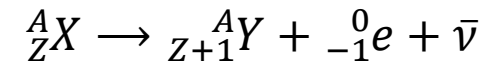
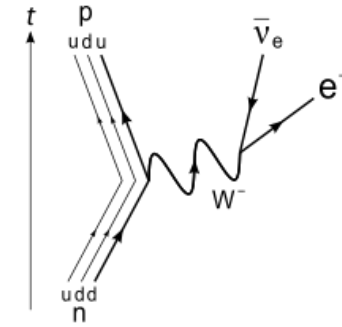
- Esimerkki:



- Alfa-aktiivinen radon hajoaa poloniumiksi

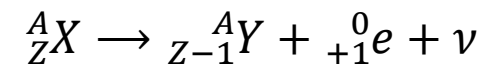
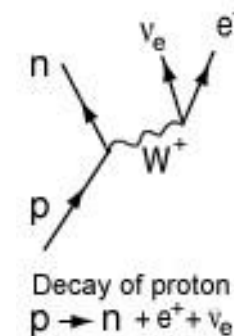
- β^- –hajoaminen

- Ytimen neutroni muuttuu protoniksi ja samalla emittoituu elektroni ja antineutriino
- Massaluku A ei muutu
- Järjestysluku Z kasvaa yhdellä



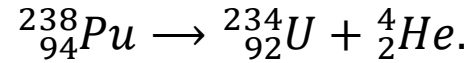
- β^+ –hajoaminen

- Ytimen protoni muuttuu neutroniksi ja samalla emittoituu positroni ja neutriino
- Massaluku A ei muutu
- Järjestysluku Z pienenee yhdellä



Yo-tehtävä S2018/7

7.1 Isotooppi $^{238}_{94}\text{Pu}$ on alfa-aktiivinen, joten sen hajoamisreaktio on



7.2 Lasketaan ^{238}Pu –ytimen hajoamisessa vapautuva energia eli reaktioenergia Q massavajeen Δm avulla:

$$Q = \Delta mc^2$$

$$Q = [m_{\text{Pu}} - 94m_e - (m_{\text{U}} - 92m_e + m_{\text{He}} - 2m_e)] \cdot c^2$$

$$Q = (m_{\text{Pu}} - m_{\text{U}} - m_{\text{He}}) \cdot c^2$$

$$Q = (238,049553 \text{ u} - 234,040946 \text{ u} - 4,0026033 \text{ u}) \cdot c^2$$

$$Q = 0,0060037 \text{ u} \cdot c^2 = 0,0060037 \frac{931,5 \text{ MeV}}{c^2} \cdot c^2 \approx 5,5924 \text{ MeV} \approx 8,9601 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

7.3 Luotaimen ^{238}Pu –isotoopin aktiivisuus A vähenee eksponentiaalisesti hajoamislain $A = A_0 e^{-\lambda t}$ mukaisesti.

Tässä A_0 on alkuperäinen aktiivisuus ja hajoamisvakio $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$. Aineiston mukaan kyseisen plutoniumisotoopin puoliintumisaika on $T_{1/2} = 87,7 \text{ a}$.

Alkuperäinen aktiivisuus saadaan kaavalla $A_0 = \lambda N_0$, jossa $N_0 = nN_A = \frac{m}{M} N_A$ on alkuperäinen plutoniumytimien määrä.

$$A_0 = \lambda \frac{m}{M} N_A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M} N_A$$

$$A_0 = \frac{\ln 2}{87,7 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \cdot \frac{13\,000 \text{ g}}{238,049553 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,0221367 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \approx 8,24225 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

Luotain laukaistiin syyskuussa 1977 ja ylioppilaskoe pidettiin syyskuussa 2018. Luotaimen laukaisusta on siis kulunut aika $t = 41$ a. Aktiivisuus 2018 syksyllä oli

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \approx 8,24225 \cdot 10^{15} \text{ Bq} \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{41 \text{ a}}{87,7 \text{ a}}} \approx 5,9609 \cdot 10^{15} \text{ Bq} \approx 6,0 \text{ PBq}$$

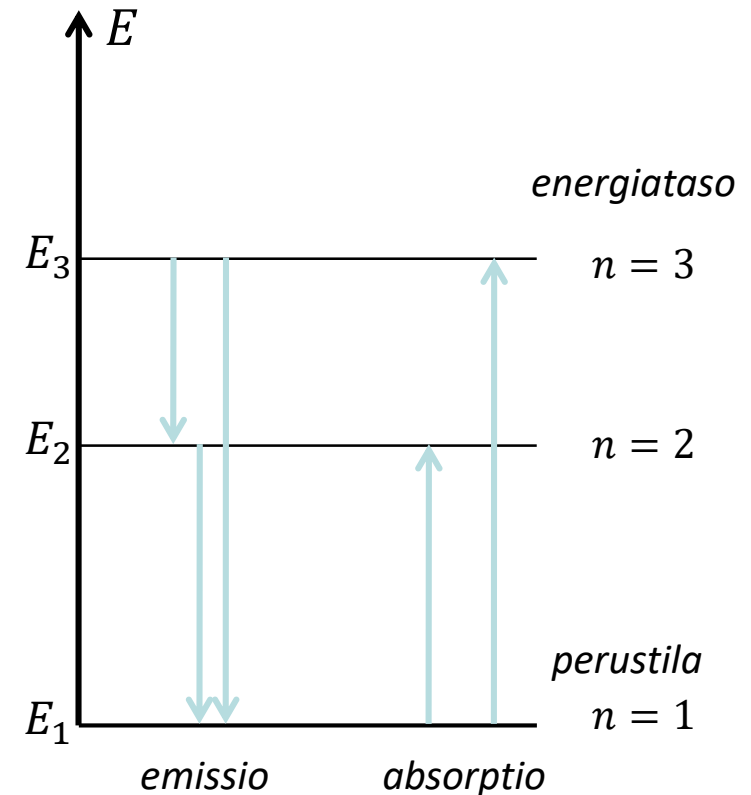
7.4 Reaktioissa vapautuva energia sekuntia on kohti on reaktorin lämpöteho P_L (watteina). Tämä saadaan kaavasta $P_L = QA_0$.

Sähköteho P_S saadaan kun lämpöteho kerrotaan hyötysuhteella $\eta = 0,065$.

$$P_S = \eta QA_0 \approx 0,065 \cdot 8,9601 \cdot 10^{-13} \text{ J} \cdot 8,24225 \cdot 10^{15} \text{ Bq} \approx 480 \text{ W}$$

Atomin energiatilat

- Atomin elektroniverhon elektronien kokonaisenergia riippuu elektronin etäisyydestä ytimestä
- Atomin energiatilat (tarkemmin sanottuna elektronien energiatilat) ovat *kvantittuneet*
 - Vain tietyt tasot mahdollisia
 - Nämä esitetään energiatasokaaviolla
- Atomi on perustilassa alimmalla energiatasolla, jolloin $n = 1$
- Kun atomi *absorboi* energiaa, elektroni voi *virittyä*, jolloin elektroni siirtyy korkeammalle energiatasolle
- Viritystilat ovat lyhytikäisiä. Ne purkautuvat kokonaan tai osittain atomin luovuttaessa eli *emittoidessa* fotonin



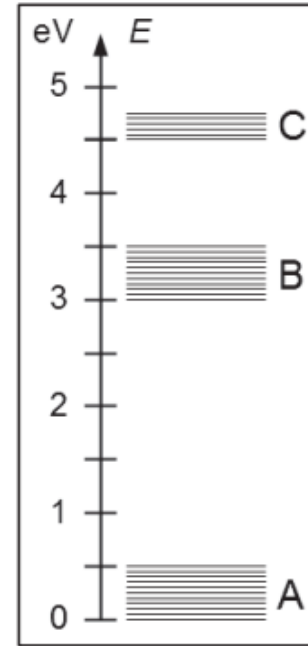
Atomin energia voi muuttua vain energiatasojen erotuksena, jolloin (emittoituvan tai absorboituvan) kvantin energia on:

$$hf = E_m - E_n$$

Yo-tehtävä K2015/9

Kvartsikiteen rakennepoikkeamien energiatiloja voidaan mallintaa kuvassa esitetyllä tavalla lähekkäisten tilojen ryhminä. Ryhmiä kutsutaan tässä energiavyöhykkeiksi. Vyöhykettä A kutsutaan perustilojen vyöhykkeeksi. Kun kvartsikide ottaa vastaan energiaa, se voi virittyä kaikille kuvassa näkyville energiavyöhykkeille, mutta kun se luovuttaa energiaa, se palautuu aina vyöhykkeelle A.

- Millä aallonpituuksilla kvartsikide absorboi ja emittoi säteilyä? (4 p.)
- Miten energiatilojen ryhmittäminen energiavyöhykkeiksi näkyy kvartsikiteen emittoiman säteilyn spektrissä? (2 p.)



Ratkaisu:

- Kun kvartsikide absorboi säteilyä, niin se ottaa vastaan sellaisten fotonien energian, joka vastaa jotakin siirtymää kaavion vyöhykkeeltä ylemmälle vyöhykkeelle.

Mahdollisia siirtymiä ovat $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$ ja $B \rightarrow C$.

Lasketaan näitä siirtymiä vastaavat fotonien energiat ja aallonpituudet.

Absorptio A→B:

Virittyminen voi tapahtua miltä tahansa vyöhykkeen A energiatilalta mille tahansa vyöhykkeen B energiatilalle. Kuvassa näkyy pienin ja suurin mahdollinen energiaero.

$$\text{Pienin: } 3,0 \text{ eV} - 0,5 \text{ eV} = 2,5 \text{ eV}$$

$$\text{Suurin: } 3,5 \text{ eV} - 0,0 \text{ eV} = 3,5 \text{ eV}$$

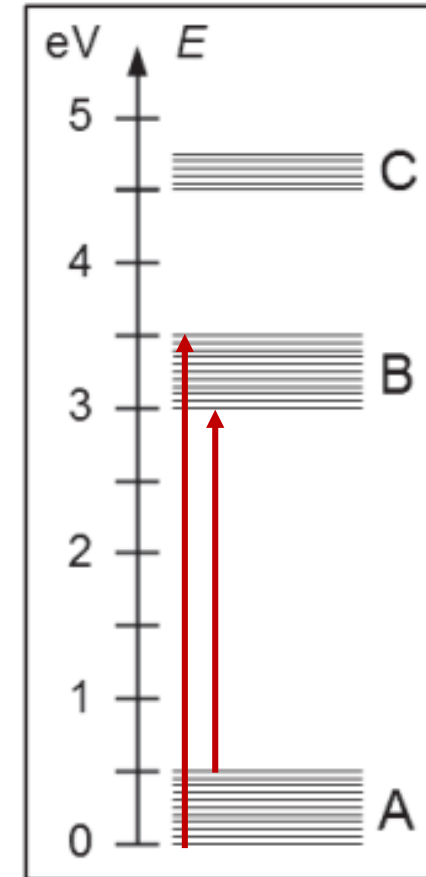
Mahdollinen absorptio A→B tapahtuu siis energiavälillä 2,5 eV – 3,5 eV.

Tällä energiavälillä olevien fotonien aallonpituudet saadaan kaavasta $\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E}$.

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,5 \text{ eV}} \approx 496,0 \text{ nm} \approx 500 \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3,5 \text{ eV}} \approx 354,2 \text{ nm} \approx 350 \text{ nm}$$

Absorptio A→B tapahtuu fotonien aallonpituusalueella 350 nm – 500 nm.



Absorptio A→C:

Pienin: $4,5 \text{ eV} - 0,5 \text{ eV} = 4,0 \text{ eV}$

Suurin: $4,75 \text{ eV} - 0,0 \text{ eV} = 4,75 \text{ eV}$

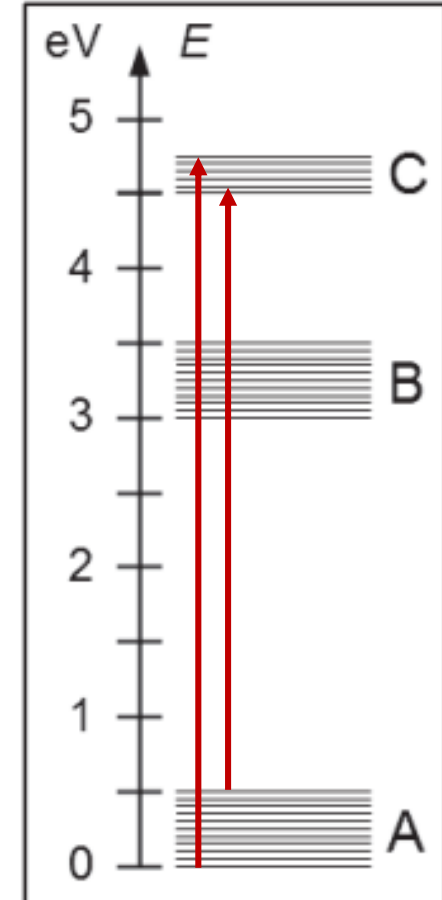
Mahdollinen absorptio A→C tapahtuu siis energiavälillä
 $4,0 \text{ eV} - 4,75 \text{ eV}$.

Vastaavat aallonpituudet:

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,0 \text{ eV}} \approx 310,0 \text{ nm} \approx 310 \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,75 \text{ eV}} \approx 261,0 \text{ nm} \approx 260 \text{ nm}$$

Absorptio A→C tapahtuu fotonien aallonpituusalueella 260 nm – 310 nm.



Absorptio B→C:

Pienin: $4,5 \text{ eV} - 3,5 \text{ eV} = 1,0 \text{ eV}$

Suurin: $4,75 \text{ eV} - 3,0 \text{ eV} = 1,75 \text{ eV}$

Mahdollinen absorptio B→C tapahtuu siis energiavälillä $1,0 \text{ eV} - 1,75 \text{ eV}$.

Vastaavat aallonpituudet:

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,0 \text{ eV}} \approx 1240 \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{4,135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,75 \text{ eV}} \approx 710 \text{ nm}$$

Absorptio B→C tapahtuu fotonien aallonpituusalueella
710 nm – 1240 nm.

Kvartsikide palautuu aina energiatasolle A, kun se luovuttaa energiaa eli emittoi fotonin. Mahdollisia siirtymiä on siis C→A ja B→A ja näitä vastaavat aallonpituudet ovat aiemman perusteella väleillä 350 nm – 500 nm ja 260 nm – 310 nm.

b) Emissiospektrissä ei näy yksittäisiä siirtymiä vastaavia viivoja vaan kaksi yhtenäisempää kaistaa aallonpituusalueilla 350 nm – 500 nm ja 260 nm – 310 nm.

