

1. Fotoni

- Suhteellisuusteoria --> energia voi muuttua massaksi tai massa energiaksi.
- Energia $E = mc^2$,
missä m = kappaleen massa ja c = valonnopeus
- **kvantittuminen** on ilmiö, jossa suure saa vain tiettyjä erillisiä arvoja. Kvantittuneen suureen arvot ovat aina kvantin monikertoja.
- Valon hiukkasmallin mukaan valo koostuu fotoneista eli valokvanteista.
 - fotonilla ei ole massaa eikä sähkövarausta.

- hiukkasten massa voidaan ilmoittaa käyttämällä kilogramman ohella muita yksiköitä, esim.

$$1 \text{ u} = 1,660\,539\,066\,60 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,494\,102 \text{ MeV}/c^2.$$

Esimerkiksi elektronin massa on

$$m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \approx 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ u} \approx 0,511 \text{ MeV}/c^2.$$

Protonin tai neutronin massa on suunnilleen yhden atomimassayksikön (1 u) suuruinen.

Lukuun liittyviä kaavoja:

Aaltoliikkeen perusyhtälö: $c = \lambda f$

Fotonin energia $E = hf$,

missä h = Planckin vakio

$$\text{Fotonin liikemäärä } p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

liikemäärä ilmenee säteilypainena.

2. Valosähköinen ilmiö

- Sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamaa elektronien irtoamista metallin pinnasta kutsutaan **valosähköiseksi ilmiöksi**.
- Fotoni irrottaa elektronin, jos fotonin energia on riittävän suuri.
- Pienintä energiaa, joka tarvitaan valosähköisessä ilmiössä elektronin irrottamiseen metallista, kutsutaan irrotustyöksi W .
- Rajatapauksessa fotonin energia $E = hf_0$ vastaa irrotustyötä W . Tällöin fotonin taajuutta f_0 kutsutaan rajataajuudeksi.
- tällöin fotonin energia kuluu energia irrottamiseen eikä irronneella elektronilla ole liike-energiaa.

- Jos fotonin energia on suurempi kuin irrotustyö, niin loppuosa fotonin energasta muuntuu elektronin liike-energiaksi (E_k) --> $E_{k,\max} = hf - W$

- Comptonin sironta on ilmiö, jossa fotonin ja atomin uloimmalla kuorella olevan vapaan elektronin törmäys on kimmoisa ja törmäyksessä fotoni luovuttaa osan energiastaan elektronille.

- tällöin elektronin liike-energia $E_k = hf_0 - hf$
eli elektronin E_k = fotonin E_{alussa} - fotonin E_{lopus}

- Huom! Klassisen fysiikan mukaan aallonpituus riippuu värähtelytaajuudesta ja väliaineesta, ei aallon energiasta.

- Comptonin sironta ilmenee suurienergisellä säteilyllä, esim. röntgensäteilyllä.

3. Atomin rakenne

- käsitys atomista muuttunut historian saatossa.
- Bohrin atomimalli selittää vetyatomin tai yksielektronisen ionin rakenteen.
- Mallin perustana kvanttihypoteesi: atomi lähettää tai vastaanottaa energiaa määräkokoisina annoksina eli kvantteina.

Bohrin atomimallissa vetyatomin pysyvien tilojen energiat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -R_H \frac{hc}{n^2},$$

jossa $R_H = 1,096\,7758 \cdot 10^7 \text{ 1/m}$ on Rydbergin vakio vedylle, h on Planckin vakio, c on valonnopeus ja n on luonnollinen luku, eli 1, 2, 3, ...

Kaukana atomin ytimestä elektronin potentiaalienergia on nolla, ja lähellä ydintä se saa negatiivisia arvoja.

Vetyatomi on **perustilassa**, kun sen energia on pienin mahdollinen. Perustilassa $n = 1$. Muita tiloja kutsutaan **viritystiloi**ksi. Esimerkiksi kun $n = 2$, kyseessä on ensimmäinen viritystila, ja kun $n = 3$, kyseessä on toinen viritystila.

- energiatasokaavion piirtäminen nspirellä, esim . tehtävä 3.9.

Atomi voi absorboida tai emittoida fotonin, jonka energia vastaa kahden energiatilan energioiden erotusta

$$hf = E_m - E_n,$$

jossa h on Planckin vakio, f on fotonin taajuus ja E_m sekä E_n ovat energiatilojen m ja n energiat ja $m > n$.

Vetyatomin energiatilat voidaan laskea ja merkitä kaavioon. **Energiasokaavio** on malli, joka kuvaa atomin perustilan ja viritystilojen energioita.

- Kvanttimekaanisessa mallissa elektronin sijaintia atomissa ei voi tietää tarkasti, ainoastaan vain todennäköisyyksillä se on tietyllä alueella.
- Elektronin tilaa kuvataan aaltofunktiolla Ψ (psii)
- Atomiorbitaali on alue ytimen ympärillä, jolla todennäköisimmin elektroni liikkuu.

4. Viivaspektri

- Säteilyn spektri: sähkömagneettisen säteilyn taajuus- tai aallonpituusjakauma --> jatkuva spektri ja viivaspektri
- viivaspektrejä ovat mm.
 - **Absorptiospektri**: syntyy, kun osa säteilystä absorboituu väliaineeseen(kaasuun).
 - **Emissiospektri**: aineen emittoiman säteilyn spektri. Emissiospektri syntyy, kun virittyneet atomit siirtyvät alemmille energiatiloille.
- Vedyn emittoiman viivaspektrin aallonpituudet saadaan yhtälöstä:

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

jossa $R_H = 1,096\,7758 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}}$ on Rydbergin vakio vedylle, $n = 1, 2, 3, \dots$ ja $m = n + 1, n + 2, n + 3, \dots$ ja m ovat vetyatomin energiatilojen järjestyslukuja.

- Luminesenssissa aine lähettää säteilyä, kun atomien viritystilat purkautuvat.
- laserin valo syntyy stimuloidussa emissiossa. Fotonit kulkevat virittyneiden atomien läheltä, jonka seurauksena atomien viritystilat purkautuvat ja atomit emittoivat lisää fotoneja.

5. Röntgensäteily

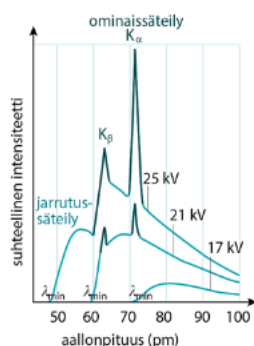
– Sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on suuruusluokaltaan $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ Å}$

– Tuotetaan röntgenputkella tai synkrotronilla.

– **jarrutussäteily** syntyy, kun elektronisuihku törmää anodiin ja elektronien kiihtyvyys on suuri.

– **ominaissäteily** syntyy, kun anodinmateriaalin viritystilat purkautuvat.

– röntgensäteilyn spektri koostuu jatkuvasta spektristä ja viivaspektristä. Kuva kirja s.71



– Sähköinen voima kiihdyttää elektroneja ja tekee työn $W = eU$, ($e = e$:n sähkövaraus ja $U =$ kiihdytysjänn.)

– Kun elektroni törmää anodiin, niin elektronin liike-energia on $E_k = eU$

– Rajatapauksessa elektronin liike-energia muuntuu kokonaan fotonin energiaksi.

– Fotonin suurin energia $E_{\max} = hf_{\max} = eU$

– Röntgensäteilyn hyödyntäminen: alkuainetutkimus, lääketieteellinen kuvantaminen.

– Röntgendiffraktiolla voidaan tutkia kiteisen aineen rakennetta.

– Braggin laki:

$$2d \sin \theta = k\lambda,$$

jossa d on kiteen atomitasojen välinen etäisyys, θ on säteilyn kulkusuunnan ja atomitasojen välinen kulma, $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ on kertaluku ja λ on säteilyn aallonpituus.

6. Aalto–hiukkasdualismi

– Sähkömagneettista säteilyä voidaan mallintaa aaltoliikkeenä tai hiukkasina

--> aalto–hiukkasdualismi.

– De Broglien aallonpituus on malli, jolla kuvataan **hiukkasen** aaltomaista käyttäytymistä.

– Hiukkasen liikemäärä $p = mv$, jossa $m =$ massa ja $v =$ nopeus.

– aaltolina kuvatun hiukkasen liikemäärä $p = \frac{h}{\lambda}$

– kun liikemäärät merkitään yhtäsuuriksi saadaan **de Broglien aallonpituus**

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

– Sekä sähkömagneettinen säteily että hiukkas säteily voivat tuottaa diffraktiokuvion, jonka interferenssimaksimien paikat voidaan määrittää Braggin lain avulla. (käsitelty aiemmin)

– **Kvanttimekaniikan ilmiöitä:**

– lomittuminen eli kahden kvanttitalan kytkeytyminen --> kahden hiukkasen ominaisuudet riippuvat toisistaan.

– tunneloituminen --> ilmiö, jossa hiukkanen kykenee siirtymään paikkaan, johon hiukkasen energia ei klassisen fysiikan mukaan riitä.

7. Gammasäteily

- Atomin rakenne: käsitteet--> nukliidi, isotooppi, massaluku, järjestysluku.
- alkuaineen merkintä!

Yksittäistä protonia voidaan merkitä ${}^1_1\text{H}$ tai ${}^1_1\text{p}$ ja neutronia ${}^1_0\text{n}$.

- Gammasäteilyn intensiteetti I lasketaan kaavalla:

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

jossa I_0 on gammasäteilyn intensiteetti lähtötilanteessa ja μ on heikennyskerroin.

Heikennyskerroimen yksikkö on $[\mu] = \frac{1}{\text{m}} = \text{m}^{-1}$.

- Gammasäteily (γ - säteily) on lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä jota syntyy atomin ytimen viritystilän purkautuessa.
- gammasäteily on hyvin läpitunkevaa ja sillä on paljon energiaa, koska λ on hyvin pieni ja f suuri.
- gammasäteilyn intensiteetti pienenee eksponentiaalisesti.

- Aineessa edetessään gammasäteilyä absorboituu aineeseen ja säteilyn intensiteetti pienenee.

- Gammasäteilyn ja aineen vuorovaikutuksessa voi tapahtua: valosähköinen ilmiö, Comptonin sironta tai parinmuodostus.

- Parinmuodostuksessa säteilyn energiaa muuttuu aineeksi massan ja energian ekvivalenssin eli yhtälön $E = mc^2$ mukaisesti.

- Annihilaatio on tapahtuma, jossa ainetta muuttuu säteilyn energiaksi.

- Kun **hiukkanen** ja **antihhiukkanen** kohtaavat, säilymislakien vuoksi syntyy kaksi fotonia ts. syntyy gammasäteilyä, jonka energia on kvantittunut. esim. elektronin ja positronin kohtaaminen $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$

8. Ytimen sidosenergia

- Kun lasketaan alkuaineen massa u-yksikköinä atomin sisältämien hiukkasten mukaan, saadaan suurempi massa kuin mitä alkuaineen atomilla todellisuudessa on.
- tätä erotusta sanotaan massavajeeksi Δm .

Ytimen **massavaje Δm** = atomin osasten massa – atomin massa

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - m$$

Protonien määrä ja protonin massa Neutronien määrä ja neutronin massa Elektronit

Elektronit pitää laskea mukaan, koska taulukoissa on annettu koko atomit massat Atomin taulukkomassa (sisältää myös elektronit)

- Massavajetta Δm vastaava energia vapautuu, kun ytimen rakenneosaset yhtyvät ytimeksi.
- Energiaa sanotaan sidosenergiaksi, koska ytimen hajottaminen osasikseen vaatii saman energian.

- Sidosenergia E_B lasketaan massavajeen avulla: **$E_B = \Delta m c^2$**

- sidoseisuus b (sidosenergia nukleonia kohden) saadaan sidosenergian avulla:

Sidoseisuus on

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

jossa E_B on ytimen sidosenergia ja A on massaluku eli ytimen nukleonien lukumäärä.

- mitä suurempi sidoseisuus, sitä enemmän tarvitaan energiaa erottamaan nukleoni ytimeistä.

- **ydinreaktion** seurauksena voi syntyä uusia ytimiä ja ydinreaktion reaktioenergia Q saadaan kaavalla:

$$Q = \Delta m c^2$$

- Jos $Q > 0$ reaktiossa vapautuu energiaa (massavaje Δm on positiivinen).
- Jos $Q < 0$, niin tarvitaan energiaa, jotta ydinreaktio tapahtuu (massavaje Δm on negatiivinen)

9. Radioaktiivisuus ja ydinsäteily

- epästabiilien atomiytimien ominaisuus.
- ytimen hajotessa toiseksi ytimeksi vapautuu energiaa, joka havaitaan ydinsäteilynä.
- ydinsäteily voi olla
 - o alfasäteilyä (hiukkassäteilyä)
 - o beetasäteilyä (hiukkassäteilyä)
 - o neutronisäteilyä (hiukkassäteilyä)
 - o gammasäteilyä (sähkömagneettista säteilyä)
- hajoamiset tapahtuvat reaktioyhtälöiden mukaisesti: (katso maol)

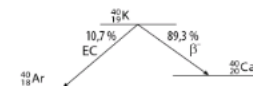
α -hajoaminen	${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y_{N-2} + {}_2^4\text{He}_2$
β^- -hajoaminen	${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z+1}^AY_{N-1} + e^- + \bar{\nu}_e$
β^+ -hajoaminen	${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z-1}^AY_{N+1} + e^+ + \nu_e$
elektronisieppaus	${}_Z^AX_N + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY_{N+1} + \nu_e$

- ydinreaktioissa massavaje $\Delta m =$ hiukkasten massa lähtötilanteessa – hiukkasten massa lopputilanteessa.

Esimerkki radioaktiivisen Kalium-40 hajoamisesta

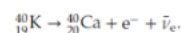
Ohessa on kalium-40:n hajoamiskaavio.

- Mitkä ovat kalium-40:n hajoamistavat?
- Kirjoita hajoamiseen liittyvät reaktioyhtälöt.
- Kuinka suuri energia vapautuu, kun kalium-40 hajoaa argon-40:ksi?

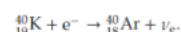


- Kaavion perusteella kalium-40 hajoaa 89,3 prosentin todennäköisyydellä β^- -hajoamisella ja 10,7 prosentin todennäköisyydellä elektronisieppauksella.

- Kalium-40:n β^- -hajoamisen reaktioyhtälö on



Kalium-40:n elektronisieppauksen reaktioyhtälö on



- kalium-40-atomin massa $m_{\text{K-40}} = 39,963\,999\,\text{u}$
argon-40-atomin massa $m_{\text{Ar-40}} = 39,962\,383\,\text{u}$
elektronin massa $m_e = 5,485\,7991 \cdot 10^{-4}\,\text{u}$

Neutriinon massaa ei huomioida.

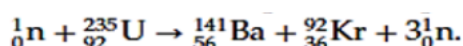
Elektronisieppauksessa vapautuva energia on

$$\begin{aligned}
 Q &= \Delta mc^2 = (m_{\text{K-40-ydin}} + m_e - m_{\text{Ar-40-ydin}})c^2 \\
 &= ((m_{\text{K-40}} - 19m_e) + m_e - (m_{\text{Ar-40}} - 18m_e))c^2 \\
 &= (m_{\text{K-40}} - m_{\text{Ar-40}})c^2 \\
 &= (39,963\,999\,\text{u} - 39,962\,383\,\text{u})c^2 \\
 &= 0,001\,616 \cdot 931,494\,102 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\
 &= 1,505\,294\,\text{MeV} \\
 &\approx 1,505\,\text{MeV}.
 \end{aligned}$$

10. Fissio ja fuusio

- Fissioreaktiossa raskas ydin hajoaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi. Samalla vapautuu runsaasti sidosenergiaa.
- Fissiossa vapautuu samalla vapaita neutroneja, jotka voivat halkaista uusia ytimiä --> ketjureaktio.

- Esimerkiksi U-235 isotoopin fissio saadaan aikaan pommittamalla ydintä neutroneilla -->

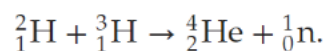


- Hallitsemattomassa ketjureaktiossa (ydinpommi) sekunnin murto-osassa vapautuu valtava määrä energiaa.

- Ydinvoimalaitosten energiantuotanto perustuu hallitussa fissiossa vapautuvaan energiaan.

- Fuusiossa kaksi kevyttä atomiydintä yhdistyy raskaammaksi ytimeksi, jolloin vapautuu energiaa.
- fuusio vaatii korkean lämpötilan ja suuren paineen, tähdissä lämpötila ja paine ovat fuusion kannalta sopivat.

- Esimerkiksi deuteriumin(H-2) ja tritiumin(H-3) fuusiossa muodostuu heliumydin ja neutroni-->



Reaktiossa vapautuva energia:

deuteriumatomin massa $m_{\text{H-2}} = 2,014\,1018\,\text{u}$
tritiumatomin massa $m_{\text{H-3}} = 3,016\,0493\,\text{u}$
helium-4-atomin massa $m_{\text{He-4}} = 4,002\,6033\,\text{u}$
neutronin massa $m_n = 1,008\,6650\,\text{u}$

Yhdessä fuusioreaktiossa vapautuva energia on

$$\begin{aligned}
 Q &= \Delta mc^2 \\
 &= (m_{\text{H-2}} + m_{\text{H-3}} - (m_{\text{He-4}} + m_n))c^2 \\
 &= (m_{\text{H-2}} + m_{\text{H-3}} - m_{\text{He-4}} - m_n)c^2 \\
 &= (2,014\,1018\,\text{u} + 3,016\,0493\,\text{u} - 4,002\,6033\,\text{u} - 1,008\,6650\,\text{u}) \cdot c^2 \\
 &= 0,018\,8828\,\text{u} \cdot c^2 \quad \parallel 1\,\text{u} = 931,494\,102\,\text{MeV}/c^2 \\
 &= 0,018\,8828 \cdot 931,494\,102 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\
 &\approx 17,5892\,\text{MeV}.
 \end{aligned}$$

11. Aktiivisuus ja hajoamislaki

– Aktiivisuus ilmaisee, kuinka monta radioaktiivisen ytimen hajoamista näytteessä tapahtuu sekunnissa.

– Aktiivisuuden yksikkö on becquerel, 1 Bq.

– Aktiivisuus A on suoraan verrannollinen radioaktiivisten ytimien lukumäärään N .

– aktiivisuus saadaan kaavasta: $A = \lambda N$,
jossa hajoamisvakio λ [1/s] on kullekin radioaktiiviselle isotoopille ominainen.

– Näytteen puoliintumisaika $T_{1/2}$ on aika, jossa näytteessä olevien radioaktiivisten isotooppien lukumäärä tai näytteen aktiivisuus on puolittunut.

– hajoamisvakio λ saadaan yhtälöstä

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

– Radioaktiivisen isotoopin aktiivisuus vähenee eksponentiaalisesti.

– **Hajoamislain** perusteella näytteessä olevien radioaktiivisten ytimien lukumäärä N ja näytteen aktiivisuus A vähenevät eksponentiaalisesti ajan funktiona. Näin ollen saadaan yhtälöt

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

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

A_0 = näytteen aktiivisuus alussa

N_0 = ytimien lukumäärä alussa

λ = isotoopin hajoamisvakio

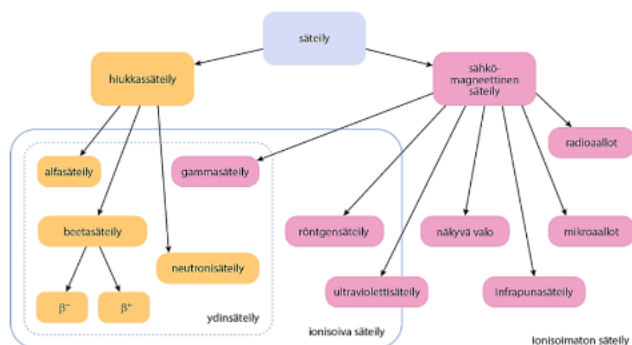
e = Neperin luku ja t = aika tarkastelujakson alusta

– radiohiilijoiutuksella voidaan määrittää eloperäisten aineiden ikä.

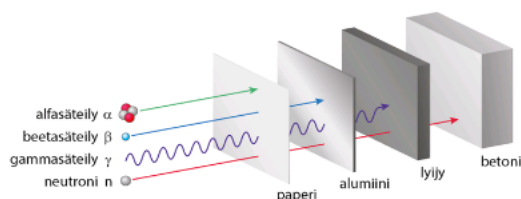
– perustuu aineessa olevan radioaktiivisen hiili-14:n hiili-12:n suhteeseen.

12 Ionisoiva säteily ja ihminen

– Ionisoiva säteily on lyhytaaltoista sähkömagneettista (gamma, röntgen, UV) säteilyä tai hiukkassäteilyä, joka kykenee ionisoimaan atomeja ja rikkomaan atomien välisiä sidoksia.



Eri säteilylajien eteneminen väliaineissa



– Ionisoiva säteily voi vaurioittaa DNA-molekyyliä ja altistuminen lisää syöpäriskiä.

– Efektiivinen säteilyannos H kuvaa kehoon osuneen ionisoivan säteilyn kokonaishaittaa.
 $[H] = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ sievert}$

– Suomalaisen säteilyannos aiheutuu suurelta osin (noin 70 %) alfa-aktiivisesta radon-222:sta.

– Ionisoivaa säteilyä voidaan hyödyntää lääketieteellisessä kuvantamisessa ja syöpähoidoissa.