

β -säteily

Beetasäteily havaittiin ensimmäisen kerran vuosisadan vaihteessa samoihin aikoihin kuin alfa- ja gammasäteilykin. Tutkittaessa uraania ja toriumia huomattiin niiden lähtettävän hiukkassäteilyä, joka ei vastannut ominaisuuksiltaan alfasäteilyä. Tämä säteily oli läpäisykyvyltään suurempaa kuin alfasäteily, ja sen hiukkaset olivat negatiivisesti varautuneita alkeisvarauksen e verran. Kun lisätutkimusten avulla tämä hiukkanen tunnistettiin elektroniksi, oli löydetty β -säteily.

β -säteily

Yleisin beetasäteilyn laji on β^- -säteily, jota esiintyy yleisesti luonnossa. Muun muassa uraanin yleisin isotooppi $U-238$ voi hajota $Th-234$:ksi, joka on β^- -aktiivinen. Yleensä β^- -aktiivisia ovat atomit, joissa on suhteessa paljon neutroneita protonien määrään nähden. Beetasäteilyssä syntyvät elektronit saavat yleensä suuren nopeuden, ja niiden energian funktio on jatkuva. Tämä tarkoittaa elektronin saaman energian voivan vaihdella portaattomasti minimi- ja maksimiarvonsa välissä toisin kuin alfa- ja gammasäteilyssä, joiden spektri ei ole jatkuva. Energian maksimiarvo vaihtelee ytimen mukaan, mutta keskimäärin elektronien saama energia on 40% maksimiarvosta. Pian huomattiin, ettei elektroni saanut läheskään kaikkea syntynyttä energiaa. Ytimeenkään ei siirry paljon

kimmahdusenergiaa sen massiivisuuden vuoksi. Tämän vuoksi itävaltalaisfyysikko Wolfgang Pauli ehdottikin vuonna 1930, että reaktiossa syntyisi vielä toinenkin hiukkanen, joka kuljettaisi loppuenergian pois ytimeistä. Näin massan ja energian välinen yhteys säilyisi. Teoriaa kehitti edelleen italialais-yhdysvaltalainen fyysikko Enrico Fermi, joka esittikin β^- -säteilyn vuonna 1932 meille tutussa muodossa: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. (Katso tietoruutu sivun alareunassa.)

Ehkä yksinkertaisin β^- -hajoaminen on yksinäisen neutronin hajoaminen. Se havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1948. Neutroni (puoliintumisaika n. 15 min) on massaltaan on suurempi kuin reaktiotuotteiden massojen summa, jolloin suurin osa lopusta massasta muuntuu kineettiseksi energiaksi pääosin elektronille ja neutriinolle. Tämä saadaan helposti lasketuksi kun tiedetään hiukkasten massat:

$$\begin{aligned} n &= 939,5731 \frac{\text{MeV}}{c^2}, \\ p^+ &= 938,2796 \frac{\text{MeV}}{c^2}, \\ e^- &= 0,51103 \frac{\text{MeV}}{c^2} \text{ ja} \end{aligned}$$

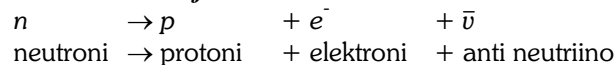
$$v \approx 0.$$

Kun lasketaan $m_n c^2 = (m_p + m_e + m_{\bar{\nu}}) c^2 + E_k$, missä m :t ovat alaindeksissä osoitettujen hiukkasten massat ja E_k on vapautuva kineettinen energia, saadaan vapautuvan kineettisen energian arvoksi noin 782 keV, joka vastaakin koekellisesti saatuja tuloksia. Toinen esimerkki β^- -hajoamisesta on $Hg-206$ hajoaminen Tl :n (tallium) kautta lyijyksi.

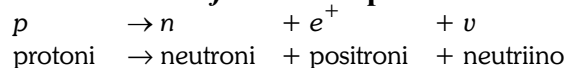
Beetasäteily aiheuttaa ionisoitumista sekä säteilylähteessä että aineessa, johon säteily osuu. Säteilylähde alkaa varautua positiivisesti, kun atomeihin ilmaantuu protoni lisää, ja niistä tulee ioneja. Aine, johon säteily osuu, taas varautuu negatiivisesti elektronien vaikutuksesta. Joissakin isotoopeissa ($Ca-48$, $Se-82$, $Zr-96$, $Mo-100$, $Cd-116$, $Sn-124$, $Te-130$, $Nd-150$, $U-238$) esiintyy myös kaksois- β^- -hajoamista. Sitä

1) MeV = megaelektronivoltti = miljoona kertaa elektronin yhden voltin jännitteessä saama liike-energia. Sitä käytetään energian yksikkönä hiukkasfysiikassa.

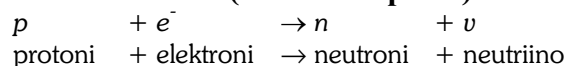
β^- eli Beeta miinus:

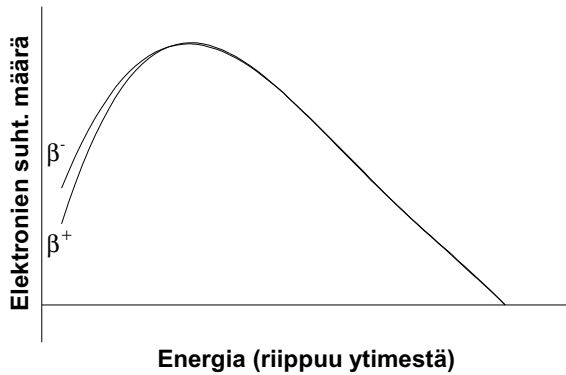


β^+ eli Beeta plus:

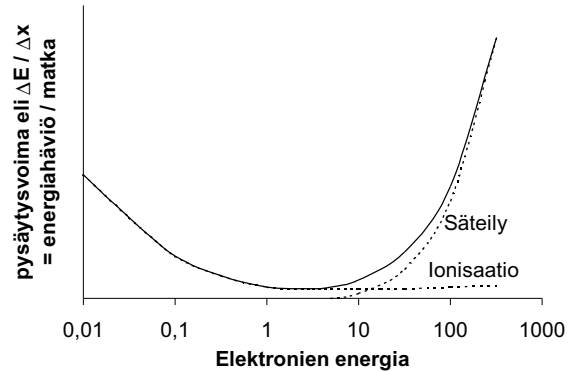


EC (electron capture)





Kuva 33a:
Emittoituvien elektronien energijakauma



Kuva 33b:
Elektronien hidastuminen

on tutkittu lähinnä neutriinotutkimusten yhteydessä. Kaksois- β^- -hajoaminen ei eroa merkittävästi kahdesta samalle ytimelle tapahtuneesta β^- -hajoamisesta muutoin kuin erisuuruisen energian ja väliytimen puuttumisen muodossa.

β^+ -säteily

Toinen beetasäteilyn laji on β^+ -säteily. Sitä tapahtuu atomin ytimissä, joissa on paljon protonia neutronimäärään verrattuna. Tällaisia isotooppeja ei esiinny luonnossa runsaasti, vaan ne lähes poikkeuksetta valmistetaan keinotekoisesti. Toisin kuin β^- -säteily, tarvitsee β^+ -säteily energiaa syntyäkseen. Energiaa tarvitaan enemmän kuin yhden elektronipositroniparin¹⁾ synnyttämiseen tarvitaan eli $2 \cdot 511 \text{ keV} = 1,02 \text{ MeV}$. Toisaalta jos atomin ytimessä on liikaa energiaa, irtoaa siitä protoni eikä β^+ -hajoamista tapahdu. β^+ -säteilyssä vapautuvan elektronin energia voi vaihdella parista keV:stä jopa 14 MeV:iin. Tavallisesti kuitenkin suurenergiseksi katsotaan jo parin MeV:n elektronit. Esimerkkinä β^+ -hajoamisesta voisi pitää vaikka Na-22:n hajoa-

1) Positroni on elektronin vastahiukkanen eli se vastaa muilta ominaisuuksiltaan elektronia paitsi varaukseltaan, joka on yhtä suuri mutta vastakkaismerkinen kuin elektronin eli +e. Positroni, kuten kaikki muukin antimateria, annihiloituu materian kanssa synnyttäen gammasäteilyä. Beetasäteilyssä syntyvät positronit annihiloituvat yleensä siinä vaiheessa kun niiden nopeus on hiljentynyt ja ne törmäävät elektroniin.

mista Ne-22:ksi. β^+ -aktiivisten aineiden puoliintumisaajat vaihtelevat 10^{10} vuoden ja 0,03s:n välillä. Tämä johtuu puoliintumisaajan riippuvuudesta energiasta. Jos ytimessä olisi niin paljon energiaa, että se hajoaisi alle 0,03 sekunissa, irtoaisi siitä vain protoni.

Elektronisieppaus

EC (Electron capture) eli elektronisieppaus muistuttaa beetahajoamista hyvin paljon. Sitä tapahtuu pääasiassa aineissa, joissa on suhteellisesti paljon protonia. EC perustuu siihen, että on mahdollista, että k- tai l-kuorella oleva elektroni joutuu atomin ytimeen. Tämä on tietenkin todennäköisempää k-kuoren elektroneille. EC:n havaitsi ensimmäisenä yhdysvaltalainen fyysikko Luis Alvarez vuonna 1937. Reaktiossa protonista ja elektronista syntyy neutroni ja neutriino eli $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu$. Jos ytimen energia ylittää $1,02 \text{ MeV}$, saattaa se purkautua β^+ -säteilyä. Sen jälkeen kun EC on tapahtunut, alkavat elektronit järjestäytyä uudelleen atomin kuorille. Elektronien laskeutuessa alemman kineettisen energian radoille eli pienemmille elektronikuorille vapautuu niistä energiaa fotoneina, joista osa on röntgensäteilyn alueella. EC havaittiin alunperin juuri näiden röntgenfotoneiden perusteella.

Hajonta

Elektronien nopeuden vähentyessä alkaa niiden suunta muuttua herkästi niiden pienen massan vuoksi. Elektronit voivat törmätä atomeiden ytimien sähkökenttiin kimmoisasti niin ettei elektroni menetä paljoakaan energiaa. Tämä johtuu ytimen massan suuruudesta elektronin massaansa verrattuna. Beetasäteilyssä syntyneet elektronit törmäilevät myös atomien elektronipilviin. Elektronien välisissä törmäyksissä nämä kuitenkin menettävät vain vähän (<40eV) energiaa. Beeta-

säteily virittää usein ainetta, jonka läpi se kulkee, mutta myös ionisoi sitä, joskin vähemmän. Korkeaenergiset elektronit menettävät energiaansa kolmannellakin tavalla. Korkeaenerginen elektroni menettää nopeuttaan joutuessaan

Neutriino

Neutriino on pieni, vaikeasti havaittava hiukkanen. Neutriinon massa on joko 0 tai se on hyvin pieni. Laskennallisesti oletetaan neutriinon liikkuvan valonnopeudella ja niiden massan olevan 0. Neutriinolla ei ole sähkövarausta eikä se suorovaikuta magneettisesti havaittavissa määrin. Neutriinoja syntyy erilaisten hiukkasten kuten myonien hajoamistuotteina ja ne ovat pysyviä. Vaikka neutriinon olemassaolo oli ennustettu jo 30-luvun alussa, havaittiin neutriino kokeellisesti vasta vuonna 1954. Antineutriinot ovat neutriinon vastahiukkasia eivätkä eroa ominaisuuksiltaan neutriinoista muuten kuin että annihiloituvat energiaksi näitä kohdatessaan, kuten hiukkanen ja vastahiukkanen aina tekevät.

ei-kimmoisaan vuorovaikutukseen atomin ytimen kanssa. Ylijäämäenergia poistuu fotonina. Näin syntynyttä säteilyä kutsutaan jarrusäteilyksi (bremsstrahlung). Tällaista vuorovaikutusta ei esiinny esim. alfasäteilyllä, koska sen todennäköisyys on kääntäen verrannollinen hiukkasen massan neliöön. Todennäköisyys jarrusäteilyn syntymiseen kasvaa nopeammin kuin todennäköisyys törmästä muihin elektroneihin beetahiukkasen energian kasvaessa. Jarrusäteilyä voi myös esiintyä jo siinä atomissa, joka emittoi beetahiukkasen. Tällöin sitä kutsutaan

sisäiseksi jarrusäteilyksi. Beetasäteily menettää aineessa kulkiessaan energiaansa eksponentiaalisesti eli tietyn matkan jälkeen sen energia aina vähenee puoleen. Pysäytysvoima on verrannollinen aineen tiheyteen, kun on kyse elektronien törmäyksen aiheuttamasta hidastumisesta, ja atomien järjestysluvun neliöön, kun jarrusäteily aiheuttaa hidastumisen.

Beetahajoamista laskettaessa on pidettävä mielessä, että siinä täytyy, toisin kuin alfahajoamisessa, soveltaa erityisen suhteellisuusteorian kaavoja. Näistä lienevät merkittävimmät elektro-

nin liikemassan m

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

ja kokonaisenergian T

$$T = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} = mc^2 \\ = E_k + m_0 c^2$$

kaavat, joissa m_0 on hiukkasen lepomassa, v sen nopeus ja p liikemäärä. Beetahajoamisen takana arvellaan nykykäsityksen mukaan olevan heikonvuorovaikutuksen, jonka välittäjähiukkasia suomalaiset olivat mukana löytämässä CERN:issä.

EK

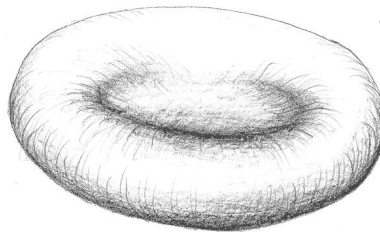
Punasolut välkkyvät kuin tähdet

Veren punasolut ovat muodoltaan pyöreitä, molemmilta puoliltaan koveria kiekkoja, joiden halkaisija on noin $20\mu\text{m}$. Ne koostuvat pääasiassa kaksinkertaisesta fosfolipidikalvosta sekä solulimasta. Joustavan rakenteensa sekä muotonsa ansiosta ne pystyvät kulkemaan jopa itseään pienemmissä verisuonissa.

1900-luvun alussa tutkijat huomasivat, että mikroskoopilla tarkastellut punasolut näyttivät välkkyvän "kuin tähdet pimeänä tähtikirkkaana yönä". Tätä ilmiötä ei tuolloin osattu vielä selittää, ja se kummastutti tutkijoita suuresti. Ilmiölle kehitettiin erilaisia *ad hoc*-selityksiä: jotkut pitivät välkkymistä jopa salaperäisen *elämän voiman* ilmentymänä.

1970-luvulla ranskalainen Nobel-fyysikko Pierre-Gilles de Gennes tutkimusryhmineen osoitti välkkymisen aiheutuvan lämpöliikkeestä. Saattaa tuntua ihmeelliseltä, että yksittäisten molekyylien liikehdintä saattaa aiheuttaa taämän kaltaisia ilmiöitä. Punasolun massa on molekyylien liike-energiaan nähden liian suuri, jotta ne voisivat havaittavissa määrin muuttaa solun liiketilaa —

vaikka molekyylit liikkuvatkin huoneenlämmössä noin 500 metrin sekuntinopeudella. Lisäksi törmäykset osuvat punasoluun tasaisesti joka puolelta.



© Aapo Ahola

Selitys välkkymiseen piilee itse asiassa solun pintarakenteessa: Kaksinkertainen fosfolipidikalvo on kummaltakin puolelta veden ympäröimä, joten pienet liikkeet eivät poikkeuta sitä tasapainotilasta molekyylien välisten hylkimisvoimien suhteen. Kalvoon törmäävien yksittäisten vesimolekyylien liike-energia riittää tällöin muuttamaan hieman sen muotoa. Pinnan osat toimivat kuten pienet peilit, jotka värähte-

levät toisistaan riippumatta. Mikroskoopin valon heijastuminen näistä peleistä aiheuttaa tuikeimmista muistuttavan ilmiön.

Myöhemmin tällaisia ns. *pehmeitä pintoja* on tutkittu paljon, ja ne ovat saaneet paljon käytännön sovelluksia. Niihin liittyvää tietoutta on hyödynnetty jopa alkeishiukkasia koskevissa teorioissa.

Pehmeistä aineista voi lukea lisää Pierre-Gilles de Gennesin ja Jaques Badozin kirjasta "Les objets fragiles" (suomennos: "Hauraat esineet", Terra Cognita 1998).

ST

Ostamme ja myymme kirjoja Antikvariaatti Korkeavuori

Korkeavuorenkatu 13
puh. / fax 176 687

AVOINNA

ark. 11.00-17.15
la 11.00-15.00
su 12.00-16.00