

Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus lukion fysiikan oppikirjoissa

Anna Vankka



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

FYSIIKAN LAITOS

Pro Gradu -tutkielma
Ohjaajat: Jukka Maalampi,
Rauno Julin
13. elokuuta 2012

Tiivistelmä

Lukion fysiikan FY8-kurssilla käsitellään ionisoivan säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta. Kyseessä on aihe, jota osa aineenopettajista on opiskellut vain hyvin suppeasti ja joiden aiheesta antama opetus saattaa sen vuoksi nojautua hyvin vahvasti käytössä olevaan oppikirjaan.

Tässä tutkielmassa on käsitelty ionisoivan säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen perusteita ja koottu yleisimpiä alan tutkimuksen paljastamia ionisoivaan säteilyyn liittyviä ennakko- ja virhekäsityksiä. Lisäksi on arvioitu lukion fysiikan FY8-kurssin oppikirjojen ionisoivan säteilyn käsittelyä lukion opetussuunnitelman perusteiden asettamien tavoitteiden toteutumisen sekä ennakko- ja virhekäsitysten huomioimisen suhteen.

Tutkimusta tehtiin sekä kvalitatiivisesti käsitekartta-analyysin avulla ja kirjojen kuvitusta vertailemalla että kvantitatiivisesti kirjojen sisäisiä painotuksia ja esimerkkien ja tehtävien lukumääriä vertailemalla. Pääpaino oli kvalitatiivisessa analyysissä, joka osoitti, että kaikki oppikirjasarjat noudattavat voimassa olevaa opetussuunnitelmaa ionisoivan säteilyn käsittelyn osalta. Kirjojen välillä havaittiin kuitenkin merkittäviä eroja käsiteltävien aiheiden valinnassa sekä käsittelyn laajuudessa. Myös ennakko- ja virhekäsitysten huomioimisessa havaittiin eroja. Saatujen tulosten perusteella esitettiin parannusehdotuksia oppikirjoihin.

Tämän tutkielman avulla fysiikan aineenopettaja voi täydentää omia pohjatietojaan ionisoivasta säteilystä. Lisäksi tutkielma sopii aiheen käsittelyyn sopivimman oppikirjan valinnan avuksi. Tutkielman tuloksia voidaan käyttää myös oppimateriaalien kehittämisessä.

Kiitokset

Haluan kiittää tutkielmani ohjaajia Jukka Maalampea ja Rauno Julinia arvokkaasta palautteesta, jota sain tätä työtä kirjoittaessani. Haluan kiittää myös oppikirjakustantamoja, joilta sain käyttööni tässä tutkielmassa analysoidut oppikirjat. Lisäksi haluan kiittää Holvin poikia siitä, että he tekivät fysiikan opiskelusta mukavaa, ja Jonnaa siitä, että päätin alkaa opettajaksi. Erityisesti haluan kiittää äitiäni siitä, että hän jaksoi uskoa valmistumiseeni myös niinä hetkinä, kun itse en jaksanut.

Sisältö

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Fysiikan opetus lukion FY8-kurssilla | 3 |
| 2.1 | Fysiikka lukion opetussuunnitelmassa | 3 |
| 2.2 | FY8-kurssin tavoitteet | 4 |
| 3 | Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus | 5 |
| 3.1 | Ionisoiva säteily | 5 |
| 3.2 | Raskaiden varattujen hiukkasten ja aineen kohtaaminen | 5 |
| 3.3 | Elektronin törmäykset aineessa | 6 |
| 3.4 | Gammasäteily | 11 |
| 3.5 | Energiajättö | 15 |
| 3.5.1 | <i>Bethe-Bloch</i> | 15 |
| 3.5.2 | <i>Kantama väliaineessa</i> | 18 |
| 4 | Opetuksen haasteita | 22 |
| 5 | Oppikirja-analyysi | 26 |
| 5.1 | Käsitelkartoista | 26 |
| 5.2 | Lukion fysiikan oppikirjasarjat | 27 |
| 6 | Opetuksen rakenne opetettaessa ionisoivaa säteilyä lukion FY8-kurssilla | 30 |
| 6.1 | FY8-kurssin ajankäyttö | 30 |
| 6.2 | Fysiikan oppikirjojen sisäiset painotukset sekä käsittelyjärjestys . . | 31 |
| 7 | Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus lukion FY8-kurssin oppikirjoissa | 34 |
| 7.1 | Käsitelkarta-analyysi | 34 |
| 7.1.1 | <i>Valosähköilmiö</i> | 34 |
| 7.1.2 | <i>Comptonin ilmiö</i> | 36 |
| 7.1.3 | <i>Röntgensäteily</i> | 38 |
| 7.1.4 | <i>Alfahajoaminen</i> | 39 |
| 7.1.5 | <i>Beetahajoaminen</i> | 40 |
| 7.1.6 | <i>Gammasäteily</i> | 42 |
| 7.2 | Huomioita kirjojen kuvista ja kuvateksteistä | 43 |
| 7.3 | Oppikirja-analyysin yhteenveto | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 8 Johtopäätökset | 51 |
| 8.1 Huomioita oppikirjoista | 51 |
| 8.2 Havaintoja työn tekemisestä | 53 |
| A Käsitekartat lukion fysiikan oppikirjojen keskeisistä sisällöistä ionisoivaan säteilyyn liittyen | 58 |

1 Johdanto

Ionisoivan säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen ymmärtäminen luo perustan säteilyturvallisuuden opiskelulle sekä mahdollistaa esimerkiksi ydinvoimaan liittyvien mielipiteiden rationaalisen muodostamisen. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että opiskelijoilla on ionisoivasta säteilystä virheellisiä ennakkokäsityksiä, ja etteivät nämä virhekäsitykset korjaannu aiheiden pintapuolisella käsittelyllä. Virhekäsityksiä on havaittu myös jo valmistuneiden fyysikoiden ja tulevien fysiikanopettajien keskuudessa. Näitä ionisoivan säteilyn opetukseen liittyviä haasteita käsitellään tarkemmin luvun 4 kirjallisuuskatsauksessa.

Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus sisältyy lukion opetussuunnitelmaan. Sitä käsitellään FY8-kurssilla, joka on valtakunnallisista syventävistä fysiikan kursseista viimeinen. Lukion fysiikan opetusta ja erityisesti tälle kurssille asetettuja tavoitteita käsitellään luvussa 2.

Jyväskylän yliopiston tutkintovaatimukset tuleville fysiikan opettajille sisältävät hyvin vähän ionisoivaan säteilyyn liittyviä pakollisia opintoja. Käytännössä fysiikan opettajaksi voi valmistua lukemalla ydinfysiikan aiheita vain Modernin fysiikan kurssilla, jolla ionisoiva säteilyä käsitellään hyvin lyhyesti [17]. Tämän tutkielman luvussa 3 käsitellään ionisoivan säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta laajemmin kuin valmistuvilta opettajilta tällä hetkellä vaaditaan. Tutkimuksissa on havaittu aiheen laajemmän opiskelun nostavan luonnontieteiden opettajien osaamisen tasoa sekä auttavan muokkaamaan heidän mahdollisesti hyvin negatiivisia ennakoasenteitaan ionisoivaa säteilyä kohtaan positiivisemmiksi ja epärationaalisia käsityksiään rationaalisemmiksi [5] [2]. Luvussa on esitetty oleelliseksi ja hyödylliseksi katsottua taustatietoa opettajalle, jonka tiedot ionisoivan säteilyn ja aineen välisestä vuorovaikutuksesta ovat puutteelliset.

Ionisoivan säteilyn opettamista lukiossa on lähestytty tässä tutkielmassa lukion fysiikan oppikirjasarjojen analysoinnilla. Suomalaisten aineenopettajien on huomattu tukeutuvan opetuksessaan vahvasti käytössä oleviin oppikirjasarjoihin, joten oppikirjan sisällöllä on huomattavan suuri merkitys [12]. Koska monilla fysiikan opettajilla on havaittu puutteita tiedoissaan ionisoivasta säteilystä, korostuu oppikirjojen sisällön merkitys entisestään [5].

Analysoidut oppikirjasarjat ovat Otavan Fotoni [33], Tammen Fysiikka [10] ja WSOY:n Physica [15]. Oppikirjoista tehty analyysi on osin kvantitatiivista, mutta pääpaino on kvalitatiivisessa käsittekartta-analyysissä. Käytetyt analyysimenetel-

mät sekä aineisto on esitelty tarkemmin luvussa 5.

Luvussa 6 on käsitelty erilaisia tapoja suunnitella FY8-kurssin ajankäyttö. Lisäksi on vertailtu oppikirjojen sisäisiä painotuksia ja käsittelyjärjestyksiä ionisoivan säteilyn osalta.

Varsinainen oppikirja-analyysi on esitetty luvun 7 kappaleessa 7.1, ja sen pääpaino on oppikirjojen sisällön kvalitatiivisessa vertailussa kirjojen sisällöistä tehtyjen käsitekarttojen avulla. Analyysissa kiinnitettiin erityistä huomiota lukion opetussuunnitelman perusteiden toteutumiseen oppikirjojen pohjalta opetettaessa ja opiskelijoiden mahdollisten ennakko- ja virhekäsitysten huomiomiseen. Saman luvun toisessa kappaleessa on tarkasteltu suppeasti oppikirjojen ionisoivaan säteilyyn liittyvää kuvitusta ja kuvatekstejä. Tämän tarkastelun pääpaino on oppikirjojen kuvien virheissä sekä mahdollisesti syntyvissä virhekäsityksissä. Kaikkien oppikirjojen havaittiin toteuttavan lukion opetussuunnitelman perusteet, mutta kirjojen sisällöissä havaittiin myös paljon eroavaisuuksia. Näitä eroavaisuuksia on tarkasteltu kappaleessa 7.3.

Johtopäätöksissä on tuotu esille tärkeimpiä eroavaisuuksia kirjojen välillä ja käsitelty karkeimpia oppikirjoissa esiintyviä puutteita. Myös kirjallisuudesta poimittujen ennakkokäsitysten huomioimista on kommentoitu. Johtopäätöksissä on lisäksi esitetty joitakin parannusehdotuksia lukion fysiikan oppikirjojen ionisoivan säteilyn käsittelyyn.

2 Fysiikan opetus lukion FY8-kurssilla

2.1 Fysiikka lukion opetussuunnitelmassa

Lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaan opiskelijalle tulee tarjota mahdollisuus käsitellä ja tulkita vastaanottamansa uusi informaatio aiempien tietorakenteidensa pohjalta. Lisäksi opetussuunnitelman mukainen lukio-opetus pohjautuu oppimiskäsitykseen, jonka mukaan opiskelija oppii toimimalla aktiivisesti ja tavoitteellisesti vuorovaikutuksessa muiden opiskelijoiden, opettajan ja ympäristön kanssa. [26]. Tällaista oppimiskäsitystä kutsutaan konstruktivistiseksi, ja sen alkuunpanijana voidaan pitää Jean Piaget'a, joka esitti opiskelijan rakentavan tietoa etsimällä aktiivisesti merkityksiä. Yksi tärkeimpiä tämän oppimiskäsityksen kehittäjiä oli Lev Vygotsky, joka korosti oppimistapahtuman sosiaalisuutta. Tämän sosiokulttuurisen näkökulman mukaan opettajan tulee toimia välittäjänä oppilaiden ja tieteellisen tiedon välillä. Opettajan tehtäväksi nähdään oppilaiden tukeminen heidän kehityksessään tasolta, jolla he jo pystyvät ratkaisemaan itsenäisesti ongelmia, tasolle, jolla he kykenevät toimimaan opettajan ohjauksessa tai yhteistyössä lahjakkaampien oppilaiden kanssa [36]. Viime aikoina Vygotskyn näkemys on jälleen noussut ajankohtaiseksi, sillä luonnontieteiden opetusta on kehitetty sen suuntaiseksi. Oppiminen nähdään entistä enemmän ohjattuna osallistumisena tunnin kulkuun, jolloin opettajan roolina on keskustelun johtaminen [35]. Mielikuva opettajasta luennoimassa luokan edessä oppilaiden kuunnellussa passiivisina tuntuukin tänä päivänä vanhanaikaiselta. [7, s.265]

Lukion fysiikan opetuksesta lukion opetussuunnitelman perusteet nostaa esiin fysiikan empiirisen luonteen ja pyrkimyksen löytää luonnosta yleispäteviä lainalaisuuksia ja esittää ne matemaattisina malleina. Opetussuunnitelmassa korostetaan kokeellisuutta, mutta opettajalle annetaan vapaus valita tapa toteuttaa kokeellisuus opetuksessa kulloiseenkin aiheeseen sopivasti. Kokeellisuus lukion fysiikan opetuksessa voi olla paitsi oppilaan tai opettajan kokeellista työskentelyä, myös videoiden, vierailujen tai kerronnan kautta tapahtuvaa toimintaa. Kokeellisuuden tavoitteeksi mainitaan uusien luonnontieteellisten käsitteiden, mallien ja periaatteiden omaksumisen tukeminen. Lisäksi opiskelija oppii yhteistyön ja kokeellisen työskentelyn taitoja sekä oppii hahmottamaan luonnontieteiden kokeellista luonnetta. [26]

Lukion opetussuunnitelman perusteissa on fysiikan opetukselle asetettu useita tavoitteita. Opiskelijan tulisi oppia tiedostamaan ihminen osana luontoa ja ym-

märtää fysiikan merkitys luonnonilmiöiden mallintamisessa. Lisäksi hänen tulisi oppia jäsentämään käsitystään luonnon rakenteista ja ilmiöistä fysiikan periaatteiden ja käsitteiden avulla. Hänen tulisi myös ymmärtää teoreettisen pohdiskelun ja kokeellisen toiminnan merkitys luonnontieteellisen tiedon muodostumisessa sekä hahmottaa fysiikan merkitys laaja-alaisesti, kuten sen ilmeneminen tieteessä, taiteessa sekä ihmisen arkiympäristössä. Opiskelijan tulisi oppia vaikuttamaan aktiivisesti ja vastuullisesti ympäristönsä kehitykseen sekä osata ratkaista luonnontieteiden ja teknologian alaan kuuluvia ongelmia fysiikan käsitteitä ja lakeja hyväksi käyttäen. Hänen tulisi oppia hyödyntämään erilaisia tietolähteitä ja teknisiä apuvälineitä monipuolisesti sekä esitelmissä että muiden opiskelijoiden kanssa uutta tietoa käsitellessään. Lisäksi hänen tulisi kyetä suunnittelemaan ja tekemään yksinkertaisia mittauksia sekä tulkitsemaan, arvioimaan ja soveltamaan saamiaan tuloksia. [26]

2.2 FY8-kurssin tavoitteet

Aine ja säteily (FY8) -kurssille on lukion opetussuunnitelman perusteissa annettu seuraavat tavoitteet: opiskelija tutustuu dualismiin, kvantittumiseen sekä aineen ja energian ekvivalenssiin aineen rakennetta ja rakenneosien dynamiikkaa hallitsevina periaatteina. Lisäksi opiskelijan tulee syventää kokonaiskuvaansa fysiikan kehityksestä ja sen pätevyysalueesta luonnonilmiöitä tulkittaessa. Kurssin keskeisiksi sisällöiksi on mainittu sähkömagneettinen säteily, röntgensäteily, mustan kappaleen säteily, valosähköilmiö, säteilyn hiukkasluonne ja hiukkasten aaltoluonne, atomimallit, kvantittuminen, viivaspektri, atomin energiatilat ja energiata-sokaavio, atomiytimen rakenne, radioaktiivisuus ja säteilyturvallisuus, massan ja energian ekvivalenssi, ydinreaktiot ja ydinenergia sekä aineen pienimmät osat ja niiden luokittelu. [26]. Näistä tavoitteista tässä tutkielmassa käsitellään tai sivutaan seuraavia: röntgensäteily, valosähköilmiö, säteilyn hiukkasluonne ja hiukkasten aaltoluonne, kvantittuminen, atomin energiatilat, atomiytimen rakenne sekä radioaktiivisuus ja säteilyturvallisuus.

3 Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus

3.1 Ionisoiva säteily

Ionisoivaksi säteilyksi kutsutaan säteilyä, jolla on kyky ionisoida väliaineessa kohtaamiaan atomeja tai molekyyliä. Röntgensäteily sekä α -, β -, γ - ja neutronisäteily ovat säteilylajeja, joilla on tällainen kyky. Seuraavassa selvitetään lyhyesti miten erilaiset varatut hiukkaset vuorovaikuttavat väliaineen kanssa. Koska esimerkiksi hiukkasen massalla on suuri merkitys siihen, miten varattu hiukkanen kokee väliaineen vaikutuksen, raskaiden varattujen hiukkasten, elektronien ja gammasäteilyn vuorovaikutus väliaineen kanssa käsitellään erikseen. Raskaiksi hiukkasiksi tässä tutkielmassa luetaan protoni ja sitä raskaammat hiukkaset. Neutroneita ei käsitellä. Tärkeimpinä lähteinä on käytetty Lilley'n [21], Kranen [20] ja Kanteleen [18] ydinfysiikan perusteita ja spektrometriaa käsitteleviä teoksia.

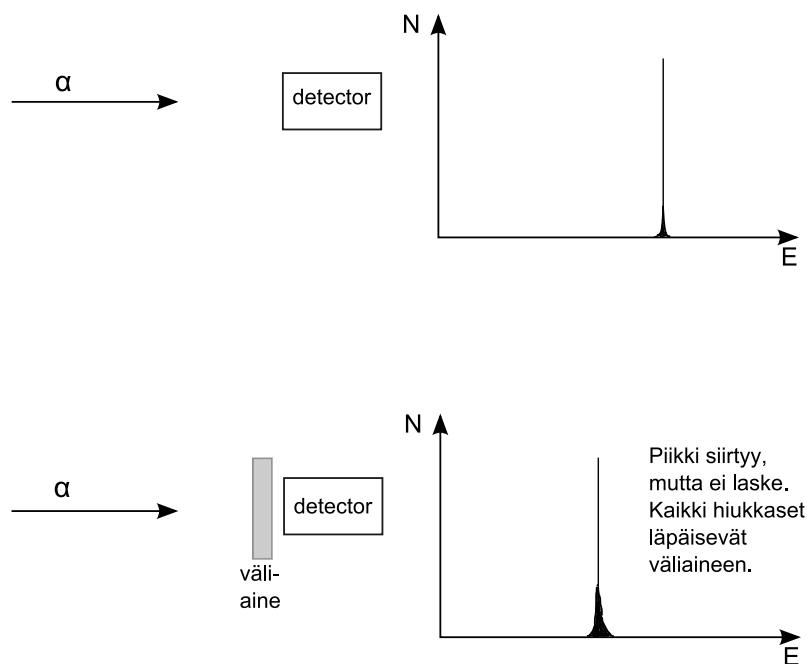
3.2 Raskaiden varattujen hiukkasten ja aineen kohtaaminen

Elektronia raskaammat varatut hiukkaset menettävät väliaineessa energiaansa pääasiallisesti törmäyksissä väliaineen elektronien kanssa. Raskas hiukkanen menettää vain vähän energiaa yhdessä törmäyksessä, sillä liikemäärä säilyy ja jo protonin massa on paljon suurempi kuin elektronin.

Sekä väliaineen ytimet että elektronit tuntevat Coulombin vuorovaikutuksen ionin kulkiessa väliaineessa, mutta törmäykset ydinten kanssa ovat hyvin epätodennäköisiä, jos ei ole kyse pienistä energioista.

Koska Coulombin vuorovaikutus on jatkuva, on myös siitä aiheutuva voimakenttä jatkuva, vaikka törmäyksistä aiheutuva energian menetys ei itsessään ole jatkuva. Tämän takia jo pienikin kerros väliainetta vaikuttaa hiukkasten energiaan, mikä näkyy kuvassa 1 saapuvan α -säteilyn energiapiikin siirtymisenä. Monoenergeettisen säteilyn vaimeneminen aineessa on jokaisella suihkun raskaalla hiukkasella suunnilleen samanlaista, joten raskaiden hiukkasten kantama väliaineessa voidaan määrittää melko tarkasti.

Kun raskaat hiukkaset kulkevat väliaineessa, ne kykenevät ionisoimaan sitä enemmän atomeja, mitä hitaammin ne kulkevat. Tämä ilmenee ns. Braggin kuvaajasta (kuva 2), josta näkyy kuinka hiukkasten ionisointikyky on suurimmillaan juuri ennen niiden pysähtymistä. Tällä on paljon sovelluksia esimerkiksi lääketieteessä,



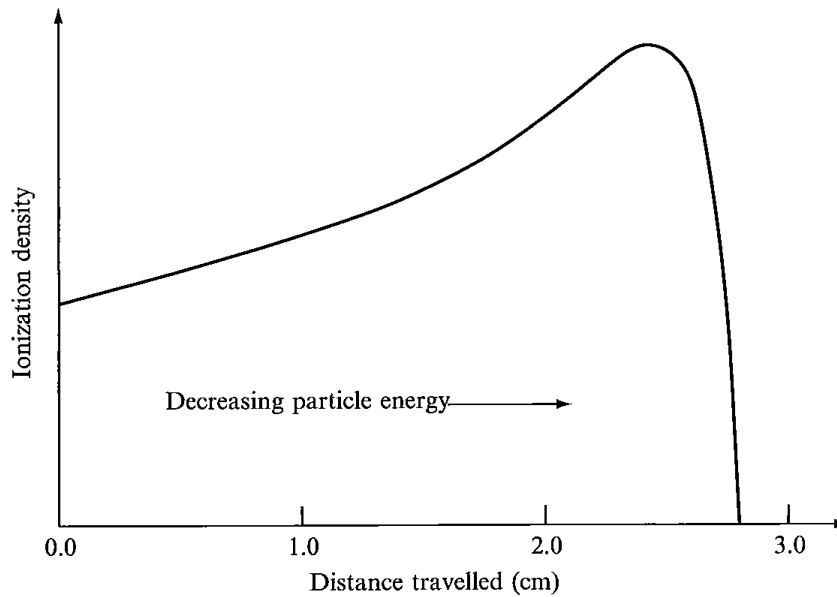
Kuva 1. Väliaineen vaikutus monoenergeettisen α -säteilyn energiaspektriin ideaalisessa tilanteessa, jossa ei ole taustasäteilyä. Kun väliainekerros on tarpeeksi ohut, läpäisevät kaikki α -hiukkaset sen. Niiden energia kuitenkin pienenee väliaineen läpi kuljettaessa, ja tämä näkyy energiapiikin siirtymisenä.

jossa kasvaimia säteilytettäessä saadaan kohdistettua suuri energia itse kasvaimen ja vain pieni energia säteilylähteen ja kasvaimen välissä olevaan kudokseen. Juuri kantaman lopussa tapahtuva ionisaatioitiheyden romahdus aiheutuu siitä, että ionien nopeuden hidastuessa tarpeeksi, ne kykenevät sieppaamaan väliaineesta elektroneja, jolloin niiden varaus pienenee.

Raskas ioni luovuttaa kulkiessaan energiaansa väliaineen elektroneille. Näitä liike-energiaa saaneita elektroneja kutsutaan sekundaarisiksi elektroneiksi tai δ -elektroneiksi, ja ne voivat edelleen vuorovaikuttaa väliaineen kanssa seuraavassa luvussa kuvatuin tavoin.

3.3 Elektronin törmäykset aineessa

Elektronien vuorovaikutus väliaineen kanssa riippuu niiden energiasta. Pienillä energioilla elektronit vuorovaikuttavat pääasiallisesti väliaineen vapaiden elektronien kanssa. Jos elektronien energia on kuitenkin tarpeeksi suuri, ne kykenevät irrottamaan väliaineen atomien sidottuja elektroneja ionisoiden näin väliaineen atomeja.



Kuva 2. α -säteilyn intensiteetin vaimeneminen sen kulkiessa väliaineessa (ilmassa). Hiukkanen hidastuu kulkiessaan väliaineessa, jolloin se kykenee ionisoimaan väliainetta tehokkaammin. Braggin kuvaajalle tyypillinen huippu syntyy, kun hiukkasen ionisaatiokyky saavuttaa maksiminsa juuri ennen kuin sen nopeus on tarpeeksi pieni elektronisieppauksen tapahtumiseksi. Ionisaatiokyvyn laskeminen juuri ennen hiukkasen pysähtymistä johtuukin hiukkasen varauksen pienenemisestä. [21]

Tärkeimmät elektronien vuorovaikutustavat väliaineessa ovat epäelastinen sironta, Rutherfordin sironta, jarrutus säteily ja positroniannihilaatio. Näitä vuorovaikutuksia voidaan tutkia absorptio, sironnan ja sekundaarisäteilyn määrän avulla [18, s. 132]. Elektronisuihku voi olla joko monoenergeettinen, jolloin kaikilla suihkun elektroneilla on sama energia, tai jatkuv-spektrinen, jollaista on esimerkiksi β -hajoamisessa syntyvä β -säteily.

Toisin kuin raskaat hiukkaset, elektronit menettävät usein suuren osan energiansaatan jo yhdessä törmäyksessä väliaineen elektronien kanssa. Tämä johtuu siitä, että elektronien massa on huomattavasti raskaiden hiukkasten massaa pienempi, jolloin törmäys toisen samanmassaisen hiukkasen kanssa mahdollistaa liikemäärän säilymislain mukaisesti suuren liike-energian menetyksen. Energian menetys on suurin, kun elektronit törmäävät 180° kulmassa. Kohde-elektronin ollessa levossa törmäyskulmalla ei kuitenkaan ole merkitystä energian luovutuksen kannalta. Törmäyksien takia elektronien rata väliaineessa ei ole suora, mutta niiden kantama

on silti pitkä.

Epäelastinen sironta

Elektronit voivat sirota epäelastisesti väliaineen atomien elektroneista. Epäelastinen sironta elektronien kanssa johtaa väliaineen atomin virittymiseen ja ionisaatioon.

Rutherfordin sironta

Rutherfordin sironta on elektronin elastista sirontaa ytimistä. Tämä prosessi aiheuttaa toteutuessaan suuria muutoksia elektronin suuntaan. Elastinen sironta väliaineen atomien elektroneista on merkittävää vain energiolla, jotka ovat pienempiä kuin 100 eV.

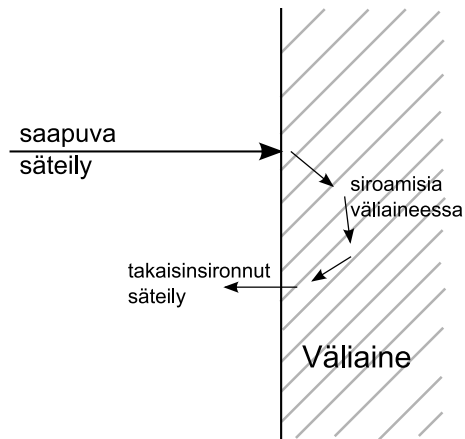
Takaisinsironta

Tyypillisesti elektroni muuttaa kulkusuuntaansa jokaisessa törmäyksessä, ja se voi lopulta jopa tulla väliaineesta ulos takaisin kulkusuuntaansa, kuten kuvassa 3 on havainnollistettu. Tätä kutsutaan takaisinsironnaksi.

Takaisinsironnan todennäköisyyttä voidaan kuvata takaisinsirontakertoimella η , joka saadaan takaisinsironneiden ja väliaineeseen osuneen suihkun elektronien lukumäärän suhteesta. Takaisinsirontakerroin kasvaa huomattavasti, kun väliaineen järjestysluku Z kasvaa. Esimerkiksi 100 keV:n elektronisuihkun osuessa kultaan kerroin η on noin 0,50 kun se alumiinille on 0,04. Takaisinsironnan todennäköisyys pienenee, kun säteilyn energia kasvaa. Esimerkiksi kuparille on saatu 100 keV:n energialla kertoimeksi $\eta = 0,28$ ja 10 MeV:n energialla $\eta = 0,04$. Myös säteilyn tulokulma aineeseen vaikuttaa takaisinsironnan todennäköisyyteen siten, että todennäköisyys on pienin säteilyn tullessa väliaineen pinnan normaalin suuntaisesti. [18, s. 139]

Sekundaariset elektronit

Elektroneja, jotka aineeseen osuva elektronisäteily irrottaa atomeista, kutsutaan sekundaarisiksi elektroneiksi eli δ -elektroneiksi. Ne voivat edelleen irrottaa uusia sekundaarisia elektroneja tai vuorovaikuttaa muilla tavoin väliaineen atomien



Kuva 3. Takaisinsironnassa osa väliaineeseen tulleesta säteilystä poistuu väliaineesta tulosuuntaan. Tämä saattaa tapahtua vasta useiden väliaineessa tapahtuneiden törmäyksien jälkeen, kuten tässä kuvassa.

kanssa. Useimmiten viimeiseksi havaittu elektroni ei ole alkuperäinen väliaineeseen tullut elektroni vaan jokin sekundaarisista elektroneista.

Jarrutussäteily

Elektronien tapauksessa havaitaan myös jarrutussäteilyä (Bremsstrahlung). Sitä syntyy elektronien kiihtyessä ja hidastuessa ytimien sähkökentissä. Jarrutussäteily on merkittävää suurilla energioilla (useita MeV). Monoenergeettisten elektronien kokonaisenergiasta säteilee jarrutussäteilyä osuus [18, s. 141]

$$\frac{E_{jarrutus}}{E_{tot}} \approx 0,0007 \cdot Z E_{tot},$$

jossa $E_{jarrutus}$ on säteilleen energian määrä, E_{tot} on elektronin kokonaisenergia MeV:eissä ja Z on väliaineen järjestysluku. Tämä arvio pätee elektroneille vain keskimääräisesti. Todellisuudessa osa elektroneista säteilee kaiken energiansa ja osa ei säteile lainkaan.

Jatkuvaspektriselle β -säteilylle saadaan säteilyn osuudeksi [18, s. 143]

$$\frac{E_{jarrutus}}{E_{ave}} \approx 0,0003 \cdot Z E_0,$$

jossa $E_{jarrutus}$ on säteilyn energian määrä, E_{ave} on β -elektronien keskimääräinen energia ja E_0 on β -säteilyn spektrin päätepiste-energia.

Hidastuvalle elektronille voidaan myös määritellä väliaineesta riippuva suure nimeltä kriittinen energia E_{crit} . Kun elektronin energia on kriittistä energiaa suurempi, jarrutussäteily on merkittävin vuorovaikutus tavoista. Kriittinen energia voidaan laskea yhtälöstä [21, s. 142]

$$E_{crit} = \frac{800}{Z + 1,2} \text{ MeV}, \quad (1)$$

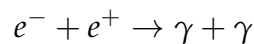
jossa Z on väliaineen järjestysluku. Yhtälöstä (1) nähdään, että mitä suurempi väliaineen järjestysluku on, sitä pienempi on elektronien kriittinen energia. Jarrutussäteily tulee siis merkittäväksi alhaisemmilla energioilla. Kriittisen energian alapuolella merkittävimpiä prosesseja energiajätön kannalta ovat törmäykset väliaineen elektronien kanssa. Esimerkiksi lyijylle $Z_{Pb} = 82$ saadaan yhtälöstä (1) kriittinen energia

$$E_{crit} = \frac{800}{82 + 1,2} \text{ MeV} \approx 9,6 \text{ MeV}.$$

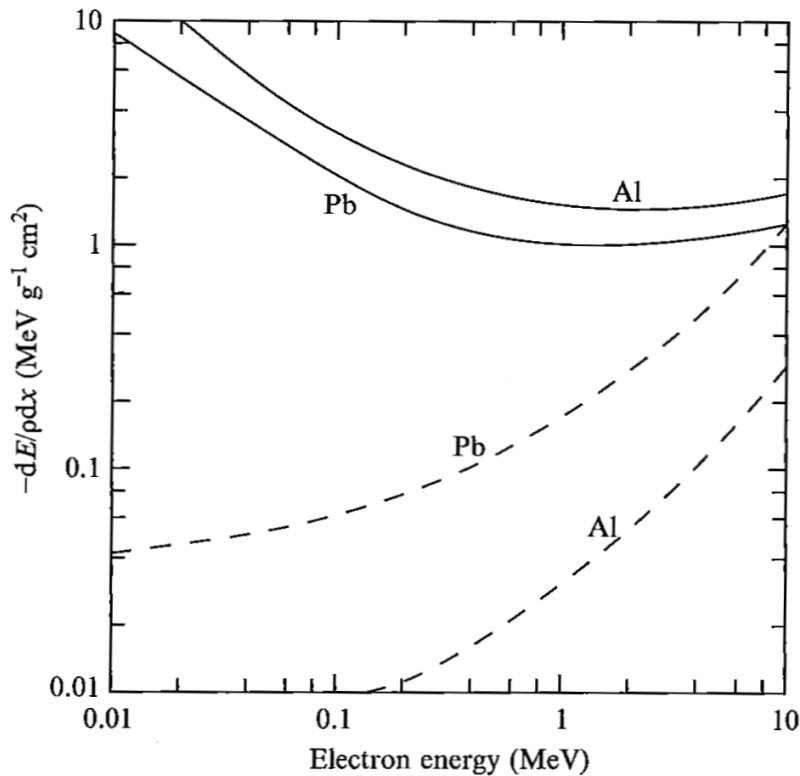
Tämän voi havaita myös kuvasta 4, jossa on esitetty elektronin energiajätö aluminiissa sekä lyijyssä.

Positroniannihilaatio

Positroni voi väliaineessa vuorovaikuttaa aineen elektronin kanssa. Tätä tapahtumaa kutsutaan positroniannihilaatioksi. Positroniannihilaatiossa elektroni ja positroni häviävät ja syntyy kaksi γ -fotonia, jotka molemmat saavat energian 0,511 MeV:



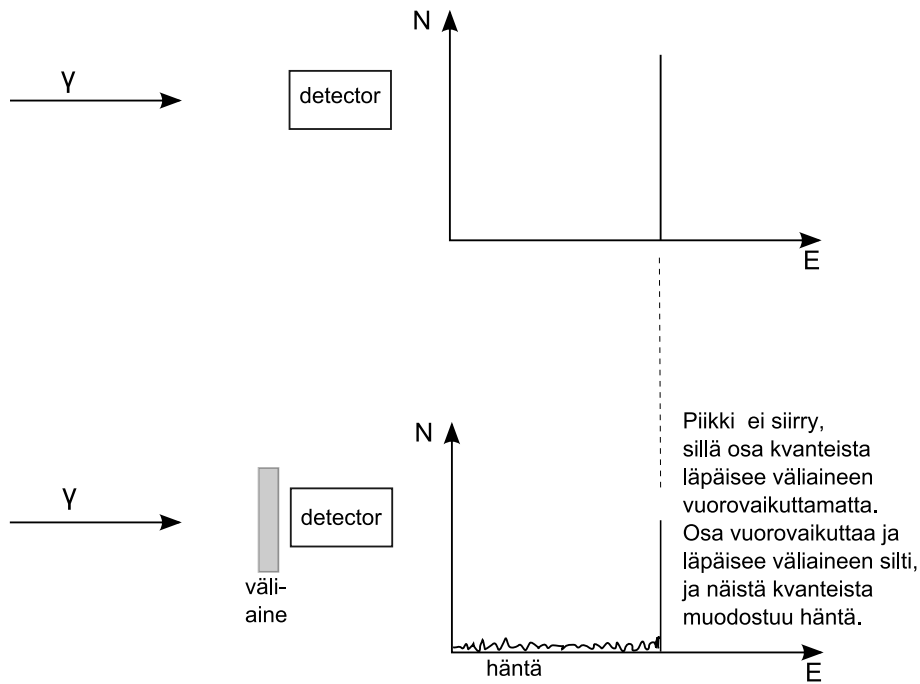
Elektronin ja positronin massat muuttuvat siis γ -kvanttien energiaksi. Annihilaatio on todennäköistä vain, kun positroni on pysähtynyt. Muodostuneiden fotonien suunnat määräytyvät liikemäärän säilymislain mukaisesti. Fotonit voivat vuorovaikuttaa edelleen väliaineessa. Annihilaatio voi tapahtua myös lennossa (in-flight-annihilation), mutta tämän todennäköisyys on hyvin pieni.



Kuva 4. Elektronin energiajätto alumiinissa ja lyijyssä. Katkoviivalla on merkitty jarrutussäteilystä aiheutuva energiajätto ja yhtenäisellä viivalla muista tekijöistä johtuva energiajätto. Mitä suurempi elektronin energia on, sitä suurempi osa sen energiajätöstä väliaineessa on peräisin jarrutussäteilystä. Kuvasta nähdään, että kun elektronin energia on yli 10 MeV, aiheutuu sen energiajätöstä lyijyssä suurin osa jarrutussäteilystä. Koska alumiinin järjestysluku ($Z = 13$) on pienempi kuin lyijyn ($Z = 82$), ei jarrutussäteilyn osuus energiajätöstä ole siinä yhtä suuri. [21]

3.4 Gammasäteily

Gammasäteilyn vuorovaikutus väliaineen kanssa poikkeaa merkittävästi elektronien ja raskaiden hiukkasten vuorovaikutuksista. Suurin eroavaisuus on se, että γ -säteily ei tunne Coulombin vuorovaikutusta, minkä vuoksi se voi kulkea väliaineen läpi vuorovaikuttamatta. γ -säteily vaimenee eksponentiaalisesti, sillä sen vuorovaikutustodennäköisyys väliaineessa on pieni. Vain pieni osa γ -kvanteista vuorovaikuttaa hyvin ohuessa väliainekerroksessa ja suurin osa niistä läpäisee väliaineen vuorovaikuttamatta. Tämä näkyy kuvasta 5: havaitun γ -säteilyn energiapiikin paikka ei siirry, vaikka ilmaisimen ja saapuvan säteilyn väliin lisätään väliainekerros. Täysenergisten γ -säteiden määrä, eli piikin pinta-ala, kuitenkin



Kuva 5. Väliaineen vaikutus monoenergeettisen γ -säteilyn energiaspektriin ideaalitilanteessa, jossa ei ole taustasäteilyä. Vain osa γ -kvanteista vuorovaikuttaa väliaineessa, osa läpäisee väliaineen täysin vuorovaikuttamatta. Jos väliainetta on vain ohuelti, suurin osa γ -kvanteista ei vuorovaikuta. Tämä näkyy kuvasta siten, ettei γ -säteilyn energiaspekttrin piikki siirry. Se kuitenkin madaltuu, sillä osa γ -kvanteista vuorovaikuttaa väliaineen kanssa eikä tule enää piikkiin. Vuorovaikuttaneet γ -kvantit saattavat kuitenkin läpäistä väliaineen, jolloin ne muodostavat energiaspektriin hännän.

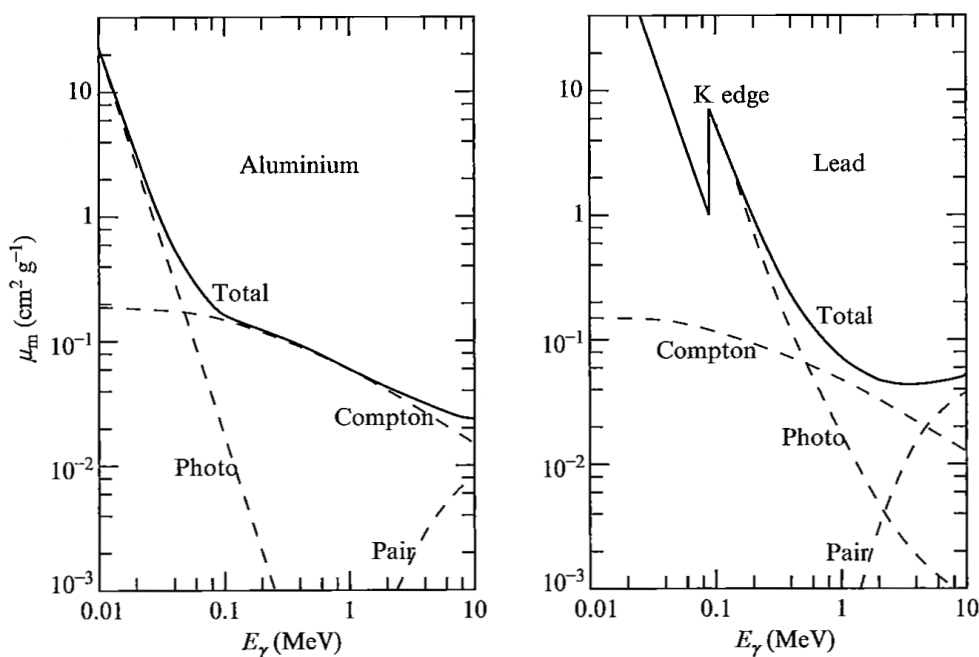
pienenee, sillä väliaineessa vuorovaikuttaneet γ -kvantit eivät enää tule piikin kohdalle vaan muodostavat spektrin matalaenergisestä "hännän".

Ekspontiaaliselle vaimenemiselle väliaineessa pätee

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

jossa I on säteilyn intensiteetti säteilyn kuljettua väliaineessa matkan x , I_0 on säteilyn intensiteetti sen tullessa väliaineeseen ja μ on väliaineen ainekohtainen vakio. Kuvassa 5 I vastaa ylemmässä kuvassa olevan piikin intensiteettiä (pinta-alaa) ja I_0 alemmassa kuvassa olevan piikin intensiteettiä.

γ -kvantti voi luovuttaa väliaineessa kaiken energiansa jo yhdessä törmäyksessä kokonaan elektronille tai kulkea väliaineen läpi vuorovaikuttamatta lainkaan. Tämän vuoksi sen kantaman määrittäminen on mahdotonta.



Kuva 6. Fotonien massa-absorptiokertoimet, μ_m , alumiinissa ja lyijyssä fotonien energian funktiona. Ehjä viiva kuvaa kokonaiskerrointa ja katkoviiva kertoimen osatekijöitä, joita ovat valosähköinen ilmiö, Compton-sironta ja parinmuodostus. Pienillä energioilla dominoi valosähköinen ilmiö, sen jälkeen energiaa kasvatettaessa dominoi Compton-sironta ja hyvin suurilla energioilla dominoi parinmuodostus. Verrattaessa absorptiokertoimia alumiinissa ja lyijyssä huomataan, että lyijyssä valosähköinen ilmiö sekä parinmuodostus ovat merkittävämpiä suhteessa alumiiniin. Tämä johtuu lyijyn suuremmasta järjestysluvusta Z . Lyijyn kuvaajassa on lisäksi nähtävissä K-piikki. [21]

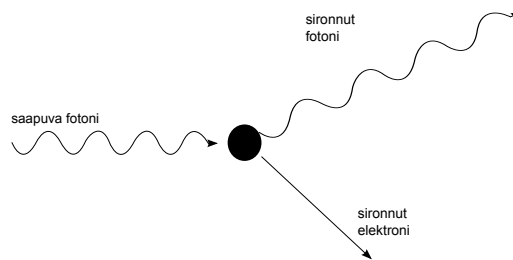
Tärkeimmät γ -säteilyn vuorovaikutustavat ovat Compton-sironta, valosähköinen ilmiö ja parinmuodostus. γ -säteilyllä on myös muita vuorovaikutustapoja, mutta niiden osuudet ovat paljon edellä mainittuja pienempiä [18, s. 119]. Mikä näistä vuorovaikutustavoista milloinkin dominoi, riippuu γ -säteilyn energiasta. Tämä käy ilmi kuvasta 6, jossa on esitetty fotonien massa-absorptiokertoimet alumiinissa ja lyijyssä.

Valosähköisessä ilmiössä on kyse siitä, että γ -säteily vuorovaikuttaa sidotun elektronin kanssa. Tällöin fotoni luovuttaa koko energiansa väliaineen atomin sidotulle elektronille, ja atomi virittyy. Jos γ -säteilyn energia on tarpeeksi suuri (eli suurempi kuin atomin elektronien sidosenergia), se kykenee irrottamaan väliaineen virittyneestä atomista elektronin, joka puolestaan voi virittää läheisiä atomeja. Kynnystaajuus (eli kriittinen taajuus), jonka fotoni tarvitsee kyetäkseen irrottamaan

väliaineen atomista elektronin, riippuu väliaineen ominaisuuksista.

Jos väliaineen atomi on menettänyt valosähköisen ilmiön seurauksena jonkin sisempien elektronikuoriensa elektroneista, voi se purkaa viritystilaansa vapauttamalla vähemmän sidotun elektronin. Näitä lähetettyjä elektroneja kutsutaan Auger-elektroneiksi. Toinen ja yleisempi vaihtoehto viritystilan purkamiseksi on täyttää sisemmälle elektronikuorelle syntynyt vajuus jollakin ulompien elektronikuorten elektroneista, jolloin emittoituu karakteristinen röntgenfotoni. Tämä ilmiö tunnetaan nimellä röntgenfluoresenssi. Syntynyt röntgensäteily voi vuorovaikuttaa väliaineessa ja absorboitua siihen.

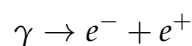
Compton-sironta puolestaan ilmenee siten, että aineeseen saapuva gammasäteily vuorovaikuttaa väliaineessa vapaan (tai heikosti sidotun) elektroniin, jolloin elektroni saa liike-energiaa (kuva 7).



Kuva 7. Kaavakuva Compton-sironnasta

Jos sironneen γ -kvantin energia on törmäyksen jälkeen yhä tarpeeksi suuri, se voi vuorovaikuttaa Compton-sironnan välityksellä uuden vapaan elektronin kanssa. Jos γ -kvantin energia laskee hyvin alhaiseksi sironnassa, kasvaa valosähköisen ilmiön tapahtumisen todennäköisyys, kuten kuvasta 6 voi nähdä. Liike-energiaa saanut elektroni voi puolestaan vuorovaikuttaa aineessa luvussa 3.3 kuvatuilla tavoilla.

Jos γ -kvantin energia on suurempi kuin kahden elektronin lepomassa $E_\gamma = 2 \cdot 511 \text{ keV}$, se voi vuorovaikuttaa väliaineessa myös parinmuodostuksen kautta. Parinmuodostuksessa γ -kvantti muuttuu elektroni-positroni-pariksi:



Koska parinmuodostukseen vaadittava energia on melko suuri, ilmiö on todennäköinen vain suurilla energioilla. Se on merkittävä γ -säteilyn vuorovaikutustapa vasta useiden MeV:ien energioilla. Parinmuodostuksessa osa γ -kvantin energiasta

muuttuu elektronin ja positronin massaksi. Elektronin ja positronin saavat liike-energiaa määrän, joka γ -kvantin energiasta jää jäljelle, kun siitä vähennetään syntyvien hiukkasten massojen energiaosuus $E_\gamma = 1022 \text{ keV}$. Syntyneet elektronit ja positronit vuorovaikuttavat edelleen väliaineessa luvussa 3.3 kuvatuilla tavoilla.

3.5 Energiajätö

3.5.1 Bethe-Bloch

Hans Bethe kehitti 1930-luvulla yhtälön, jonka avulla voidaan laskea hiukkasen energiajätö väliaineessa. Tätä yhtälöä kutsutaan usein myös Bethe-Blochin yhtälöksi, ja se voidaan esittää muodossa

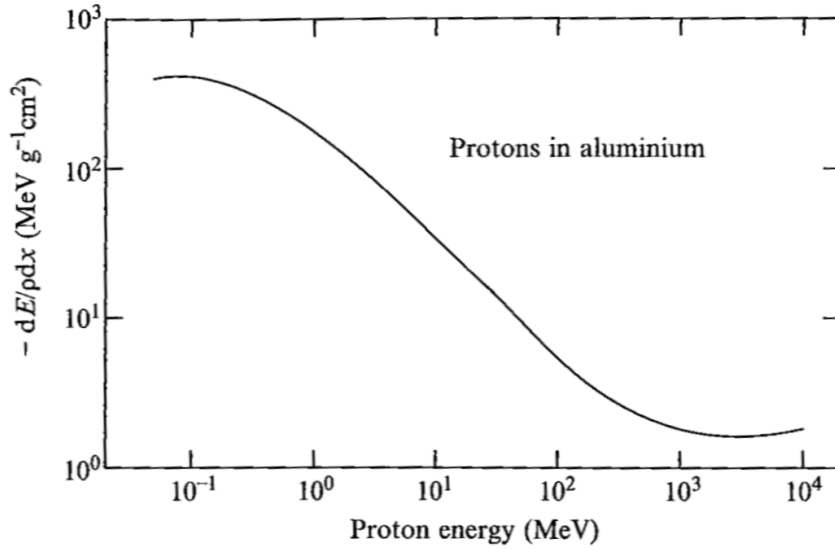
$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi Z\rho N_A}{Amv^2} \left[\ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right], \quad (2)$$

jossa $v = \beta c$ on ionin nopeus, z on ionin varausluku, N_A on Avogadron vakio ja Z , A ja ρ ovat väliaineen atomien järjestysluku, atomimassaluku ja väliaineen tiheys. I on väliaineen atomien elektronien keskimääräinen ionisaatiopotentiaali. [21, s. 130].

Varatun hiukkasen kulkiessa väliaineessa siirtää sähköinen impulssi (voima \times törmäysaika) liikemäärän p elektronille. Tällöin siirtynyt energia on verrannollinen sähköisen voiman $ze^2/4\pi\epsilon_0$ neliöön, energian siirtymiseen kuluneen ajan neliöön $1/v^2$ sekä kääntäen verrannollinen hiukkasen massa m . Lisäksi energian siirtyminen on suoraan verrannollinen myös elektronien tiheyteen väliaineessa $Z\rho N_A/A$. [21, s. 131]

Kirjallisuudesta löytyy paljon taulukoituja arvoja eri aineiden energiajätöille. Usein energiajätö annetaan yksiköissä $dE/\rho dx$ eli pintatiheytenä, joka saadaan kun jaetaan yhtälön (2) antama energiajätö väliaineen tiheydellä ρ . Tämä on kätevää, koska energiajätö määritetään väliaineen atomien elektronien kanssa tapahtuneista törmäyksistä ja se riippuu näin ollen väliaineen tiheydestä. Suure $dE/\rho dx$ ei riipu väliaineen tiheydestä, joten se on yhtä suuri esimerkiksi jäälle ja höyrylle. Kuvassa 8 on esitetty protonin energiajätö $dE/\rho dx$ protonin energian funktiona. Se on varsin tyypillinen energiajätön kuvaaja.

Yhtälö (2) toimii hyvin, kun hiukkasen energia on yli 0,3 MeV. Tätä pienemmällä energioilla yhtälö antaa todellista pienemmän energiajätön. Hyvin pienillä ener-



Kuva 8. Protonin energiajätto alumiinissa protonin energian funktiona. Kuvasta nähdään, että hiukkasen energiajätto kasvaa aluksi sen energian kasvaessa ja saavuttaa huippunsa nopeasti. Tämän jälkeen hiukkasen energian edelleen kasvaessa energiajätto pienenee siten, että se saa miniminsä n. 3 GeV:n kohdalla. Minimien jälkeen hiukkasen energian yhä kasvaessa kasvaa myös energiajätto uudelleen, joskaan sen muutokset eivät ole yhtä voimakkaita kuin pienillä energioilla. [21]

gioilla yhtälö saavuttaa ensin maksiminsa ja pienenee sen jälkeen energian lähes työssä nolaa. Näin pienillä energioilla hiukkasen nopeus on niin pieni, että suurin mahdollinen energiajätto on suunnilleen yhtä suuri kuin väliaineen ionisaatiopotentiaali I . Tällöin logaritminen termi menee nolnaan. Lisäksi hiukkasen energia on niin pieni, että elektronisieppauksen ja menetyksen todennäköisyydet kasvavat merkittäviksi. Hiukkasen varauksen ei voida enää olettaa pysyvän vakiona. Varauksen väheneminen näkyy puolestaan energiajätön pienenemisenä, jota Bethe-Blochian yhtälö ei huomioi. Mitä raskaampi hiukkanen on, sitä merkittävämpää varauksen muuttuminen sille on, sillä raskaammat hiukkaset tarvitsevat suuremman energian kyetäkseen irrottamaan väliaineen atomien sisimpiä elektroneja. [21, s. 132]

Pienillä energioilla $\beta \ll 1$, jolloin yhtälö (2) sieventyy muotoon

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi Z\rho N_A}{Amv^2} \left(\ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right) \right). \quad (3)$$

Energiajätto on tässä tapauksessa oleellisesti kääntäen verrannollinen hiukkasen

nopeuden neliöön (eli energiaan), sillä logaritmisesta termistä aiheutuva riippuvuus hiukkasen nopeudesta on pieni. [21, s. 130]

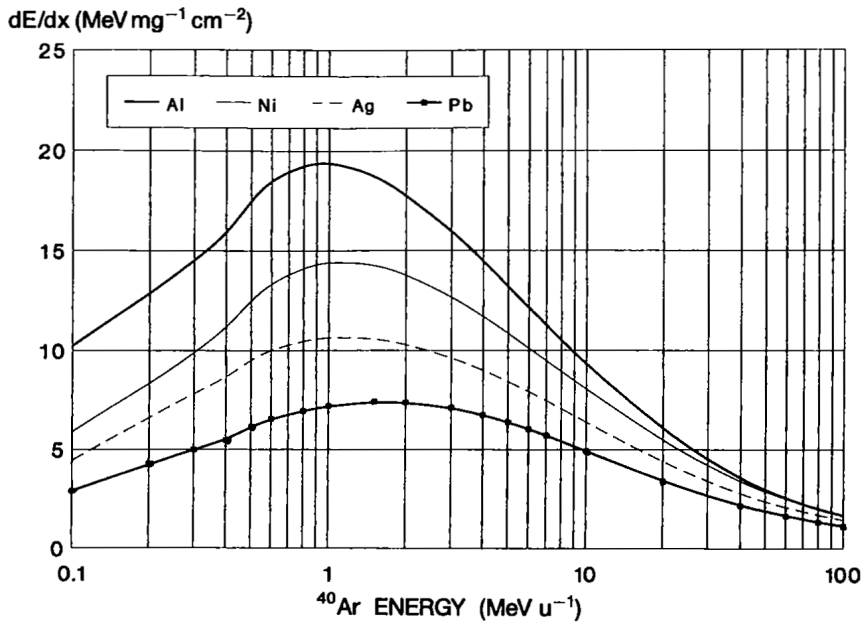
Energiajättö on pienimmillään, kun $E = 3Mc^2$, jossa M on hiukkasen massa. Esimerkiksi protonin energiajätön minimi saavutetaan, kun protonin energia on

$$3 \cdot m_p c^2 = 3 \cdot 940 \text{ MeV} / c^2 \cdot c^2 = 2820 \text{ MeV},$$

jonka voi todeta myös kuvasta 8, jossa on esitetty protonin energiajättö alumiinissa protonin energian funktiona.

Kun $\beta \approx 1$ eli kun hiukkasen nopeus lähestyy valonnopeutta, energiajättö kasvaa yhtälön (2) mukaan logaritmisesti ionin nopeuden kasvaessa. Tämä energiajätön energiariippuvaisuus ilmenee esimerkiksi kuvasta 9, josta havaitaan että suurilla energioilla energiajätön muutokset ovat paljon pienempiä kuin pienemmillä energioilla. Kuvassa on esitetty ^{40}Ar -ionin energiajättö eräissä väliaineissa, ja siitä ilmenee myös, että väliaineen järjestysluvun Z kasvaessa hiukkasen energiajättö pienenee.

Useilla fysiikan aloilla tarkastellaan energiajätön kuvaajien eri osia. On oleellista huomata, että kyse on silti juuri tästä kuvaajasta, vaikka siitä kerralla näytettäisiinkin vain osa. Eri fysiikan aloilla ollaan kiinnostuneita eri suuruisista energioista, minkä vuoksi usein keskitytään vain tiettyyn kuvaajan osaan. Hiukkasfysiikassa, ydinfysiikassa ja muualla käytetyt dE/dx :n kuvaajat voivat näyttää käytetyistä mitta-asteikoista riippuen hyvinkin erilaisilta, mutta ovat silti saman kuvaajan eri osia. Esimerkiksi kuvat 4, 8 ja 9 kaikki osia Bethe-Blochian kuvaajista.



Kuva 9. ^{40}Ar -ionin energiajätö eri väliaineissa hiukkasen energian funktiona. Jokaisessa tarkastelluista väliaineista energiajätö saa maksiminsa kun ionin energia on n. $1 \text{ MeV}u^{-1}$. Tätä pienemmillä energioilla ^{40}Ar -ioni menettää varaustaan tapahtuvan elektronisiepauksen takia. Kuvasta nähdään myös, että mitä suurempi väliaineen Z on, sitä pienempi on ionin energiajätö kyseisessä väliaineessa. Tämä näkyy erityisen selvästi kun ionin energia on alle $10 \text{ MeV}u^{-1}$. [18]

3.5.2 Kantama väliaineessa

Kun hiukkasen nopeus ei ole hyvin pieni eikä hyvin suuri, nähdään yhtälöstä (2), että energiajätöä dominoi energian muuttuessa termi $1/v^2$. Kokeellisesti on osoitettu, että kun hiukkasen energia vaihtelee 100 keV :n ja 1 GeV :n välillä, voidaan energiajätön muutoksia kuvata yksinkertaisella lausekkeella

$$\frac{dE}{dx} = \frac{a}{E^{k'}} \quad (4)$$

jossa a on ainekohtainen vakio ja $k' \approx 0,8$. Yhtälöstä (4) voidaan johtaa kantama R

$$R = \int_0^R dx = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx} \propto E^{1+k'}. \quad (5)$$

Näin määritelty kantama R on kääntäen verrannollinen väliaineen tiheyteen ρ . Kuten energiajätö myös kantama esitetään usein kirjallisuudessa pintatiheyden avulla, jolloin se ei riipu väliaineen tiheydestä. Tällöin kantama $R' = \rho R$ saa yksikökseen massa per pinta-ala. [21, s. 131 - 132]

Yhtälöstä (2) saadaan myös relaatio

$$\frac{dE}{dx} \propto z^2 f(v), \quad (6)$$

jossa z on hiukkasen varausluku ja $f(v)$ on nopeudesta riippuva funktio. Funktio $f(v)$ ei riipu hiukkasen massasta eikä varauksesta, joten energiajättö dE/dx on suoraan verrannollinen hiukkasen varauksen neliöön. Koska $dE = mv dv$, saadaan yhtälöstä (6) kantamaksi

$$R = \int dx = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx} \propto \frac{m}{z^2} F(v), \quad (7)$$

jossa $F(v)$ on pelkästään nopeudesta riippuva funktio. Tästä nähdään, että kantama R on suoraan verrannollinen hiukkasen massaan ja kääntäen verrannollinen hiukkasen varauksen neliöön. Yhtälöistä (6) ja (7) voidaan päätellä, että esimerkiksi 40 MeV:n α -hiukkasella ja 10 MeV:n protonilla on suunnilleen sama kantama, mutta α -hiukkasen energiajättö on noin neljä kertaa suurempi kuin protonin. [21, s. 132 - 133]

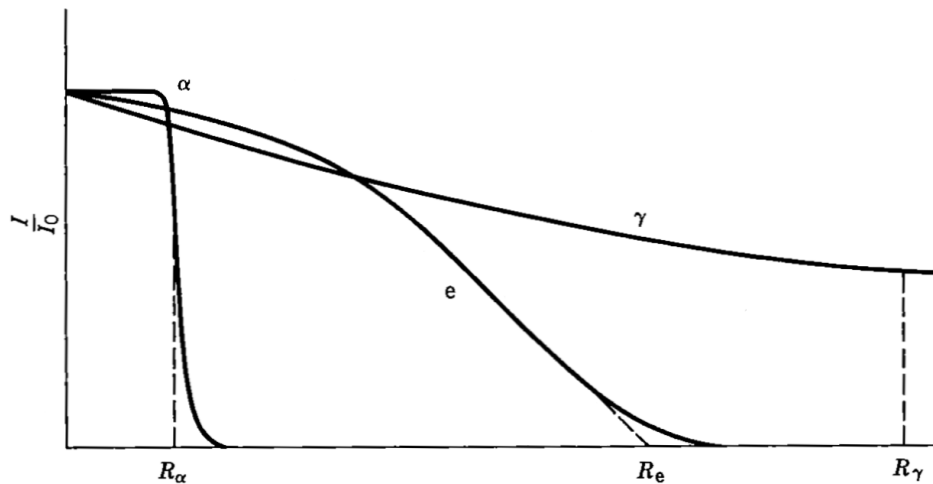
Väliaineen vaikutusta kantamaan on vaikeampi arvoida kuin hiukkasen energian ja varauksen vaikutusta. Empiirisesti on johdettu varatun hiukkasen kantamille R_i kahdessa eri väliaineessa yhtälö (ns. Bragg-Kleeman riippuvuus)

$$\frac{R_1}{R_2} \approx \frac{\rho_2 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_2}}, \quad (8)$$

jossa ρ_i on väliaineen tiheys ja A_i sen massaluku. [21, s. 134]

Alfahiukkasten ja muiden raskaiden varattujen hiukkasten kantama väliaineessa on suhteellisen helppo määrittää kokeellisesti, sillä säteilyn hiukkasten kantamien vaihtelu on hyvin vähäistä. Melko suurella tarkkuudella voidaan sanoa, että kaikki α -hiukkaset kulkevat yhtä pitkän matkan väliaineessa. α -hiukkaset ovat lisäksi niin raskaita, että niiden rata väliaineessa on lähes suora. α -hiukkasten kantaman määrittämisen yksiselitteisyyden voi huomata myös kuvasta 10, jossa on esitetty 1 MeV:n α -hiukkasten, elektronien ja γ -säteilyn kantamien määrittästä suhteessa säteilyn menettämään energiaan. [20, s. 204].

Elektronien kantaman R_e määrittäminen ei ole yhtä yksinkertaista kuin raskaampien varattujen hiukkasten kantaman määrittäminen. Toisin kuin raskaampien ionien, elektronien rata väliaineessa ei ole suora ja yksittäisten törmäysten vaikutus elektroneihin voi olla hyvinkin merkittävä. Tästä syystä kaikki elektronit eivät etene



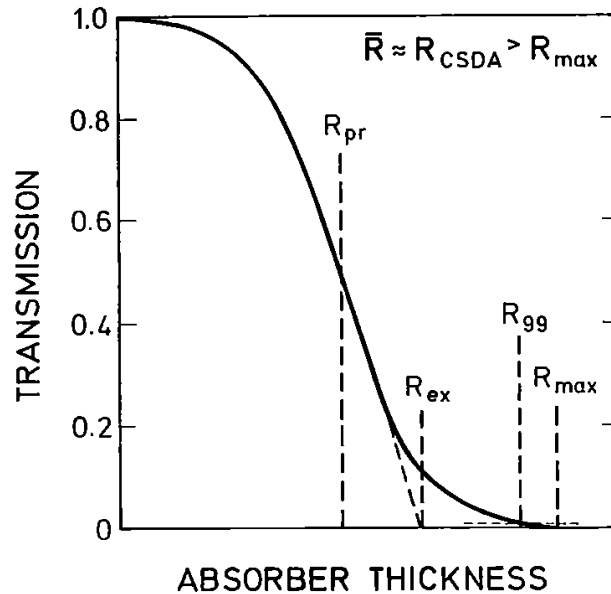
Kuva 10. Kantamien R määrittäminen monoenergeettiselle 1 MeV:n energiselle α - ja γ -säteilylle sekä elektroneille. γ -säteilylle ei voida määrittää samalla tavalla kantamaa kuin α -säteilylle ja elektroneille. Tämän vuoksi usein esitetäänkin γ -säteilylle kantaman sijasta puoliintumispaksuus, jolloin säteily on vaimentunut puoleen alkuperäisestä. [20]

väliaineessa aivan yhtä pitkää matkaa, vaikka säteily olisikin monoenergeettistä. Yleensä ekstrapoloimalla kantamakuvaajan lineaarista osaa saadaan kantamalle määritettyä melko hyvä arvio. Kuvassa 11 on tällä menetelmällä määritettyä kantamaa merkitty R_{ex} . Kuvassa 11 on esitetty myös muita mahdollisia tapoja määrittellä elektronin kantama.

Gammasäteily poikkeaa siinä suhteessa raskaiden hiukkasten ja elektronien säteilystä, ettei sen kantamaa voi määrittellä tarkasti, koska se vaimenee eksponentiaalisesti tunkeutumissyvyyden funktiona. Vaikka väliaine olisi kuinka paksu tahansa, aina osa gammasäteilystä läpäisee sen. Voidaan kuitenkin määrittää esimerkiksi 99 %:n energiajätö tai puoliintumispaksuus. Nyrkkisääntönä on, että väliaineesta riippumatta 1 MeV:n γ -säteilyn puoliintumispaksuus on noin 10 gcm^{-2} .

On tärkeää huomata, että säteilyn kantamat väliaineessa ovat tilastollisia suureita. Yksittäisen varatun hiukkasen tai γ -fotonin kantama väliaineessa on mahdoton ennustaa, mutta voidaan määrittää se syvyys, johon hiukkaset väliaineessa keskimäärin tunkeutuvat. Kantamalla tarkoitetaan usein tätä tunkeutumissyvyyttä. Tilastollisesta luonteesta johtuen kantamiin liittyy aina hajonta.

Esimerkiksi sädehoidon ja säteilyturvallisuuden kannalta kantamien tunteminen on tärkeää. Taulukossa 1 on annettu 1 MeV:n energian säteilyjen kantamia alumiinissa ja vedessä.



Kuva 11. Elektronien kantaman määrittäminen. Yleensä ei ole mielekäästä määrittää suihkun elektronien kantamaksi väliaineessa etäisyyttä R_{max} , jonka puitteissa kaikki suihkun elektronit ovat pysähtyneet. Usein käytetäänkin elektronien kantamana etäisyyttä R_{ex} , joka saadaan ekstrapoloimalla kantamakuvaajan suoraa osaa. Muita vaihtoehtoisia kantamia ovat R_{pr} , jonka kuluessa suihkun intensiteetti on puoliintunut, sekä R_{99} , joka vastaa kohtaa johon mennessä intensiteetistä on vaimentunut 99 %. [18]

Taulukko 1. Eri tyyppisten säteilylajien tyypillisiä kantamia väliaineessa 1 MeV:n energialle. Gammasäteilylle kantaman tilalla on puoliintumispaksuus.

| väliaine | α -säteily | elektronit | γ -säteily |
|----------|-------------------|------------|-------------------|
| alumiini | 3 μm | 2 mm | 4 cm |
| vesi | 5 μm | 5 mm | 10 cm |

4 Opetuksen haasteita

Ionisoivan säteilyn opettamiseen liittyviä haasteita on tutkittu jo pitkään. Opiskelijoiden ja opettajien ennakkokäsityksiä on kartoitettu useissa tutkimuksissa, joita on tehty eri puolilla maailmaa. Kun opiskelijoiden mahdollisesti virheelliset ennakkokäsitykset tunnetaan, voidaan niihin kiinnittää opetuksessa huomiota ja niitä voidaan yrittää korjata. Kirjallisuudesta on löydettävissä myös joitakin valmiita ratkaisumalleja virheellisten käsitysten korjaamiseksi. Vaikka seuraavassa esitettävät tutkimukset on tehty ulkomailla, niiden tuloksia voidaan soveltaa myös Suomessa tapahtuvassa lukio-opetuksessa.

Käsite-epäselvyydet ovat yleisimpiä vaikeuksia, joita opiskelijoilla on ionisoivaa säteilyä opiskeltaessa [9]. Tutkimuksissa on esimerkiksi huomattu opiskelijoiden sekoittavan usein käsitteet säteily ja radioaktiivisuus [4] [8], samoin kuin säteilyn ja radioaktiivisen materiaalin käsitteet [8]. Useissa tutkimuksissa on huomattu opiskelijoilla olevan vaikeuksia myös käsitteiden kontaminaatio ja säteilytys erotamisessa [5] [8] [25] [29]. Joidenkin opiskelijoiden on havaittu lisäksi mieltävän säteilytyksen positiiviseksi ja kontaminaation negatiiviseksi asiaksi [25].

Paitsi käsite-epäselvyyksiä, opiskelijoilla on myös runsaasti muita virhekäsityksiä ionisoivasta säteilystä ja sen vuorovaikutuksesta aineen kanssa. Niitä esiintyy niin yläkouluikäisillä kuin yliopistosta jo valmistuneilla fyysikoillakin [4] [5].

On havaittu, että jotkut opiskelijat luulevat säteilyn ja radioaktiivisen materiaalin leviävän lähteestä ja vaikuttavan muihin esineisiin lähteen läheisyydessä. Tämän leviävän "olemuksen" he mieltävät vaaralliseksi. Lisäksi he ajattelevat, että jos jokin esine absorboi tämän "olemuksen", se voi myöhemmin emittoitua uudelleen. Samassa tutkimuksessa havaittiin myös, että opiskelijat puhuvat esineistä, jotka "sisältävät säteilyä". Tämä viittaisi siihen, että opiskelijoilla on vaikeuksia ymmärtää säteilyn taustalla olevia mekanismeja. [8]. Toisaalta on esitetty, että "sisältää säteilyä" ja "on juuri absorboinut säteilyä" saattavat tarkoittaa osalle oppilaista samaa, jolloin heidän ymmärryksensä taustalla olevista mekanismeista ei välttämättä eroa tieteellisestä esityksestä [24].

Colclough ja muut [5] havaitsivat osan opiskelijoista ajattelevan virheellisesti, että säteily saa aikaan radioaktiivisuutta altistetussa materiaalissa. Vastaavanlaisia havaintoja on tehty myös lääketieteen opiskelijoiden keskuudessa Yhdysvalloissa ja Pakistanissa. Opiskelijoiden havaittiin uskovan röntgenhuoneessa olevien esineiden lähettävän röntgensäteitä säteilylle altistumisen jälkeen. [30] [34]. Lääketieteen

opiskelijoilla on havaittu lisäksi olevan vaikeuksia erottaa ionisoiva säteily epäionisoivasta. He saattavat esimerkiksi pitää ultraääni- ja MRI-tutkimuksia vaarallisina potilaalle ja γ -säteilyä röntgensäteilyä vaarallisempana. Tällaiset virhekäsitykset ovat säilyessään erityisen haitallisia, sillä ne saattavat vaikuttaa lääkäreiden hoitopäätöksiin tutkimukseen liittyvien riskien tuntuessa liian suurilta odotettavissa olevaan hyötyyn nähden. [34]

Tyypillinen virhekäsitys on myös, että gammasäteily läpäisee väliaineen muita säteilymuotoja paremmin ja tunkeutuu kappaleisiin syvemmälle vain siitä syystä, että sen energia on säteilylajeista suurin [5]. Opiskelijat mieltävät γ -säteilyn ”voimakkaammaksi” ja ”energisemmäksi” kuin α - ja β -säteilyn ja selittävät tällä γ -säteilyn suuren tunkeutuvuussyvyyden [1].

Tutkittaessa 11-16-vuotiaiden brittiläisten opiskelijoiden käsityksiä ydinsäteilystä havaittiin, että ydinsäteily ajatellaan ihmisten tekemäksi, ei luonnolliseksi, ja sellaisena se yhdistetään usein muihin teknologisiin aikaansaannoksiin, kuten laseriin [4]. Lisäksi havaittiin, että vaikka 78% oppilaista tiesi, että säteily voi tappaa, vain 21 % ajatteli, että sitä voisi käyttää esineiden sterilointiin. Tästä voidaan päätellä, että opiskelijoilla on vaikeuksia soveltaa tietojaan käytännön tilanteisiin. Pratherin mukaan radioaktiiviseen hajoamiseen ja puoliintumisaikaan liittyvät oppimisvaikeudet saattavat usein johtua virheellisistä mielikuvamalleista, joita opiskelijoilla on atomeista [29]. Hänen mukaansa kyvyttömyys käyttää mikrotason malleja käsiteltäessä hiukkasia atomitasolla vaikeuttaa sisältötiedon ymmärtämistä [28].

Myös opiskelijoiden ennakkosenteiden on havaittu vaikuttavan heidän oppimiseensa. Alsop ja Watts [32] havaitsivat tutkimuksessaan, että pieni osa englantilaisista lukiolaisista jättää ydinfysiikan aiheet kokonaan opiskelematta, koska he eivät pidä niistä. Nuoret oppivat sekä formaalin että epäformaalin opetuksen kautta. Formaalia opetusta he saavat koulussa, epäformaalia vanhempien ja ikätovereidensa kanssa vuorovaikuttaessaan sekä median välityksellä. Keayn [19] mukaan epäformaali vuorovaikutus on vastuussa nuorten ennakkokäsitysten muotoutumisesta. Muut tutkimukset ovat saaneet hieman poikkeavia tuloksia siitä, kumpi – formaali vai epäformaali opetus – hallitsee oppilaiden ennakkokäsitysten muotoutumista [22] [6]. Keayn [19] mukaan radioaktiivisuudesta ja ydinvoimasta uutisoidaan usein virheellisesti, minkä takia nuorten uskomukset radioaktiivisuudesta ja säteilystä ovat usein naiiveja, virheellisiä ja vahvasti tilannesidonnaisia. Alsop ja Watts havaitsivat, että ydinfysiikan aiheiden pinnallinen

käsittely koulussa ei vaikuta merkittävästi oppilaiden ennakkokäsityksiin [32]. Tutkittaessa 16-vuotiaiden norjalaisten opiskelijoiden oppimista havaittiin, että opiskelijat, joilla oli vahvoja virhekäsityksiä ionisoivasta säteilystä, eivät muutaneet käsityksiään, vaikka heille esitettiin niiden kanssa ristiriidassa olevaa tieteellistä tietoa [14]. Tästä voidaan päätellä, että virheellisten ennakkokäsitysten korjaaminen on haastavaa.

Kirjallisuudessa on esitetty parannusehdotuksia ionisoivan säteilyn opetukseen. Prather on esittänyt, että jos opiskelijat oppisivat käyttämään mikrotason malleja atomitason ilmiöiden kuvaamiseen, he kykenisivät sisäistämään paremmin ionisoivaan säteilyyn liittyviä käsitteitä kuten radioaktiivinen hajoaminen ja puoliintumisaika [28]. Hänen mukaansa opiskelijoiden kyky soveltaa oppimaansa paranisi, jos heillä olisi vähemmän virheellisiä ajatusmalleja ionisoivasta säteilystä, radioaktiivisuudesta ja radioaktiivisesta hajoamisesta [29].

Eijkelhofin tekemän tutkimuksen mukaan aikuiset tekevät virheellisiä ja riittämättömiä päätelmiä radioaktiivisten materiaalien turvallisuudesta, riskeistä ja käytöstä, koska he eivät ole sisäistäneet tärkeitä radioaktiivisuuteen ja ydinprosesseihin liittyviä perustietoja [9]. On myös esitetty, että ionisoivan säteilyn absorptioprosesseista tulisi puhua enemmän ja tarkemmin, esimerkiksi vertaamalla niitä valon absorptioon [25].

Useat tutkimukset kyseenalaistavat perinteisten opetusmenetelmien tehokkuuden opiskelijoiden ennako- ja virhekäsitysten korjaamisessa. Prather havaitsi, että perinteiset luennot, laskuharjoitukset ja kokeelliset laboratoriotyöt eivät juuri vaikuta fysiikan ensimmäisen vuosikurssin yliopisto-opiskelijoiden naiiveihin käsityksiin ionisoivasta säteilystä [28]. Tämä on tyypillistä myös muille fysiikan osalueille. Monet oppilaat läpäisevätkin fysiikan peruskurssit saavuttamatta edes kunnollista perustason käsitteellistä ymmärrystä käsitellyistä aiheista [23]. Tämä saa pohtimaan, olisiko kurssien läpäisyvaatimuksissa mahdollisesti muutettavaa. Prather on esittänyt, että tulisi tutkia, miten oppimisprosessi tapahtuu suhteessa opiskelijoiden ennakkokäsityksiin käsiteltävistä aiheista. Hänen mukaansa tavoitteena tulisi olla oppimisympäristö, jossa opiskelijat haastetaan sopivalla tavalla ja heitä motivoidaan syvempään älylliseen sitoutumiseen eli aidosti ajattelemaan oppimaansa. [29]

Myös opetuksen tuntimäärien lisääminen saattaisi auttaa opiskelijoita sisäistämään oppimansa paremmin. Alsop ja Watts [2] havaitsivat, että 16-19-vuotiaat

brittiopiskelijat, jotka opiskelevat fysiikkaa, antavat rationaalisempia ja vähemmän tunnepitoisia vastauksia ydinfysiikan aiheisiin liittyviin kysymyksiin kuin ei-luonnontieteellisiä opintoaloja opiskelevat yliopisto-opiskelijat. Myös Colclough ja muut [5] huomasivat tutkimuksessaan, että fyysikkotaustaisilla tulevilla luonnontieteiden opettajilla on sekä korkeampi osaamisen taso että järkipäisemmät asenteet ydinfysiikan kysymyksiä kohtaan kuin esimerkiksi kemistitaustaisilla tulevilla luonnontieteiden opettajilla. Saadut tulokset ovat tältä osin odotetun kaltaiset.

5 Oppikirja-analyysi

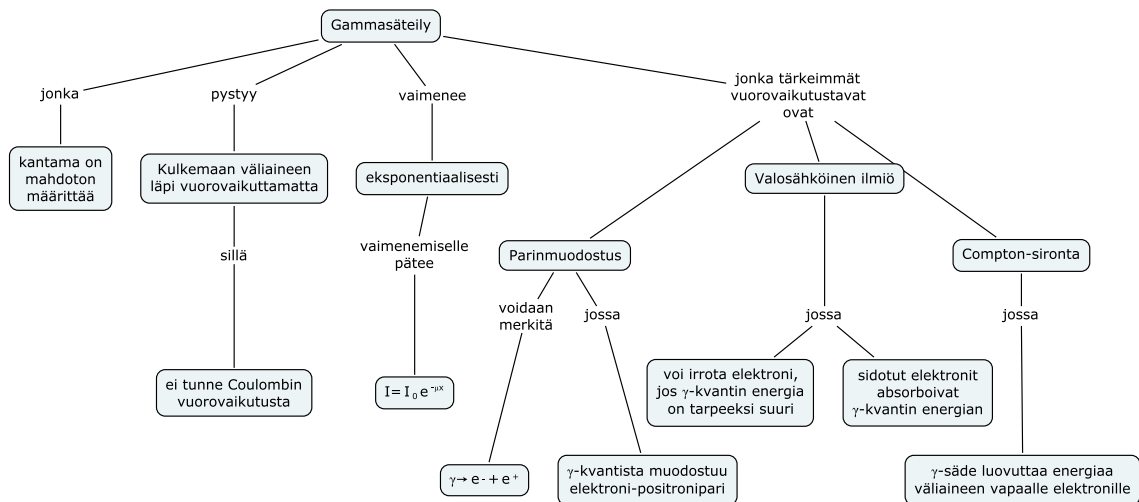
5.1 Käsitekartoista

Käsitekartat sopivat hyvin sellaisen tiedon jäsentämiseen, joka rakentuu hierarkkisesti. Fysiikan tieto on usein tällaista, ja tästä syystä tämän tutkielman oppikirja-analyysissä on käytetty apuna käsitekarttoja. Käsitekarttojen avulla on pyritty tuomaan esille oppikirjojen tärkein sisältö kustakin käsitellystä aiheesta, sekä se, millaisina kokonaisuuksia tietoa on esitelty. Käsitekarttojen on tarkoitus auttaa oppikirjojen välillä tehtävää vertailua.

Käsitekartta on graafinen työkalu, jonka avulla voidaan selkeyttää ja jäsentää monenlaista tietoa. Se sopii kaikenikäisille oppijoille, ja sen avulla voidaan luoda yhteyksiä eri käsitteiden välille sekä hahmottaa laajoja kokonaisuuksia. Jäsentetty ja graafisesti esitetty tieto jää usein opiskelijoille paremmin mieleen kuin muilla perinteisillä tavoilla esitetty tieto, joten käsitekarttaa voidaan käyttää muistamisen helpottamiseen. Muita käsitekartan tyypillisiä käyttötarkoituksia ovat muun muassa kertaaminen ja osaamisen testaaminen. Käsitekarttojen käytöstä on olemassa paljon tutkimuksia. [3] [16] [27]

Käsitekarttoja voidaan laatia usealla eri tavalla käyttötarkoituksesta riippuen. Niissä voidaan kuvata käsitteiden välistä kytkeytymistä ja korostaa tärkeimpiä käsitteitä sekä kokonaisuuksia. Perinteistä käsitekarttaa, jossa esitystapa on hierarkkinen, kutsutaan novakilaiseksi käsitekartaksi. Novakilaisessa käsitekartassa tieto rakentuu ylhäältä alaspäin siten, että keskeisimmät käsitteet on merkitty kuvan yläosaan. Tällaisen käsitekartan hyviin ominaisuuksiin kuuluvat hierarkkisuus sekä käsitteiden risteäminen. Tämän tutkielman käsitekartat eivät täytä täysin novakilaisen käsitekartan määritelmää, sillä käsitteiden linkittymiseen ei ole kiinnitetty erityistä huomiota. Kuvassa 12 on esitetty käsitekartta tämän tutkielman sisällöstä, joka koskee γ -säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta. Käsitekartta on laadittu samojen periaatteiden mukaisesti kuin muutkin tutkielman käsitekartat, ja siitä käyvät hyvin ilmi laadittujen käsitekarttojen keskeiset ominaisuudet. [13] [27]

Oppikirja-analyysia varten laadituissa käsitekartoissa on kussakin yhden oppikirjan sisältö kulloinkin käsiteltävän aiheen osalta. Jokaisesta oppikirjasta laadittiin kuusi käsitekarttaa, joiden aiheina olivat valosähköilmiö, Comptonin ilmiö, röntgen-, α -, β - ja γ -säteily. Eri kirjoista laadittuja karttoja vertailemalla voidaan vertailla eri kirjojen sisältämää tietoa. Vaikka käsitekartoista ei käy käsitteiden



Kuva 12. Käsitekartta siitä, miten γ -säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutus on esitetty tämän tutkielman kappaleessa 3.4.

linkittyminen ilmi, niissä on pyritty hierarkkisuuden avulla tuomaan esille sellaisia kokonaisuuksina erilaiset käsitteet on esitetty. Käsitekarttojen sisällön rajaamisessa käytettiin harkintaa, jotta niiden koko ja luettavuus säilyisivät kohtuullisina. Kirjojen varsinaisen tekstin sisältö pyrittiin pääsääntöisesti keräämään karttoihin ja kuvien, kuvatekstien sekä esimerkkien sisältöjä silloin, kun ne koettiin oleellisiksi asian ymmärtämisen kannalta. Käsitekarttoihin pyrittiin poimimaan ilmiöiden sovelluksista oleellimmat ja ilmiöiden historiasta nimet ja vuosiluvut, sillä oppikirjoissa näitä on paikoin käsitelty laajahkosti.

5.2 Lukion fysiikan oppikirjasarjat

Tähän tutkielmaan valittiin analysoitaviksi kirjasarjoiksi Otavan kustantama *Fotoni*, Tammen kustantama *Fysiikka* ja WSOY:n kustantama *Physica*. Ne on ilmoitettu laaditun voimassa olevan opetussuunnitelman perusteiden [26] linjausten mukaisiksi. Analyysissa käytettiin jokaisen kirjasarjan FY8-kurssin oppikirjan uusinta painosta. Seuraavassa on lyhyt kuvaus oppikirjojen rakenteista ja esitysilmeestä.

Fotoni 8

Fotoni-kirjasarjasta ei ole julkaistu uudistettua painosta, joten käytin kirjan ensimmäistä painosta vuodelta 2007. *Fotoni 8* (jatkossa *Fotoni*) koostuu 7 luvusta ja 38 kappaleesta. Näistä kappaleista 7 käsittelee ionisoivaa säteilyä. *Fotonin* sivuilla on

kirjasarjoista eniten tekstiä ja myös sivumäärällisesti oppikirja on tutkituista laajin (taulukko 2).

Fotonin väritys on melko vaalea ja ulkonäkö pelkistetty. Kappaleissa tärkeimpiä yhtälöitä on korostettu laatikolla, jonka taustaväri vaihtuu luvuittain. Määritelmiä ei pääsääntöisesti ole korostettu muun tekstin joukosta, ja aina niitä ei ole edes selkeästi muotoiltu. Uuteen lukuun johdattelu tapahtuu pääosin aiheen historian kautta. Esimerkit ja oppilastyöt on erotettu muusta tekstiaineksesta värillisellä viivalla. *Fotonissa* on vain vähän kuvia ja marginaalit täyttyvät kuvien puuttuessa usein lisätietoteksteillä. Kirjassa tehtäväsivut tunnistaa punaisesta värityksestä ja tehtäviä on enemmän kuin muissa kirjasarjoissa. *Fotoni* ei sisällä lukujen lopussa tiivistelmää tärkeimmistä asioista. Lukujen lopussa on yleensä lisätietoa käsitellyistä aiheista.

Fysiikka 8

Fysiikka 8-kirjasta (jatkossa *Fysiikka*) käytössäni oli 1. uudistettu painos, joka on ilmestynyt vuonna 2011. Kirja sisältää 8 lukua ja 28 kappaletta, joista 8 käsittelee ionisoivaa säteilyä. *Fysiikka* on fyysiseltä kooltaan kirjasarjoista pienikokoisin ja sen kappaleista on käytetty ylivoimaisesti suurempi osa ionisoivan säteilyn käsittelyyn kuin muissa kirjasarjoissa (taulukko 2).

Fysiikka on esitykseltään selkeä. Tärkeimpiä käsitteitä ja yhtälöitä on korostettu keltaisilla laatikoilla. Esimerkit on erotettu muusta tekstistä sinisillä viivoilla ja oppilastyöt on korostettu sinisellä laatikolla. Uuden luvun aluksi on kerrottu, mitkä oppimisen tavoitteet ovat ja mitä keskeisiä käsitteitä luvussa tullaan oppimaan. Uuteen kappaleeseen mennään usein oppilastyön kautta, jonka tulokset käsitellään tekstissä. Uudet käsitteet on usein lihavoitu tekstissä. Kappaleiden lopussa on "Pohdi ja etsi" -pohdintatehtäviä sekä tavallisia tehtäviä käsitelystä aiheesta. Jokaisen luvun lopussa on lisäksi itsearviointi osio "Testaa, osaatko" sekä lyhyt tiivistelmä luvun tärkeimmistä asioista.

Physica 8

Physica 8:sta (jatkossa *Physica*) käytössäni oli 1.-2. painos, joka on julkaistu vuonna 2009. *Physica* sisältää 8 lukua ja 24 kappaletta, joista 3 käsittelee ionisoivaa säteilyä.

Lisäksi säteilyn mittaamisen ja säteilyturvallisuuden ohessa on käsitelty gamma-säteilyn heikkenemistä. *Physican* sivuista on käytetty suurempi osa ionisoivan säteilyn käsittelyyn kuin muissa kirjasarjoissa (taulukko 2).

Physica on kirjasarjoista levottomimman oloinen painoasunsa takia. Sivut on jaettu kahteen sarakkeeseen, kun muissa kirjasarjoissa sarakkeita on vain yksi. *Physicassa* tärkeimmät käsitteet ja yhtälöt on korostettu oransseihin laatikoihin. Keskeisiä käsitteitä on lihavoitu tekstissä. Esimerkit on eroteltu muusta aineksesta sinisillä palkeilla ja oppilastyöt on korostettu violetein laatikoin. Oppilaistöihin ei usein ole kerrottu kirjassa tuloksia, eikä oppilastöitä käsitellä tekstissä. Uusiin lukuihin ja kappaleisiin ei ole kunnon johdantoa. Lukujen lopussa on yksinkertaiset käsitekartat tärkeimmistä käsitellyistä sisällöistä sekä lista keskeisimmistä uusista käsitteistä. Lukujen lopussa olevat tehtävät on jaoteltu kappaleittain.

6 Opetuksen rakenne opetettaessa ionisoivaa säteilyä lukion FY8-kurssilla

6.1 FY8-kurssin ajankäyttö

Lukion opetussuunnitelman perusteissa on FY8-kurssille nimetty kymmenen keskeistä sisältöä. Näistä aiheista vain osa liittyy ionisoivaan säteilyyn. Yhden kurssin laajuus lukion opetussuunnitelmassa on 38 oppituntia, mutta kurssilla on vain harvoin käytettävissä näin monta tuntia, ja mahdollisesti kurssin päätteeksi pidettävän kokeen tulee sisältyä tähän tuntimäärään. Opettajan tulee miettiä ajankäyttö kullakin kurssilla sopivaksi, ja osviittaa tähän hän hakee helposti käyttämänsä oppikirjan rakenteesta [12, s.231]. [26]

Taulukossa 2 on esitetty Fotoni-, Fysiikka- ja Physica-kirjasarjojen FY8-kurssin kirjojen kokonaiskappale ja -sivumäärät sekä niiden suhde ionisoivaa säteilyä käsittelevien kappaleiden ja sivujen lukumääriin. Taulukon perusteella huomataan, että jos opettaja jakaa oppikirjan sivumäärän tasan eri tuntien kesken, joita laskennallisesti ajatellaan olevan 38 kappaletta, hänen tulee kattaa jokaisella oppitunnilla kirjasarjasta riippuen vähintään 5 sivua. Tällaisella jaolla hän käyttäisi ionisoivan säteilyn opetukseen 6 oppituntia kirjasarjan ollessa *Fotoni* tai *Fysiikka* ja 8 oppituntia kirjasarjan ollessa *Physica*. Jos opettaja puolestaan jakaisi aikansa tasan eri kappaleiden kesken, hänellä olisi ionisoivan säteilyn käsittelyyn käytettävissä 5 oppituntia käyttäessään kirjasarjana *Physicaa*, 7 oppituntia käyttäessään *Fotonia* ja peräti 11 oppituntia käyttäessään *Fysiikkaa*. Opettaja voi toki jäsentää kurssin sisällön myös muilla tavoin, mutta Heinosen tutkimuksen mukaan suomalaisista aineenopettajista vain 27 % eteni opetuksessaan koulun opetussuunnitelman mukaan loppujen käyttäessään opetuksensa pohjana oppikirjaa [12, s.233].

Jos opettaja suunnittelee kurssin ajankäyttöä opetussuunnitelmassa esitettyjen keskeisten sisältöjen pohjalta, hän voi käyttää ionisoivan säteilyn opettamiseen jopa puolet kurssista. Tällöin aiheeseen käytetyn ajan määrä riippuu kuitenkin siitä, mitä käsitteitä hän ionisoivasta säteilystä opetukseensa sisällyttää. Esimerkiksi energiatasokaavioiden ja atomin energiatilojen opetusta voi syventää α - tai β -säteilyn kohdalla (kuten *Fotoni* ja *Fysiikka* tekevätkin), säteilyn hiukkasluonteesta voidaan puhua valosähköisen ilmiön yhteydessä, massan ja energian ekvivalenssin tuntemusta voidaan syventää laskettaessa hajoamisenergioita radioaktiivisille hajoamisille ja niin edelleen. Jos opettaja lomittaa keskeisiä sisältöjä, tulevat samat asiat esille useammalla tunnilla. Tällä tavoin myös tietyn aiheen opetukseen

Taulukko 2. Fotoni 8, Fysiikka 8 ja Physica 8 -oppikirjojen kappaleiden ja sivujen lukumäärä sekä ionisoivan säteilyn käsittelyyn käytetyt vastaavat lukumäärät ja näistä lasketut prosentuaaliset osuudet. Physica 8-kirjan kohdalla oleva (+heikk.) ilmaisee, että kyseisessä kirjassa käsitellään ionisoivaa säteilyä (gammäsäteilyn heikkenemistä) myös yhden kappaleen seitsemäntenä alakohtana.

| Kirja | Fotoni 8 | Fysiikka 8 | Physica 8 |
|------------------------------|----------|------------|-------------|
| Kappaleita yhteensä | 38 | 28 | 24 |
| Kappaleita ionisoivasta sät. | 7 | 8 | 3 (+heikk.) |
| Ionisoivan sät. osuus (%) | 18 | 29 | 13 |
| Sivuja yhteensä | 221 | 192 | 178 |
| Sivuja ionisoivasta sät. | 32 | 28 | 36 |
| Ionisoivan sät. osuus (%) | 15 | 15 | 20 |

käytettävissä oleva aika kasvaa. Jos opettaja opettaisi kaikki opetuksen keskeisimmät sisällöt erillisinä, ja käyttäisi niihin tasaisesti aikaa, olisi ionisoivan säteilyn opettamiseen käytössä neljäsosa ajasta eli laskennallisesti noin 10 tuntia.

6.2 Fysiikan oppikirjojen sisäiset painotukset sekä käsittelyjärjestys

Kaikissa kirjasarjoissa ionisoivaa säteilyä lähestytään lähes samassa järjestyksessä (taulukko 3). Jokaisessa oppikirjassa käsitellään ensin valosähköinen ilmiö, Comptonin sironta ja röntgensäteily. *Fotonissa* käsitellään Comptonin sironta ja röntgensäteily eri järjestyksessä kuin muissa oppikirjoissa. Näiden aiheiden jälkeen *Fysiikassa* ja *Physicassa* käsitellään atomimalleja, spektrejä, aineen rakenteen tutkimusta sekä ytimen rakennetta. *Fotonissa* käsitellään suhteellisuusteoriaa, dualismia, atomimalleja ja aineen rakennetta. Tämän jälkeen kaikki kirjasarjat jatkavat ionisoivan säteilyn käsittelyllä samassa järjestyksessä: alfasäteily, beetasäteily ja viimeisenä gammäsäteily.

Taulukossa 4 on esitetty kirjojen sivumäärät käsiteltyä ionisoivan säteilyn aihetta kohti sekä kuhunkin aiheeseen liittyvien esimerkkien ja tehtävien lukumäärät. Kirjojen sivumääriä ei voi suoraan verrata keskenään, sillä kirjojen sivut ovat erikoisia ja niissä on hyvin eri määrä tekstiä ja kuvia. Vertailukelpoista tietoa saadaan suhteuttamalla kunkin aiheen käsittelyyn käytetty sivumäärä ionisoivan säteilyn käsittelyyn käytettyyn kokonaissivumäärään. Lisäksi esimerkkien ja tehtävien

Taulukko 3. Fotoni 8, Fysiikka 8 ja Physica 8 -oppikirjojen käsittelyjärjestys ionisoivan säteilyn aiheiden osalta.

| Fotoni 8 | Fysiikka 8 | Physica 8 |
|----------------|----------------|----------------|
| valosähköilmiö | valosähköilmiö | valosähköilmiö |
| röntgensäteily | Compton | Compton |
| Compton | röntgensäteily | röntgensäteily |
| α | α | α |
| β | β | β |
| γ | γ | γ |

lukumääriä voidaan verrata, vaikkakin on huomionarvoista, että esimerkit sekä tehtävät saattavat olla hyvin lyhyitä ja toisaalta vaihtoehtoisesti sisältää useita alakohtia. Tässä vertailussa ne kaikki on otettu huomioon samanarvoisina.

Kaikissa analysoiduissa oppikirjoissa Comptonin sironta on jätetty vähemmälle huomiolle kuin muut aiheet. *Fotonissa* on jaettu sivumäärä tasan muiden ionisoivaa säteilyä käsittelevien aiheiden kesken. Kutakin käsitellään 19 prosentin verran ionisoivaan säteilyyn käytetystä kokonaissivumäärästä. Tehtävien osalta *Fotoni* sisältää selvästi eniten valosähköiseen ilmiöön liittyviä tehtäviä: 32 prosenttia kirjan ionisoivan säteilyn tehtävistä käsittelee tätä aihetta. *Physicassa* on painotettu röntgensäteilyä. Sen käsittelyyn käytetään 32 prosenttia sivuista ja myös suurin osuus (35 %) tehtävistä. γ -säteilyn käsittelyyn *Physicassa* on käytetty selvästi muita kirjasarjoja vähemmän sivuja, ja se sisältää vain neljä aiheeseen liittyvää tehtävää, selvästi vähemmän kuin muut kirjat. *Fysiikassa* aiheita on käsitelty tasaisella painotuksella, mutta Comptonin ilmiö on kaikista kirjoista vähiten edustettuna: aiheelle on varattu vain kolme prosenttia ionisoivan säteilyn käsittelyyn käytetystä sivumäärästä, vain kaksi tehtävää ja ei yhtään esimerkkiä. *Fysiikan* tehtävissä painotetaan β -säteilyä, johon liittyviä tehtäviä on 26 prosenttia kirjan ionisoivaa säteilyä käsittelevistä tehtävistä. Muutoin kirjoissa on melko yhtenevä määrä esimerkkejä, mutta röntgensäteilyn kohdalla *Physicassa* esimerkkejä on 5 ja *Fysiikassa* 4, kun *Fotonin* vastaava luku on vain 2. β -hajoamisen kohdalla tilanne on päinvastainen, *Fotonissa* on 5 esimerkkiä, *Fysiikassa* 3 ja *Physicassa* vain 2. Kokonaismäärällisesti kaikissa kirjoissa on suunnilleen yhtä monta ionisoivaan säteilyyn liittyvää esimerkkiä. *Fotonissa* on ionisoivaan säteilyyn liittyviä tehtäviä kuusikymmentä kappaletta, muissa kirjoissa on tehtäviä parikymmentä vähemmän.

Taulukko 4. Fotoni 8, Fysiikka 8 ja Physica 8 -oppikirjojen sivujen, esimerkkien ja tehtävien lukumäärä (S lkm, E lkm ja T lkm) käsiteltävää aihetta kohti ja niiden prosenttiosuudet (S %, E % ja T %) ionisoivaan säteilyyn käytetystä kokonaissivumäärästä. Suluissa olevat numerot ovat selvästi merkittyjä lisätietosivuja, jotka on otettu tämän taulukon laskuissa huomioon.

| Kirja | aihe | sivujen, esimerkkien ja tehtävien osuudet | | | | | |
|------------|----------------------|---|-----|-------|-----|-------|-----|
| | | S lkm | S % | E lkm | E % | T lkm | T % |
| Fotoni 8 | valosähköinen | 6 | 19 | 2 | 14 | 21 | 32 |
| Fysiikka 8 | " | 7 | 19 | 3 | 25 | 8 | 19 |
| Physica 8 | " | 6 | 21 | 2 | 14 | 6 | 15 |
| Fotoni 8 | Compton | 2 | 6 | 1 | 7 | 6 | 9 |
| Fysiikka 8 | " | 1 | 3 | 0 | 0 | 2 | 5 |
| Physica 8 | " | 2 | 7 | 2 | 14 | 3 | 8 |
| Fotoni 8 | röntgen | 5 (+1) | 19 | 2 | 14 | 9 | 14 |
| Fysiikka 8 | " | 9 | 25 | 4 | 33 | 8 | 19 |
| Physica 8 | " | 9 | 32 | 5 | 36 | 14 | 35 |
| Fotoni 8 | α -hajoaminen | 6 | 19 | 2 | 14 | 11 | 17 |
| Fysiikka 8 | " | 5 | 14 | 1 | 8 | 5 | 12 |
| Physica 8 | " | 4 | 14 | 2 | 14 | 6 | 15 |
| Fotoni 8 | β -hajoaminen | 6 | 19 | 5 | 36 | 7 | 11 |
| Fysiikka 8 | " | 8 | 22 | 3 | 25 | 11 | 26 |
| Physica 8 | " | 4 | 14 | 2 | 14 | 7 | 18 |
| Fotoni 8 | γ -säteily | 6 | 19 | 2 | 14 | 12 | 18 |
| Fysiikka 8 | " | 6 | 17 | 1 | 8 | 8 | 19 |
| Physica 8 | " | 3 | 11 | 1 | 7 | 4 | 10 |
| Fotoni 8 | yhteensä | 32 | 101 | 14 | 99 | 66 | 101 |
| Fysiikka 8 | " | 36 | 100 | 12 | 99 | 42 | 100 |
| Physica 8 | " | 28 | 99 | 14 | 99 | 40 | 101 |

7 Ionisoivan säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus lukion FY8-kurssin oppikirjoissa

7.1 Käsitekartta-analyysi

Oppikirjojen sisältöjä analysoitaessa kiinnitettiin huomiota siihen, miten hyvin kirjat kattavat lukion opetussuunnitelman perusteissa mainitut keskeiset sisällöt. Lisäksi etsittiin yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia eri kirjasarjojen välillä, sillä yksi tutkielman tavoitteista on auttaa fysiikan opettajaa oppimateriaalin valinnassa. Runsaaseen, opetussuunnitelman kannalta ylimääräiseen materiaaliin kiinnitettiin myös huomiota. Tässä tutkielmassa tehdyssä analyysissä ei sen sijaan kiinnitetty erityistä huomiota oppikirjojen tietorakenteisiin ja käsitteiden linkittymiseen, sillä tutkielman laajuus olisi kasvanut liian suureksi. Käsitekarttoista on kuitenkin nähtävissä hierarkkinen rakenne, jolla tieto on oppikirjoissa esitetty. Käsitekartta-analyysin tukena käytettiin paikoitellen kirjojen tekstissä korostettuja käsitteitä, jotka on koottu taulukkoon 5.

7.1.1 Valosähköilmiö

Valosähköilmiö on lukion opetussuunnitelman perusteissa yksi FY8-kurssin keskeisistä sisällöistä, mutta kuten muidenkaan sisältöjen, sen käsittelylaajuudesta opetussuunnitelman perusteet ei sisällä ohjeistusta tai normeja vaan se on opettajan päätettävissä. Kaikki analysoidut oppikirjat käsittelevät valosähköilmiötä. Käsitekartat kirjojen valosähköilmiön käsittelystä löytyvät liitteiden kuvista 13, 14 ja 15. *Physicassa* käsittely on tehty opetussuunnitelman kanssa yhteneväisesti nimityksellä valosähköilmiö, *Fysiikassa* ja *Fotonissa* puolestaan puhutaan valosähköisestä ilmiöstä. Oppikirjoissa nimetään ilmiön ensimmäiseksi osoittajaksi Heinrich Hertzin ja annetaan esimerkkejä ilmiön käytännön sovelluksista, joista valoportit on mainittu *Fotonissa* ja *Fysiikassa* ja ruohonleikkurin aurinkokenno *Physicassa*. Jokaisessa oppikirjassa lähestytään valosähköilmiötä sinkkilevykokeen kautta. Tässä kokeessa havaitaan negatiiviseksi varatun sinkkilevyn varauksen purkautuvan UV-valon osuessa siihen ja todetaan, ettei vastaavaa ilmiötä saada aikaiseksi hehkulampun valolla.

Oppikirjoista löytyvät määritelmät ilmiölle itselleen, rajataajuudelle sekä irrotustyölle. Kaikissa kirjoissa on myös annettu fotoelektronin liike-energian yhtälö

$$E = hf - W,$$

Taulukko5. Ionisoivan säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta käsittelevissä kappaleissa varsinaisen tekstin joukosta korostetut sanat Fotoni 8, Fysiikka 8 ja Physica 8 oppikirjoissa. Taulukko ei sisällä erillisiin laatikoihin korostettuja sanoja.

| Aihe | Fotoni | Fysiikka | Physica |
|------------------------|---|---|--|
| Valosähköilmiö | - rajataajuus - Planckin vakio | - valosähköinen ilmiö - irrotustyö - rajataajuus | - pysäytysjännite |
| Comptonin ilmiö | | - "Comptonin ilmiö on osoitus sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteesta." | - sidottu - koko atomin kanssa - Comptonin sironnaksi - "fotoni luovuttaa osan energiastaan vapaalle elektronille liike-energiaksi" |
| Röntgensäteily | - jarrutussäteily - karakteristinen säteily eli ominaissäteily - diskreetti | - jarrutussäteily - intensiteettioppiikki - ominaissäteily - energian kvantittuminen - röntgenemissio - röntgenfluoresenssi - röntgendiffraktio | - jarrutussäteily - ominaissäteily - hila - hilatasa - vahvistava interferenssi - karakteristinen säteily eli ominaissäteily |
| Alfahajoaminen | - hajoamiskaavio | - α -aktiivinen - kantama - kvantittunut | - "Kun viritystila purkautuu, ydin lähettää γ -kvantin" - hajoamiskaavio - "Törmäyksissä α -hiukkanen vuorovaikuttaa näiden molekyylien elektroniverhojen kanssa." |
| Beetahajoaminen | | - beetasäteily - "Ytimien sanotaan olevan beeta-aktiivisia" - heikko vuorovaikutus - välibosoni - "ydin emittoi elektronin" - β -hajoaminen - annihilaatio - elektronisiappaus | - β -hajoaminen - β^+ -hajoaminen - elektroni - antineutriino - positroni - neutriino |
| Gammasäteily | - heikennyskerroin | - puoliintumispaksuus - parinmuodostus | - parinmuodostus - " γ -säteily vaimenee parhaiten raskaissa alkuaineissa, koska säteilyn vuorovaikutus tapahtuu pääasiassa elektronien kanssa." - puoliintumispaksuus |

jonka kokeellisesti määritetystä kuvaajasta saadaan määritettyä rajataajuus f_0 , irrotustyö W_0 ja Planckin vakio h . Oppikirjoissa ei ole kuitenkaan valosähköisen ilmiön esittelyn yhteydessä mainittu ilmiön merkityksestä γ -säteilyn absorptioon kannalta.

Suppeimmin kirjoista valosähköilmiötä käsitellään *Fysiikassa*. *Fysiikassa* on kuitenkin kerrottu ilmiön sovelluksista ja lisäksi sen historia on nostettu suurempaan rooliin kuin muissa oppikirjoissa.

Physicassa ilmiön ominaisuuksiin tutustutaan esitetyn kokeellisen työn kautta. Tällainen lähestymistapa saattaa jäädä opiskelijalle paremmin mieleen. Toisaalta, jos opiskelija ei ole sisäistänyt, tai on jo unohtanut, virtapiireihin liittyvät peruskäsitteet, saattaa *Physicassa* käytetty lähestymistapa vaikeuttaa oppimista. Kirjassa on myös esitetty kokeellisesti määritetty kuvaaja jänniteestä virran funktiona, jonka avulla havainnollistetaan pysäytysjännitettä. Pysäytysjännite onkin ainoa sana, joka on *Physicassa* korostettu valosähköilmiötä käsittelevässä kappaleessa (taulukko 5).

Fotonissa esitetään samankaltainen (U,I)-kuvaaja kuin *Physicassa*. Lisäksi *Fotonissa* nimetään useita ilmiötä tutkineita tutkijoita sekä mainitaan Planckin hypoteesi $E = hf$. Myös valosähköilmiön syntymekanismia on selitetty elektroniputken avulla yksityiskohtaisemmin kuin muissa kirjoissa. Tämä selitys voisi olla kuitenkin selvempi. Sitä voisi parantaa esimerkiksi käyttämällä fotonin käsitettä, sillä kirjallisuudessa on esitetty ionisoivan säteilyn sisäistämisen helpottuvan, jos sitä verrataan näkyvän valon absorptioon. Myös *Fotonissa* käytetyt merkinnät voisivat olla johdonmukaisemmat: ne eroavat valosähköilmiön kohdalla hieman niistä, joita käytetään myöhemmin, kun aihetta käsitellään γ -säteilyn yhteydessä. Verratessa kuvien 14, 13 ja 15 käsitekarttoja havaitaan, *Fotonin* sisällön olevan valosähköilmiön osalta laajin. Aiheeseen liittyviä tehtäviä on *Fotonissa* selvästi eniten, yli kaksi kertaa niin paljon kuin muissa kirjoissa (taulukko 4).

7.1.2 Comptonin ilmiö

Lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaan yksi FY8-kurssin keskeisistä sisällöistä on säteilyn hiukkasluoteen ymmärtäminen [26]. Lisäksi radioaktiivisuutta ja γ -säteilyä käsiteltäessä on syytä käsitellä myös γ -säteilyn vuorovaikutusta aineen kanssa, jolloin Comptonin ilmiön perustan ymmärtäminen on hyödyksi.

Kaikissa oppikirjoissa käsitellään Comptonin ilmiötä, mutta kirjojen sisällöissä on suuria eroja (liitteiden kuvat 16, 17 ja 18). *Fotoni* ja *Fysiikka* kertovat ilmiön olevan osoitus säteilyn hiukkasluonteesta. Kaikista kirjoista löytyy määritelmä Comptonin ilmiölle, mutta *Fotonissa* ilmiö määritellään röntgenfotonin ja grafiittiatomin elektronin välisen vuorovaikutuksen kautta. Muissa oppikirjoissa määritelmät ovat yleisemmässä muodossa.

Suppeimmin aihetta käsittelee *Fysiikka*, joka ei sisällä ainoatakaan esimerkkiä tai yhtälöä aiheesta. Kirjassa ilmiö määritellään seuraavasti:

Säteilyn fotoni törmää vapaaseen elektroniin. Fotonin liikkeen suunta muuttuu, ja se luovuttaa osan energiastaan elektronin liike-energiaksi.

Physicassa käsitellään Comptonin ilmiötä Comptonin sironnan nimellä. Kirjassa erotellaan Comptonin sironta Thomsonin sironnasta, jossa fotonin aallonpituus ei muutu. Comptonin ilmiön yhteydessä annetaan lauseke liike-energialle, jonka elektroni saa fotonin törmätessä siihen. *Physicassa* annetun määritelmän mukaan:

Aineeseen tuleva fotoni luovuttaa osan energiastaan vapaalle elektronille liike-energiaksi. Tapahtumaa voidaan ajatella fotonin ja vapaan elektronin kimmoisana törmäyksenä.

Physicassa on Comptonin ilmiö-kappaleessa kuitenkin korostettu sanoja "sidottu" ja "koko atomin kanssa" käsiteltäessä Thomsonin sirontaa, mutta Thomsonin sironnan käsitettä ei ole korostettu (taulukko 5). Tässä on mahdollisuus virhekkäsityksen muodostumiseen, jos tekstiä ei lue huolella. Kirjan esitystä voisikin parantaa joko korostamalla Thomsonin sironnan tai poistamalla aiemmin mainitut korostukset.

Physicassa ei suoraan sanota Comptonin sironnan vahvistavan käsitystä säteilyn hiukkasluonteesta, vaan kerrotaan käsityksen valon kvanttiluonteesta vahvistuneen. Muiden oppikirjojen ratkaisu kertoa säteilyn hiukkasluonteesta on mielekkäämpi, sillä yhteys käsitteiden kvantti ja hiukkanen välillä saattaa olla opiskelijalle epäselvä.

Fotonissa ilmiötä käsitellään pitkälti röntgensäteilyn ja grafiitin välisen vuorovaikutuksen kautta. Kirjassa ei määritellä Comptonin ilmiötä yleisellä tasolla lainkaan. Kirjassa todetaan:

Comptonin tulkinnan mukaan röntgenfotoni käyttäytyy ikään kuin hiukkanen ja luovuttaa osan energiastaan grafiittiatomin elektronille liike-energiaksi.

Comptonin ilmiön havainnekuvasta on nähtävissä, että fotoni siroaa ”atomiin sidotusta elektronista”, jolloin elektroni saa liike-energiaa ja irtoaa atomista. Kirjan varsinaisessa tekstissä ei kuitenkaan ole kerrottu, että elektroni irtoaa atomista. Comptonin ilmiö on mahdollista vain löyhästi sidotun valenssielektronin kanssa, eikä tätä ole *Fotonissa* mainittu. *Fotonissa* kerrotaan kuitenkin ilmiön yhteydessä spektriviivojen jakautumisesta sironnassa, mitä muut kirjat eivät tee. Kirjassa kerrotaan myös ilmiön löytymisen historiasta laajemmin kuin muissa oppikirjoissa. Lisäksi kirjassa annetaan yhtälö aallonpituuden kasvulle, joka havaitaan Comptonin ilmiön yhteydessä. Fotoni sisältääkin paljon tietoa ilmiöstä muihin oppikirjoihin verrattuna. Kirja hyötyisi tärkeimpien avainsanojen korostamisesta, sillä nyt kappaleessa ei ole lainkaan korostuksia.

7.1.3 Röntgensäteily

Lukion opetussuunnitelman perusteet nimeää röntgensäteilyn yhdeksi FY8-kurssin keskeisistä sisällöistä. Oppikirjoista *Fysiikassa* ja *Physicassa* käsitellään röntgensäteilyä kaikista analyysin piiriin kuuluvista aiheista eniten sekä sivuilla että esimerkkien määrällä mitattuna. *Fotonissa* röntgensäteily käsitellään yhdessä kappaleessa, *Fysiikassa* röntgensäteilyn sovellukset on erotettu omaksi kappaleekseen ja *Physicassa* karakteristinen säteily käsitellään vasta myöhemmässä kappaleessa. Kirjojen röntgensäteilyn käsittelystä laaditut käsittekartat ovat liitteiden kuvissa 19, 20 ja 21.

Kaikissa analysoiduissa oppikirjoissa käsitellään röntgensäteilyä suhteellisen kattavasti. Kirjoissa on selitetty röntgenputken rakenne ja esitetty siitä kaaviokuva. Röntgensäteilystä on erotettu ominaissäteily ja jarrutussäteily, joiden syntymekanismit selitetään. Ominaissäteilyn kerrotaan riippuvan anodiaineesta ja muodostavan spektriin intensiteetti-*piikkejä*, jotka on nimetty K-*piikeiksi*. Ominaissäteilyn syntymekanismia käsitellään kaikissa kolmessa kirjassa, *Physicassa* tosin lähinnä vain kuvateksteissä. Jarrutussäteilyn kerrotaan muodostavan spektrin jatkuvan osan. Kirjoissa on myös annettu yhtälöt jarrutussäteilyn suurimman taajuuden ja pienimmän aallonpituuden laskemiseksi. Jokaisessa kirjassa esitetään yhtenä sovelluksena röntgendiffraktio, jonka toimintaperiaate selitetään ja jonka yhteydessä käsitellään Braggin lakia

$$2d\sin\alpha = n\lambda.$$

Myös radiologinen kuvantaminen mainitaan kaikissa kirjoissa yhtenä röntgensä-

teilyn yleisimpänä sovelluksena.

Fotonissa määritellään röntgensäteily valosähköilmiön käänteiseksi ilmiöksi, mutta unohdetaan mainita kyseessä olevan sähkömagneettisen säteilyn laji. *Fotonissa* on lisäksi selitetty röntgensäteilyn syntyminen olevan periaatteessa sama ilmiö kuin optisen spektrin syntyminen, siirtymät ovat nyt vain sisempien kuorien välillä, joten energia on suurempi kuin optisen säteilyn tapauksessa.

Fysiikassa kerrotaan röntgensäteilyn olevan lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä ja käsitellään röntgensäteilyn sovelluksia laajahkosti omassa kappaleessaan. Tämä on siitä hyvä ratkaisu, että röntgensäteilyyn liittyvään teoriaan voidaan aluksi keskittyä rauhassa. Sovelluksiin tutustuminen voidaan niin halutessa helposti jättää myöhemmäksi tai jopa opiskelijan oman kiinnostuksen varaan lisätiedoksi.

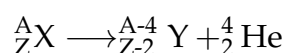
Myös *Physicassa* röntgensäteily on määritelty lyhytaaltoiseksi sähkömagneettiseksi säteilyksi, joka läpäisee useimmat kiinteät aineet, kulkee suoraviivaisesti sähkö- ja magneettikentässä ja on suurina annoksia terveydelle vaarallista. Kirjassa on painotettu röntgendiffraktiota ja korostettujen sanojen joukosta löytyvätkin sanat "hila", "hilataso" ja "vahvistava interferenssi", vaikka esimerkiksi energian kvantittumista ei ole ominaissäteilyn käsittelyn yhteydessä korostettu (taulukko 5).

7.1.4 Alfahajoaminen

Opetussuunnitelmassa nimetyistä sisällöistä α -hajoamiseen liittyvät muun muassa radioaktiivisuus ja säteilyturvallisuus. α -hajoamista opetettaessa voidaan paneutua myös atomin energiatiloihin, spektriin syntyyn sekä ytimen rakenteeseen selitettäessä hajoamisessa muodustuneiden viritystilojen purkautumista. Havaittua massavajetta selitettäessä sivutaan aineen ja energian välistä ekvivalenssia.

Oppikirjojen α -hajoamisen käsittelystä laaditut käsitekartat ovat liitteiden kuvissa 22, 23 ja 24.

Kaikki oppikirjat esittelevät α -säteilyn yleisen hajoamiskaavan



sekä hajoamisenergian Q laskemisen. Kaikki kirjat antavat myös jonkinlaisen arvon α -säteilyn kantamalle sekä kertovat α -säteilyn olevan vaarallista elimistölle.

Fysiikassa α -säteilyn vaarallisuutta tosin käsitellään vasta erillisessä säteilyturvallisuuksikkapaleessa eikä α -hajoamisen yhteydessä.

Käsittekarttoja vertailtaessa huomataan, että *Fotonissa* α -säteilyä on käsitelty kirjoista suppeimmin. Taulukosta 4 huomataan kuitenkin, että sivuilla mitattuna *Fotonissa* on panostettu aiheeseen kirjoista eniten. Sivut täyttyvät kuitenkin pitkälti esimerkeistä ja α -spektrin käsitelystä. α -spektristä on kirjoitettu oma kappaleensa, jossa α -hajoamista tarkastellaan ”emoytimen lepokoordinaatistossa”. Tämän kappaleen sisältö on melko teoreettisesti kirjoitettu ja voisi olla joko lisätietona tai esimerkkinä. Ainakin kappaleen keskeisimpiä käsitteitä voisi korostaa, sillä nyt ainoa α -säteilyn yhteydessä korostettu käsite on hajoamiskaavio (taulukko 5). *Fotonissa* on kuitenkin sanallisesti korostettu α -säteilyn erityistä vaarallisuutta sen joutuessa elimistöön.

Fysiikassa kerrotaan α -säteilyn energian olevan kvantittunut ja säteilyn menettävän energiansa lyhyemmällä matkalla kuin β -säteily. *Fysiikassa* on kerrottu saman energian omaavien α -hiukkasten kulkevan suunnilleen saman matkan väliaineessa ja vuorovaikuttavan väliaineessa ionisoimalla atomeja irrottamalla niiden elektroniverhosta elektroneja. *Fysiikka* ei sisällä α -säteilyn hajoamiskaaviota eikä spektriä. *Fysiikassa* annettu esitys on selkeä kokonaisuus, jossa tärkeimmät käsitteet on onnistuneesti korostettu.

Physicassa löytyvät α -hajoamisen hajoamiskaavio sekä spektri. Kirjassa kerrotaan myös ytimen energian olevan kvantittunut ja viritystilan purkautuessa emittoituvan γ -kvantin. *Physicassa* on kerrottu α -hiukkasen vuorovaikuttavan törmäyksissä ionisoimiensa molekyylien elektroniverhojen kanssa ja menettävän nopeasti liike-energiansa. Tällä selitetään α -säteilyn erityistä vaarallisuutta sen joutuessa elimistöön. Muista kirjoista poiketen *Physicassa* annetaan myös arvio α -hiukkasen energialle, jonka kerrotaan olevan tyypillisesti alle 8 MeV. Lisäksi kerrotaan α -hajoamisen olevan mahdollista vain isotoopeille, joiden $Z > 82$, joka on kuitenkin totta vain luonnossa esiintyville isotoopeille. *Physican* esitys on muutoin *Fysiikan* tavoin onnistunut kokonaisuus korostuksineen.

7.1.5 Beetahajoaminen

Beetahajoamista koskevat sisällöt opetussuunnitelmassa ovat hyvin samankaltaiset kuin α -hajoamista koskevat. Näitä sisältöjä ovat radioaktiivisuus, säteilyturvallisuus, atomin energiatilat, spektrien synty ja ytimen rakenne. Oppikirjojen

β -hajoamisen käsittelystä laaditut käsitekartat ovat liitteiden kuvissa 25, 26 ja 27.

Beetahajoamisen yhteydessä kaikissa kirjoissa käsitellään β^- - ja β^+ -hajoamisen lisäksi elektronisieppaus (EC). *Fysiikan* ionisoivaa säteilyä käsittelevistä sivuista 22 % ja *Fotonin* esimerkeistä 36 % on käytetty β -säteilyn käsittelyyn (taulukko 4). Näissä painotetaan β -hajoamista paljon *Physicassa* enemmän. Kaikista kirjoista löytyvät hajoamisyhtälöt, luettelo neutriinon ja antineutriinon ominaisuuksista sekä tieto, että elektronisieppauksen yhteydessä havaitaan röntgenfotoni.

Fotonissa β -säteilyn ja aineen välistä vuorovaikusta on käsitelty muita kirjoja suppeammin, vaikka β -hajoamisen käsittelyyn käytettyjen sivujen määrä antaa ymmärtää muuta. Kirjassa on esitetty β -spektri, hajoaminen nuklidikartalla sekä reaktioenergian Q laskeminen. *Fotonin* esitystä voisi kehittää myös β -hajoamisen yhteydessä korostamalla tärkeimpiä käsitteitä esimerkiksi tummentamalla, sillä nyt kirjassa ei ole korostettu tekstin joukosta mitään.

Myös *Fysiikassa* on kuva β -säteilyn spektristä, ja lisäksi kirjasta löytyvät myös hajoamiskaaviot. *Fysiikassa* säteilyn ja aineen väliseen vuorovaikutukseen on syvennytty huomattavasti muita oppikirjoja tarkemmin. β^- -säteilyn on kerrottu vuorovaikuttavan aineen kanssa jarrutussäteilyn, virittämisen ja ionisoinnin kautta. β^+ -säteilyn on kerrottu johtavan aina annihilaatioon. Myös elektronisieppauksen seurauksena ilmenevän ominais säteilyn synty on kuvattu yksityiskohtaisemmin kuin muissa oppikirjoissa. Lisäksi *Fysiikassa* muistetaan mainita elektronien radan mutkittelevan ja β -säteilyn kantaman olevan sen takia epätarkka. *Fysiikassa* sivutaan β -hajoamisen yhteydessä myös kvarkkeja ja yksi kappaleessa korostetuista sanoista onkin "välibosoni" (taulukko 5). Muissa kirjoissa kvarkkeja ei käsitellä tässä yhteydessä vastaavalla tavalla. Kvarkkien käsite saattaa olla vaikeasti ymmärrettävä opiskelijoille, mutta toisaalta tällä tavoin saadaan selitettyä mistä neutriino ja antineutriino ilmaantuvat hajoamiskaavoihin.

Physicassa on esitetty kirjojen selkeimmät kuvat ytimen muutoksista eri hajoamisissa. Kirjassa kerrotaan elektronien kulkevan väliaineessa siksak-rataa ja niiden kantaman olevan epätarkka. Myös *Physicassa* mainitaan β^+ -hajoamisen johtavan annihilaatioon, mutta tämä tehdään vasta kappaleessa "Alkeishiukkaset", joka on kirjassa 40 sivua myöhemmin kuin β -hajoaminen. *Physicassa* on *Fotonin* tapaan esitetty hajoamisten reitit nuklidikartalla. *Physican* esitys on hyvin kompakti ja selkeä.

7.1.6 Gammasäteily

Gammasäteilyä koskevat opetussuunnitelman perusteissa nimetyistä sisällöistä osittain samat kohdat kuin α - ja β -hajoamistakin: radioaktiivisuus, säteilyturvallisuus ja atomin energiatilat. Lisäksi opetussuunnitelman perusteissa on mainittu valosähköilmiö, joka on yksi γ -säteilyn vuorovaikutustavoista. Käsitekartat oppikirjojen γ -säteilyn käsittelystä löytyvät liitteiden kuvista 28, 29 ja 30.

Kaikissa analysoiduissa oppikirjoissa kerrotaan γ -säteilyn olevan sähkömagneettista säteilyä, joka syntyy ytimen viritystilojen purkautuessa. Kirjoista löytyy myös tieto, että γ -säteily voi vuorovaikuttaa aineen kanssa kolmella eri tavalla, jotka ovat valosähköilmiö, Comptonin sironta ja parinmuodostus. Näistä vuorovaikutustodennäköisyyksistä on esitetty kuvaaja säteilyn energian ja väliaineen järjestysluvun funktiona. Lisäksi parinmuodostukselle on annettu kaava

$$\gamma \longrightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_1e.$$

Kaikki kirjat käsittelevät myös γ -säteilyn vaimenemista väliaineessa. Vaimenemisen kerrotaan olevan nopeinta tiheissä väliaineissa, ja sille on annettu heikkenemisyhtälö

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

Myös γ -säteilyn puoliintumispaksuudelle $d_{1/2}$ on annettu yhtälö.

Sivuilla mitattuna *Fotonin* esitys on jälleen laajin. Sivusta puolet on kuitenkin käytetty γ -säteilyn heikkenemistä käsitteleviin esimerkkeihin, ja ainoa korostettu käsite on tähän liittyvä heikkenemiskerroin. *Fotonissa* on annettu kaaviokuvat valosähköilmiön, Comptonin sirontan ja parinmuodostuksen tapahtumisesta, mutta vain parinmuodostus on selitetty sanallisesti. Kirjassa kerrotaan lisäksi γ -säteilyn energian riippuvan nuklidista. *Fotonissa* määritellään gammasäteily seuraavasti:

Radioaktiivisissa hajoamisprosesseissa vapautuu yleensä myös näkyvää valoa lyhytaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä, jota sanotaan gammasäteilyksi.

Tämä määritelmä on sinällään oikea, mutta sanamuodosta saattaa syntyä virhe käsitys, että radioaktiivisissa hajoamisprosesseissa vapautuu yleensä myös näkyvää valoa. Parempi sanamuoto olisi esimerkiksi: "Radioaktiivisissa hajoamisprosesseissa vapautuu yleensä myös gammasäteilyä, joka on näkyvää valoa lyhytaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä."

Fysiikassa gammasäteilyn yhteydessä ei ole enää esitetty kaaviokuvia valosähköilmiön ja Comptonin sironnan mekanismeista, vaan on tyydytty viittaamaan kappaleisiin, joissa ilmiöitä on aiemmin käsitelty. Kirjassa kerrotaan parinmuodostuksessa olevan kyse energian muuntumisesta aineeksi. Lisäksi *Fysiikassa* mainitaan, että parinmuodostusta seuraa aina annihilaatio. α - ja β -säteily mainitaan γ -säteilyn syntylähteenä ja säteilyn aallonpituuden kerrotaan riippuvan ytimeistä, josta se on peräisin. *Fysiikassa* kerrotaan myös γ -säteilyn vuorovaikuttavan ensimmäiseen väliaineen atomien elektronien kanssa ja mainitaan useita käytännön sovelluksia.

Physican esitys on selvästi lyhyempi kuin muiden kirjojen esitykset. Asiaa on kuitenkin saatu mahtumaan lähes yhtä kattavasti kuin *Fysiikassa*. *Physicassa* eri vuorovaikutustavat on koottu taulukkoon, josta löytyy kullekin vuorovaikutustavalle sen tapahtumista selittävä kaaviokuva, sanallinen selitys sekä keskeisin yhtälö. *Physicassa* kerrotaan *Fotonin* tavoin γ -säteilyn energian riippuvan ytimeistä, josta se on peräisin, mutta sovelluksia *Physicassa* on käsitelty vain niukasti.

7.2 Huomioita kirjojen kuvista ja kuvateksteistä

Käsitekarttoja laadittaessa havaittiin, että kirjojen kuvituksessa on suuria määrällisiä ja laadullisia eroja. Kaikkien analysoitujen kirjojen kuvista löydettiin myös joitakin puutteita. Etenkin nämä puutteet haluttiin tuoda esiin, jotta ne voitaisiin korjata käytettäessä oppikirjoja opetusmateriaalina.

Hyvän oppikirjan kuvat ovat monipuolisia, motivoivia ja liittyvät opettavaan aiheeseen. Hyvän kuvan sisältö on myös selitetty riittävän kattavasti kuvatekstissä niin, että sen merkitys avautuu lukijalle. Oppilaan päättelykyky ja ennakkotiedot vaikuttavat kuvatekstin ohella kuvan tulkinnan onnistumiseen. Pelkkä kuva ei vielä takaa, että opiskelija näkee siinä halutun asian. Hyvä kuvateksti ohjaa oleellisen asian havaitsemiseen. Lisäksi kuvan katsomiseen käytetään vain puolet siitä ajasta, joka kuvatekstin lukemiseen käytetään, joten kuvatekstit ovat jo tämänkin vuoksi suositeltavia. [11] [31]. Seuraavassa on aluksi lyhyt yleinen katsaus eri kirjojen kuvituksiin, joita ovat kuvaajat, havainnollistavat kaaviot ja sovellusten kuvat, sekä kuvateksteihin. Tämän jälkeen kirjojen kuvista on tehty tarkempia huomioita käyttäen edellisen kappaleen kanssa yhtenevää jaottelua.

Kaikissa käsitellyissä oppikirjoissa on kuvaajia ja pääsääntöisesti ne ovat selkeitä. *Fysiikassa* ja *Fotonissa* kuvaajien taustalla on ruudutus, jos kuvaaja on esimerkiksi

sä tai osana tehtävänantoa. *Physicassa* ruudutus on usein myös tekstin seassa olevien kuvaajien taustalla. *Physicassa* kuvaajat selitetään pääsääntöisesti sekä kuvatekstissä että tekstissä, kun taas *Fysiikassa* ja *Fotonissa* selitykset löytyvät vain tekstistä. *Fysiikassa* sivuille 31 ja 39 on lipsahtanut virheellisesti kuvaajan otsikoksi ”suhteellinen intensiteetti”, jonka tulisi olla akselin nimenä. Kun tämä yhdistyy siihen, ettei kuvaajissa ole kuvatekstiä, saattaa opiskelija sekoittaa niiden kuvaavan suhteellista intensiteettiä röntgenspektrin sijaan.

Myös erilaisia kaavioita löytyy runsaasti kaikista oppikirjoista. *Physicassa* kaaviot ovat selkeitä ja tukevat hyvin tekstiä. Myös *Fysiikassa* kaaviot ovat selkeitä, mutta suureet jäävät selittämättä useamman kaavion kohdalla (esim. sivuilla 24 ja 115). *Fotonissa* kaaviot on pääsääntöisesti selitetty heikommin kuin kahdessa muussa kirjasarjassa.

Muita kuvia *Fotonissa* on selvästi vähemmän kuin muissa kirjoissa. Kirjan kuvat rajoittuvat lähinnä oppilastöissä käytettävien laitteiden kuviin, joihin ei ole liitetty kuvatekstejä. *Fotonia* voisikin kehittää lisäämällä kuvia ilmiöiden sovelluksista.

Fysiikassa muita kuvia on jokaisessa kappaleessa ja ne on myös liitetty käsiteltäviin ilmiöihin joko kuvatekstien avulla tai varsinaisessa tekstissä. Kuvissa esiintyvät usein ilmiöön liittyvät laitteet tai sovellukset. Oppilastöiden laitteita esittävät kuvat on usein jätetty ilman kuvatekstiä. *Fysiikan* kuvateksteistä löytyy myös muutamia muita puutteita: sivulla 26 kuvatekstin lopussa on ylimääräinen lause ”Perehdy neutriinoihin.”, joka ei liity sivulla olevaan kuvaan, ja sivulla 27 kuvateksti uupuu kokonaan eikä tekstistäkään käy ilmi, mitä kuva esittää.

Physicassa on enemmän kuvia kuin muissa kirjoissa. Myös *Physican* kuvissa esiintyvät usein ilmiöiden sovellukset. Kirjan kuvatestit ovat selvästi informatiivisemmat kuin muissa kirjasarjoissa. Puutteena voi mainita sen, että monet asiat on sanottu vain kuvateksteissä, joten pelkän varsinaisen tekstin lukeminen ei riitä asian oppimiseen. Esimerkiksi karakteristisen röntgensäteilyn K_{α} - ja K_{β} -piikit on mainittu vain kuvatekstissä. Myös sovellusten nimeäminen jätetään *Physicassa* usein täysin kuvien ja kuvatekstien varaan.

Valosähköilmiötä koskevat kuvat

Kaikki oppikirjat esittävät valosähköilmiön yhteydessä tulevan valon taajuuden f ja metallista irtoavien elektronien suurimman mahdollisen liike-energian E_K^{\max}

yhteyttä kuvaavan (f, E_K^{\max}) -kuvaajan. *Physicassa* kuvaajaan on liitetty selkeä kuvateksti ja kuvaajan tulkinta on esitetty selkeimmin. Myös *Fotonissa* tärkeimmät kuvaajaan liittyvät suureet on merkitty kuvaajaan. *Fysiikassa* kuvaajan tulkintaa ei ole selitetty kuvassa lainkaan. Kaikissa kirjoissa on esitetty myös havainnekuva valosähköilmiöstä. *Fysiikassa* ja *Fotonissa* kuvaan ei ole liitetty minkäänlaista kuvatekstiä. *Fotonissa* kuva on selkeä, *Fysiikassa* kuvaa voisi parantaa merkitsemällä elektronien suunnan esimerkiksi nuolella, kuten muissa kirjasarjoissa on tehty. Lisäksi *Fysiikassa* kuvaan ei ole merkitty irrotustyötä, joka muiden kirjojen kuvista löytyy. *Physicassa* valosähköilmiön mekanismi on kuvattu elektroskoopin avulla ja ilmiön yleisempi kuva löytyy vasta myöhemmin γ -säteilyn kohdalta. Sekä *Physicassa* että *Fotonissa* esitetään lisäksi elektroniputken (U,I)-kuvaaja ja selitetään miten siitä voidaan tulkita pysäytysjännite. *Physican* kuvatekstin selitys kuvaajan tulkinnasta ja muodostumisesta on *Fotonia* kattavampi ja lisäksi *Physicassa* on esitetty eri metallien (f, E_K^{\max}) -kuvaajia.

Comptonin ilmiötä koskevat kuvat

Kaikista oppikirjoista löytyy Comptonin ilmiön siroamiskuva (vertaa kuvaan 7). *Fotonin* kuvassa on esitetty sironta atomiin sidotun elektronin kanssa. *Fysiikassa* ja *Physicassa* on esitetty sironta vapaan elektronin kanssa. Yksikään kirjasarja ei esitä kuvaa ilmiöstä sekä vapaan että löyhästi sidotun valenssielektronin kanssa, eikä ilmaise tätä myöskään tekstissä. *Fotonissa* ja *Fysiikassa* esitetään kuva mittausasetelmasta, jolla Comptonin sironnan spektri saadaan selvitettyä.

Röntgensäteilyä koskevat kuvat

Röntgensäteilyyn liittyen oppikirjat sisältävät monipuolisesti kuvia. Jokaisessa kirjassa on esitetty röntgenputken rakenne. *Fysiikan* ja *Fotonin* kaaviot ovat hyvin pelkistetyt verrattuna *Physican* kaavioon, joka on paljon teknisempi. *Fotonissa* ja *Physicassa* röntgenputken osat on nimetty, sen sijaan *Fysiikan* kuvateksti "Kaavio röntgenputkesta." on hyvin epäinformatiivinen. Kaikista kirjoista löytyy kuva röntgensäteilyn spektristä, mutta vain *Physicassa* esitetään todellinen molybdeenin röntgenspektri muiden kirjojen tyytyessä yleiseen esitykseen. Lisäksi kaikista kirjoista löytyy kaaviokuva karakteristisen röntgensäteilyn piikkien synnystä. *Fotonissa* ja *Fysiikassa* tyydytään esittämään K-piikkien synty. Niissä esitettyihin

kaaviokuvaan on merkitty ydin. *Physicassa* esitetään K-piikkien lisäksi myös L-piikkien synty, mutta ydin on jätetty piirtämättä. Nämä L-piikit ovat nähtävissä myös *Physicassa* esitetyn röntgenspektrin kuvaajassa (s.63), jossa karakterisen säteilyn piikkejä on kuusi kappaletta. *Fysiikassa* on esitetty muista kirjoista poiketen kaavio myös jarrutussäteilyn synnystä. Kaikki kirjat käsittelevät Braggin lakia röntgendiffraktion yhteydessä ja röntgensäteiden heijastuminen hilasta on esitetty piirroksena jokaisessa kirjassa.

Alfasäteilyä koskevat kuvat

Fysiikka sisältää α -hajoamisesta vain yhden havainnekuvan, jossa on esitetty α -hajoava ydin. Vastaava kuva löytyy myös *Physicassa*. Sekä *Physicassa* että *Fotonissa* on esitetty α -säteilyn spektri ja hajoamiskaavio. *Fotonissa* spektriin on liitetty hyvä kuvateksti, mutta hajoamiskaaviosta kuvateksti puuttuu ja lisäksi kaavion merkintöjä ei ole selitetty. *Physicassa* sekä spektri että hajoamiskaavio on selitetty, mutta spektrin pysty akselin nimeäminen on unohtunut. *Physicassa* hajoamiskaavioon on merkitty eri reittien todennäköisyydet. Sekä *Fotoni* että *Physica* sisältävät kuvan myös α -hajoamisesta nuklidikartalla.

Beetasäteilyä koskevat kuvat

Fysiikka ja *Physica* sisältävät havainnekuvat β^- - ja β^+ -hajoavista ytimistä sekä elektronisieppauksesta. Molempien kirjojen kuvista käy ilmi myös, miten elektronisieppauksessa syntyy röntgensäteilyä. *Fotonissa* β^- -hajoamisen ytimien kuva on otsikon "Elektronisieppaus" alle, vaikka sen kuuluisi olla vasta seuraavassa esimerkissä. *Fotonissa* ja *Fysiikassa* esitetään β^- -spektrin kuvaaja, mutta *Fotonissa* kuvaajasta puuttuu kuvateksti. *Fysiikka* sisältää β^+ -hajoamiskaavion ja *Fotoni* sekä *Physica* sisältävät kuvat β^- - ja β^+ -hajoamisista nuklidikartalla.

Gammasäteilyä koskevat kuvat

Gammasäteilyn vuorovaikutustapojen todennäköisyyksien kuvaaja säteilyn energian funktiona on esitetty kaikissa oppikirjoissa. *Physicassa* ja *Fotonissa* on esitetty kertauksena kaaviokuvat valosähköilmiöstä sekä Comptonin sironnasta, kun *Fysiikassa* on tyydytty viittaamaan aiempaan lukuun. Kaikissa kirjoissa on kuva parinmuodostuksesta, mutta *Fysiikan* kuvasta puuttuu kuvateksti. *Physicassa* kuviin on

liitetty hyvät selitykset. *Fysiikasta* löytyy (x,I)-kuvaaja γ -säteilyn vaimenemisesta, ja myös *Fotonissa* vastaava kuvaaja on esitetty esimerkin yhteydessä. *Physicasta* tällainen kuvaaja puuttuu, mutta *Physicassa* on esitetty kuva γ -säteilyn synnystä.

Oppikirjojen α -, β - ja γ -säteilyä käsittelevissä luvuissa on huomattava määrä virheellisiä havainnekuvia hajoavien atomien ytimistä. *Fysiikassa* ja *Fotonissa* α - ja β -hajoamiseen liittyvistä havainnekuvista saa sellaisen käsityksen, että ydin säilyy hajoamisessa muuttumattomana. Nämä kuvat ovat siis virheellisiä. *Fysiikassa* ^{226}Ra -, ^{222}Rn -, ^{238}U -, ^{234}Th -, ^{213}Bi -, ^{213}Po -, ^{106}Ag - ja ^{106}Pd -ytimet ja *Fotonissa* ^{263}Sg -, ^{259}Rf -, ^{206}Tl - ^{206}Pb - ja ^{152}Dy -ytimet on esitetty keskenään identtisillä symbolisilla kuvilla. *Physicassa* α - ja β -hajoamisen kuvissa on sen sijaan erikseen korostettu sitä, miten ytimet muuttuvat. Näiltä osin *Physican* kuvat ovat siis huomattavasti paremmat kuin *Fotonissa* ja *Fysiikassa*. *Physicassa* on kuitenkin hieman vastaava virhe γ -säteilyn kohdalla, kun ytimen on piirretty pienentyvän merkittävästi emittoidessaan γ -kvantin.

7.3 Oppikirja-analyysin yhteenveto

Tehdyn analyysin perusteella kaikki oppikirjat toteuttavat ionisoivan säteilyn osalta lukion opetussuunnitelman perusteet. Analyysissa huomattiin, että osa lukuun 4 kootuista ennako- ja virhekäsityksistä on huomioitu oppikirjoissa, mutta kaikkien kirjojen sisällössä havaittiin tässä suhteessa joitakin puutteita.

Tutkimuksissa on todettu opiskelijoilla olevan usein vaikeuksia käsitteiden hallinnassa. Esimerkiksi käsitteet säteily ja kontaminaatio sekoitetaan usein toisiinsa. Yksikään oppikirja ei käsitellyt kontaminaatiota ionisoivan säteilyn yhteydessä, joten käsitteiden välinen ero ei tule opiskelijoille selväksi pelkästään kirjan tekstiä lukemalla. Oppikirjat eivät myöskään haasta riittävästi opiskelijoiden mahdollisesti naiiveja, virheellisiä ja tilannesidonnaisia käsityksiä ionisoivasta säteilystä. Kaikki oppikirjat käsittelevät ionisoivaa säteilyä historiallisessa viitekehyksessä, mutta esimerkiksi Tsernobylin ja Fukushima ydinvoimalaturmia käsitellään vain *Fysiikassa*. *Fysiikassakin* tämä käsittely on tehty vasta ionisoivan säteilyn käsittelyn jälkeen ja onnettomuuksista on kuvattu lähinnä niiden haitallisia jälkiseurauksia. Jos opiskelijalla on alkujaan negatiivisia mielikuvia ionisoivasta säteilystä, oppikirjat eivät aktiivisesti pyri näitä purkamaan. Opiskelijoilla saattaa olla myös vaikeuksia hahmottaa, mihin säteilyn energia lopulta päättyy väliaineessa, sillä tätä ei ole selkeästi kerrottu oppikirjoissa. Myös radioaktiivisuuden syntymekanismia

käsitellään oppikirjoissa melko lyhyesti, joten opiskelijoiden mahdollinen virhekäsitys, että säteily saa aikaan radioaktiivisuutta sille altistetussa materiaalissa, ei tule kunnolla korjatuksi.

Jos opiskelijat haastetaan syvempään älylliseen sitoutumiseen omassa opiskelussaan, heidän oppimistuloksiansa on huomattu parantuvan. Tällaiseen sitouttamiseen *Fysiikan* pohdintatehtävät ja itsearviointiosiot ovat hyvä työkalu, vaikka pohdintatehtävät voisivat olla monipuolisempia. Esimerkiksi avoimet kysymykset monivalintatehtävien lisänä saattaisivat haastaa opiskelijan pohtimaan oppimaansa syvemmin. Pohdintatehtävillä saadaankin parhaassa tapauksessa opiskelijat pohtimaan käsiteltyjä aiheita tarkemmin, ja tämä saattaa auttaa heitä paremmin soveltamaan oppimaansa.

Yksi kirjallisuudessa havaittu oppimisen este on opiskelijoiden vaikeus käsitellä hiukkasia atomitasolla. Kaikissa oppikirjoissa on käsitelty atomin rakennetta ennen radioaktiivisen hajoamisen käsittelyä, joten oppikirjojen esitystapa on tältä kannalta katsottuna hyvä. *Fotonissa* röntgensäteilyn absorptiota on verrattu valon absorptioon, mikä on myös yksi kirjallisuudessa mainittu tapa parantaa opiskelijoiden ymmärrystä aiheesta. Toisaalta edellä esille tuodut virheet ja epätarkkuudet kirjojen ytimien radioaktiivisista hajoamista havainnollistavissa kuvissa ovat valitettavia ja voivat vaikeuttaa asian ymmärtämistä ja jopa luoda uusia virhekäsityksiä.

Fotonin vahvuuksiin kuuluu, että se sisältää paljon lisätietoa ja tehtäviä. *Fotonin* heikkoudeksi taas voidaan laskea se, ettei se sisällä lukujen lopussa minikäänlaista tiivistelmää tärkeimmistä asioista eikä tärkeimpiä sanojakaan ole joka luvussa korostettu lainkaan tekstin seasta. *Fotonissa* käsitteet on välillä jätetty määrittelemättä selkeästi, ja osa aiheista on selostettu heikommin kuin muissa oppikirjoissa. Esimerkiksi Comptonin sironnan käsittely grafiitin ja röntgensäteilyn välisen törmäyksen avulla ei ole erityisen selkeä. *Fotonissa* ei myöskään kerrota röntgensäteilyn olevan sähkömagneettista säteilyä, vaikka sen absorptiota verrataankin näkyvän valon absorptioon. *Fotonissa* on kirjoista selvästi vähiten kuvia. Esimerkiksi sovelluksia esittävien kuvien lisääminen sitoisi opittua asiaa käytäntöön. *Fotonin* kuvatekstit eivät ole yhtä selkeät kuin muissa kirjoissa ja etenkin kaavioiden selitykset ovat usein vajaita. *Fotonin* puutteiksi voidaan laskea myös kirjan asiavirheet, joita havaittiin radioaktiivisen hajoamisen kohdalla, kun Elektronisieppaus-otsikon alla on kuva β^- -hajoamisesta ja α - sekä β -hajoamisessa

ytimet pysyvät virheellisesti muuttumattomina.

Fysiikan tapa esittää tietoa on hyvin selkeä ja käsitteille on annettu selkeät ja muusta tekstistä korostetut määritelmät. Lukujen lopussa olevat pohdintatehtävät ja tiivistelmät ovat myös hyvät olemassa. Lukujen alussa on lisäksi kerrottu, mitkä ovat kyseisen luvun oppimistavoitteet, mikä auttane opiskelijoita jäsentämään oppimistaan. Lukujen alussa voisi vielä lyhyesti kerrata tai listata ennakkotiedot, jotka opiskelijan tulisi palauttaa mieleen uutta asiaa opiskellessaan. *Fysiikka* sisältää oppikirjoista eniten tehtäviä β -säteilystä ja kertoo kaikista käsitellyistä aiheista paljon käytännön sovelluksia. *Fysiikassa* käsitellään muita kirjasarjoja kattavammin α -säteilyn vuorovaikutusmekanismeja väliaineen kanssa. Kirjassa kerrotaan myös β^+ -säteilyssä ja elektronisieppauksessa syntyvän positronin annihiloituvan. Muista kirjasarjoista tämä tieto puuttui tai sitä ei ole käsitelty radioaktiivisen hajoamisen yhteydessä. *Fysiikan* puutteeksi voidaan laskea Comptonin ilmiön suppea käsittely muihin kirjasarjoihin verrattuna. Comptonin ilmiötä ja valosähköilmiötä ei *Fysiikassa* käsitellä uudelleen γ -säteilyn yhteydessä, kuten muissa oppikirjoissa, vaan *Fysiikassa* tyydytään tässä kohden vain viittaamaan aiempaan lukuun, jossa ilmiöt on selitetty. Mekanismien tarkempi kertaus saattaisi kuitenkin auttaa opiskelijoita muodostamaan vahvemman yhteyden näiden ilmiöiden ja γ -säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen välille. *Fysiikan* kuvatekstit ovat usein puutteelliset ja niissä on paikoittain virheitä. *Fysiikan* kuvista on löydettävissä puutteita muun muassa kuvaajien akselien nimeämisessä. Ytimien α - ja β -hajoamisia havainnollistavissa kuvissa on myös valitettavia virheitä.

Physica sisältää oppikirjoista eniten kuvia ja sen kuvatekstit ovat ylivoimaisesti parhaat, sillä ne sisältävät paljon selkeästi esitettyä tietoa. *Physicassa* määritelmät on esitetty selkeästi ja ne on korostettu. Lukujen lopussa on esitetty lista tärkeimmistä käsitteistä ja käsitekartta, joka helpottaa opitun kertaamista ja jäsentämistä. *Physicassa* käsitellään röntgensäteilyä oppikirjoista laajimmin ja myös Comptonin ilmiö on esitetty laajahkosti. *Physicassa* käsitellään α - ja β -säteilyn vuorovaikutusta hyvin ja korostetaan radioaktiivisiin hajoamisiin liittyviä ytimissä tapahtuvia muutoksia selkeästi. γ -säteilyn yhteydessä *Physicassa* kootaan eri vuorovaikutustavat selkeyttävään taulukkoon. *Physican* hyvät kuvatekstit ovat myös kirjan puute, sillä monet asiat jäävät pelkästään kuvatekstin varaan, koska niitä ei ole kerrottu varsinaisessa tekstissä lainkaan. Tämä on luultavasti tietoinen valinta tilan säästämiseksi. Oppikirjaa luettaessa onkin luultavasti hyvä korostaa opiskelijalle kuvatekstien merkitystä. Esimerkiksi karakteristisen röntgensäteilyn

spektrin piikkien synty on selitetty vain kuvatekstissä. *Physicassa* ei mainita annihilaatiota β^+ -säteilyn ja elektronisieppauksen yhteydessä, vaan käsitellään se vasta myöhemmässä luvussa, mikä saattaa vaikeuttaa näiden käsitteiden yhdistämistä. γ -säteilyn synnystä *Physicassa* esitetään muista kirjoista poiketen kuva. Tämä kuva on kuitenkin virheellinen, sillä sen mukaan atomin ydin pienentyisi merkittävästi emittoidessaan γ -kvantin.

8 Johtopäätökset

8.1 Huomioita oppikirjoista

Ionisoivan säteilyn käsittely fysiikan opettajien yliopistokoulutuksessa saattaa joidenkin opiskelijoiden kohdalla olla hyvin vähäistä [17]. Näin ollen aihetta lukiossa opettavien opettajien omat pohjatiedot aiheesta saattavat olla vajavaiset, ja heidän antamansa opetus voi nojautua vahvasti käytössä olevaan oppikirjaan, mikä on havaittu myös asiaa koskevissa tutkimuksissa [12, s.233]. Tämän tutkielman analyysissä havaittiin, että käytössä olevissa lukion fysiikan oppikirjasarjoissa on eroja, joten oppikirjan valinnalla saattaa olla merkitystä opetuksen onnistumisen kannalta. Kaikkien oppikirjojen havaittiin käsittelevän lukion opetussuunnitelman perusteissa mainittuja keskeisiä sisältöjä ionisoivasta säteilystä. Opetussuunnitelma on kuitenkin hyvin suurpiirteinen, ja kirjantekijöille jää paljon päätäntävaltaa siitä, mitä kaikkea kirjat sisältävät.

Kaikkia analysoituja oppikirjoja voisi parantaa kertaamalla tai luettelemalla aiheen vaatimia ennakkotietoja aina uuden aiheen käsittelyä aloitettaessa. Esimerkiksi *Fysiikan* ratkaisu tyytyä viittaamaan aiempiin kappaleisiin käsiteltäessä γ -säteilyn vuorovaikutustapoja ei ole yhtä vakuuttava kuin *Fotonin* ja *Physican* ratkaisu kerata tässä yhteydessä valosähköilmiö ja Comptonin sironta. Toisaalta *Fysiikan* tapa esitellä oppimistavoitteet jokaisen luvun alussa on hyvä, ja tästä muut kirjasarjat voisivat ottaa oppia.

Physican suurin vahvuus on sen selkeät kuvat ja selittävät kuvatekstit. Valitettavan usein *Physicassa* selitetään asioita kuitenkin vain kuvateksteissä, mikä ei ole välttämättä paras ratkaisu. Oppimista tuskin haittaisi, jos asiat olisi esitetty myös varsinaisessa tekstissä. Toisaalta muiden kirjojen tapa käyttää äärimmäisen lyhyitä, jopa yksisanaisia, kuvatekstejä on huono. Kuva, jota ei ole selitetty kunnolla, ei välttämättä opeta opiskelijalle yhtään mitään, vaikka kuva liittyisikin suoraan varsinaisessa tekstissä käsiteltyyn asiaan. [11] [31]

Fotonissa asiat on usein esitetty epäselvemmin kuin muissa oppikirjoissa ja etenkin määritelmien selkeyteen ja korostamiseen olisi syytä kiinnittää enemmän huomiota. Kirjan vahvuutena on paikoin runsas lisätiedon määrä ja myös tehtäviä *Fotonissa* on selvästi enemmän kuin muissa oppikirjoissa. Kuvia *Fotoni* puolestaan sisältää paljon muita kirjasarjoja vähemmän, ja kuvien avulla oppijoille tämä voi aiheuttaa vaikeuksia. Sovellusten kuvat saattaisivat myös auttaa opiskelijaa oivaltamaan, miten fysiikka ilmenee tieteessä, taiteessa ja arkiympäristössä. Tä-

män yhteyden luominen on nimetty yhdeksi fysiikan opetuksen tavoitteista myös lukion opetussuunnitelman perusteissa [26].

Verrattaessa käytössä olevien lukion fysiikan oppikirjojen esityksiä kirjallisuudessa havaittuihin yleisimpiin ennakko- ja virhe käsityksiin, huomattiin kaikissa oppikirjoissa olevan puutteita. Esimerkiksi opiskelijoiden mahdollisesti erittäin negatiivisia ennakkoasenteita ja pelkoja ionisoivaa säteilyä kohtaan ei pyritä kunnolla korjaamaan, vaikka näiden on havaittu joskus aiheuttavan suuria esteitä aiheen oppimiselle [32]. Esimerkiksi Tsernobylin ja Fukushima ydinvoimalaitoksissa tapahtuneista onnettomuuksista on puhuttu vain *Fysiikan* loppupuolella, ja tällöinkin on lähinnä keskitytty kertomaan, että näissä onnettomuuksissa ympäristöön vapautui radioaktiivisia päästöjä. Tällainen käsittely tuskin muuttaa opiskelijoiden käsityksiä ionisoivasta säteilystä positiivisemmiksi. Mahdollisten negatiivisten ennakkoasenteiden ja pelkojen säilyminen on valitettavaa, etenkin kun opiskelija, jolla on kurssille tullessa hyvin negatiivinen käsitys ionisoivasta säteilystä, saattaa koko alkukurssin vältellä aiheen oppimista ennakkoasenteidensa takia.

Kaikissa analysoiduissa oppikirjoissa havaittiin virheitä ytimien radioaktiivista hajoamista esittävässä kuvissa. Kirjallisuudessa on ehdotettu, että yksi mahdollinen syy aiheeseen liittyviin oppimisvaikeuksiin, saattaa olla opiskelijoiden vaikeus käsitellä atomimalleja mikrotasolla, ja tällaiset perustavanlaatuiset virheet kuvissa ovat omiaan lisäämään näitä oppimisvaikeuksia [29].

Oppikirjojen luettavuutta parantaisi myös käsitteiden selkeä määrittely, joka etenkin *Fotonista* valitettavan usein puuttuu. Tämä määrittely on tärkeää, koska useissa tutkimuksissa opiskelijoilla on havaittu merkittäviä puutteita käsitteiden erottamisessa toisistaan [9] [5] [25] [29]. Toisaalta myös opiskeltavan aiheen kannalta tärkeimmät sanat on hyvä korostaa varsinaisen tekstin joukosta. Kaikki kirjat ovat tällaisia korostuksia tehneet, mutta *Fotonissa* tämä linja ei ole yhtenäinen ja joistakin kappaleista korostukset puuttuvat. Myös *Physicassa* on Comptonin ilmiötä käsittelevässä kappaleessa parantamisen varaa, kun korostettuja sanoja ovat "sidottu" ja "koko atomin kanssa", jotka liittyvät kuitenkin Thomsonin ilmiöön.

Oppikirjat eivät riittävästi haasta opiskelijoita ajattelemaan oppimaansa ja havaitsemaan omien ennakkokäsitystensä mahdollisia virheellisyksiä. Näiden virheellisen käsitysten osoittaminen ja korjaaminen jäävät opettajan vastuulle. Opiskelijoiden syvempi älyllinen sitouttaminen käsiteltäviin aiheisiin on niin ikään

jätetty opettajan vastuulle kaikissa kirjasarjoissa, sillä esimerkiksi varsinaisia keskustelutehtäviä ei mikään oppikirjoista tarjoa, vaikka tutkimuksissa on havaittu puhumalla oppiminen hyvin tehokkaaksi oppimistavaksi [35]. *Fysiikan* ainoana kirjasarjana tarjoamat pohdintatehtävät ovat tyypiltään monivalintatehtäviä, jotka voivat toimia keskustelun herättäjänä. Kaikki analysoidut oppikirjat saattaisivat hyötyä avoimien kysymysten lisäämisestä tehtävävalikoimaansa.

Lukion oppikirjoja käytetään, paitsi lukion opetusmateriaalina, myös pääsykoeaineistona useisiin korkeakouluihin pyrittäessä. Tällöin käytettävällä oppikirjalla saattaa olla suuri merkitys, sillä lukion opetussuunnitelman ulkopuolisen lisätiedon määrässä on havaittavissa merkittäviä eroja eri oppikirjojen kesken. Toisaalta ylioppilaskirjoituksiin lukiessa opiskelijan saattaa olla vaikea poimia kurssin sisällön kannalta oleelliset asiat oppikirjasta, jos lisätieto-osioita ei ole selkeästi eroteltu muusta oppiaineesta. Tässä opettajan merkitys kirjan lukemisen avustajana ja tärkeimpien asioiden esiinnostajana korostuu.

8.2 Havainnot työn tekemisestä

Tutkimukseen haluttiin ottaa mukaan kaikki käytössä olevat nykyisen lukion opetussuunnitelman mukaiset oppikirjat. Näistä kirjoista *Fotonista* on ilmestynyt vain yksi painos, vaikka kirja selvästi kaipaisi päivitystä. Aiheen rajaaminen ionisoivan säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen tutkimiseen osoittautui haastavaksi, sillä kappaleissa, joissa tätä vuorovaikutusta käsiteltiin, sivuttiin usein myös muita aiheita. Toisaalta ionisoivaa säteilyä sivuttiin myös kappaleissa, jotka jätettiin tässä analyysissä vähemmälle huomiolle. Käsitekartta-analyysissä keskityttiin käsittelemään oppikirjojen valosähköilmiötä, Comptonin sirontaa, röntgensäteilyä, sekä α -, β - ja γ -säteilyä koskevia kappaleita, ja muista kappaleista otettiin esille yksittäisiä asioita silloin, kun ne koettiin oleellisiksi.

Käsitekarttojen teon suurimmat vaikeudet liittyivät tärkeimpien aiheiden rajaamiseen. Alunperin kuvatekstit rajattiin käsitekarttojen ulkopuolelle, mutta koska *Physicassa* monet asiat on esitetty selkeästi nimenomaan kuvateksteissä, päädyttiin ne lopulta ottamaan mukaan käsitekarttoihin silloin, kun niissä oli esitetty jotain oppimisen kannalta oleellista. Myös sovellusten ja ilmiöiden historian käsittelyn rajaamisessa oli vaikeuksia. Toisaalta käsitekarttoihin ei voinut sisällyttää kaikkea kirjoissa käsiteltyä, mutta toisaalta tuntui väärältä ratkaisulta rajata kokonaan pois jotain sellaista, mihin kirjasarjassa on selvästi panostettu. Sovellusten osalta

pyrittiin lopulta mainitsemaan kirjoissa esiteltyt sovellukset nimeltä puuttumatta juurikaan niiden toimintamekanismeihin. Historian osalta pyrittiin esittämään käsiteltoissa keskeisiä nimiä ja vuosilukuja. Kaiken kaikkiaan käsiteltoja tehdessä pyrittiin mahdollisimman suureen yhdenmukaisuuteen.

Kirjallisuudesta löytyy paljon tutkimuksia ionisoivan säteilyn ja aineen välisen vuorovaikutuksen oppimisesta sekä opettamista. Kotimaisia tutkimuksia aiheesta ei löytynyt, mutta ulkomailta saadut tulokset lienevät yleistettävissä koskemaan myös suomalaista lukio-opetusta. Tämän yleistyksen tekemistä tukee se, että eri maista saadut tulokset olivat usein keskenään yhteneväisiä.

Analyysissa löydettiin kirjojen väliltä runsaasti eroavaisuuksia. Tehty analyysi voidaan luultavasti jollain tarkkuudella yleistää koskemaan kokonaisia kirjasarjoja, mutta tätä varten tulisi kuitenkin tehdä vielä lisätutkimusta. Koska kaikista oppikirjoista analysoitiin systemaattisesti samat asiasisällöt ja niitä verrattiin luvuissa 2, 3 ja 4 esitettyihin tietoihin, on tutkielman luotettavuus hyvä.

Laaditut käsiteltoat antavat kuvan kirjojen ionisoivaa säteilyä koskevasta sisällöstä, ja laadittuja käsiteltoja sekä niiden perusteella tehtyä analyysia voidaan käyttää valittaessa käytettävää oppikirjasarjaa aiheen käsittelyyn. Analyysia voisi laajentaa tarkastelemalla koko FY8-kurssin oppikirjoja ja niin ikään olisi mielenkiintoista tietää, mitä lisätietoja opettajanoppaat mahdollisesti tarjoavat. Nyt laaditut käsiteltoat eivät sisällä kattavaa tietoa käsitteiden linkittymisestä aiheen sisällä, ja tämä voisi myös olla yksi mahdollinen lisätutkimuksen aihe.

Viitteet

- [1] S. Alsop. *Modelling informed learning in public understanding of science*. Väitöskirja, University of Surrey, Guildford, UK, 1998.
- [2] S. Alsop ja M. Watts. Facts and feelings: Exploring the affective domain in the learning of physics. *Physics Education*, 35 (2):132–138, 2000.
- [3] Donald F. Dansereau & Richard H. Hall Angela M. O'Donnell. Knowledge maps as scaffolds for cognitive processing. *Educational Psychology Review*, 14(1):71–86, 2002.
- [4] E. Boyes ja M. Stanisstreet. Children's ideas about radioactivity and radiation: Sources, modes of travel, uses and dangers. *Science Education*, 12(2):145–160, 1994.
- [5] N. Colclough et al. Pre-service teachers' subject knowledge of and attitudes about radioactive and ionising radiation. *International Journal of Science Education*, 33(3):423–446, 2011.
- [6] S. Cooper et al. Australian students' views on nuclear issues: Does teaching alter prior beliefs? *Physics Education*, 38(3):123–129, 2003.
- [7] Jack Hassard & Michael Dias. *The Art of Teaching Science*. Taylor and Francis, New York, NY 10016, toinen laitos, 2009.
- [8] H. M. C. Eijkelhof. *Radiation and Risks in Physics Education*. CD-β, Utrecht, 1990.
- [9] H. M. C. Eijkelhof et al. Perceived incidence and importance of lay-ideas on ionization: results of a delphi study among radiation experts. *Science Education*, 74(2):183–195, 1990.
- [10] J. Maalampi & J. Leskinen H. Lehto, R. Havukainen. *FYSIIKKA 8, Aine ja säteily*. Tammi, ensimmäinen laitos, 2011.
- [11] Matti Hannus. *Oppikirjan kuvitus: Koriste vai ymmärtämisen apu*. Turun yliopisto, Turku, 1996.
- [12] Juha-Pekka Heinonen. *Opetussuunnitelmat vai oppimateriaalit*. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Helsinki, Suomi, 2005.
- [13] Soveltavan kasvatustieteen laitos Helsingin yliopisto, Käyttäytymistieteellinen tiedekunta. Graafiset tiedonesittämismenetelmät: käsitekartta. <http://www.edu.helsinki.fi/malu/kirjasto/tieto/kasitek/> [viitattu 10.2.2012].
- [14] E. K. Henriksen ja D. Jorde. High school students' understanding of radiation and the environment: can museums play a role? *Science Education*, 85(2):189–206, 2001.

- [15] J. Sirviö J. Viiri & S. Yrjänäinen J. Hatakka, H. Saari. *Physica 8, Aine ja säteily*. WSOY, ensimmäinen laitos, 2009.
- [16] & Alberto J. Ca nas Joseph D. Novak. The theory underlying concept maps and how to construct and use them (technical report ihmc cmaptools 2006-01 revision 01-2008). <http://cmap.ihmc.us/Publications/ResearchPapers/TheoryUnderlyingConceptMaps.pdf> [viitattu 10.5.2012].
- [17] Fysiikanlaitos Jyväskylän yliopisto. Fysiikan opinto-opas 2011-2014. <https://www.jyu.fi/fysiikka/opiskelu/opinto-opas-2011-2014> [viitattu 13.2.2012], 2011.
- [18] Juhani Kantele. *Handbook of Nuclear Spectrometry*. Academic Press Limited, Academic Press Limited, 24-28 Oval Road, London NW1 7DX, ensimmäinen laitos, 1995.
- [19] C. S. Keay. *Nuclear Energy Fallacies: Forty Reasons to Stop and Think*. The Enlightenment Press, Wratoh, New South Wales, 2001.
- [20] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, Inc, Republic of Singapore, ensimmäinen laitos, 1988.
- [21] John Lilley. *Nuclear Physics, Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, toinen laitos, 2002.
- [22] A. M. Lucas. Public knowledge of radiation. *Biologist*, 34:125–129, 1987.
- [23] L. McDermott ja E. F. Redish. Resoure letter: Per \sim 1, physics education research, american journal of physics. *Physics Education Research supplement*, 67:757–763, 1999.
- [24] R. Millar. School students' understanding of key ideas about radioactivity and ionizing radiation. *Physics Education*, 3(1):53–70, 1994.
- [25] Robin Millar ja Jarnail Singh Gill. School students' understanding of processes involving radioactive substances and ionizing radiation. *Physics Education*, 31(1):27–33, 1996.
- [26] OPH. *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*. Opetushallitus, 2003. Saatavilla myös http://www.oph.fi/download/47345_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2003.pdf.
- [27] Maija Pehkonen. *Fysiikan käsitekarttojen sisällön ja graafisen rakenteen arviointi opettajankoulutuksessa*. Pro gradu, Helsingin yliopisto, Matemaattisluonnontieteellinen tiedekunta, Fysikaalisen tieteiden laitos, Helsinki, Suomi,

2007. Saatavilla myös <http://per.physics.helsinki.fi/kirjasto/ont/mpehkonen/gradu.pdf>.
- [28] E. E. Prather. *An investigation into what students think and how they learn about ionizing radiation and radioactivity*. Väitöskirja, University of Maine, Orono, Maine, 2000.
- [29] Edward Prather. Student's beliefs about the role of atoms in radioactive decay and half-life. *Journal of Geoscience Education*, 53(9):345–354, 2005.
- [30] D. R. Bednarek R. Kaszmarek ja Wong. Misconceptions of medical students about radiological physics. *Health Physics*, 12:67–78, 1987.
- [31] Lilian Leivas Pozzer & Wolff-Michael Roth. Prevalence, function and structure of photographs in high school biology textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(10):1089–1114, 2003.
- [32] J. Hanson S. Alsop ja M. Watts. Pupils' perceptions of radiation and radioactivity: the wary meet the unsavoury. *School Science Review*, 79:75–79, 1998.
- [33] P. Ketolainen & F. Stenman S. M. Eskola. *Fotoni 8, FY8 Aine ja säteily*. Otava, ensimmäinen laitos, 2007.
- [34] Nighat Nisar Syed Mohammed Mubeen, Qamar Abbas. Knowledge about ionising and non-ionising radiation among medical students. *Journal of Ayub Medical College, Abbottabad : JAMC*, 20(1):118–121, 2008.
- [35] Jouni Viiri ja Heikki Saari. Teacher talk patterns in science lessons: Use in teacher education. *Journal of Science Teacher Education*, 17:347–365, 2006.
- [36] L. S. Vygotsky. *Mind in society: The development of higher psychological processes*. MA: Harvard University Press, Cambridge, England, 1978.

A Käsittekartat lukion fysiikan oppikirjojen keskeisistä sisällöistä ionisoivaan säteilyyn liittyen

Valosähköilmion käsittely Fotoni 8-kirjassa

Valosähköilmion käsittely Fysiikka 8-kirjassa

Valosähköilmion käsittely Physica 8-kirjassa

Comptonin ilmiön käsittely Fotoni 8-kirjassa

Comptonin ilmiön käsittely Fysiikka 8-kirjassa

Comptonin ilmiön käsittely Physica 8-kirjassa

Röntgensäteilyn käsittely Fotoni 8-kirjassa

Röntgensäteilyn käsittely Fysiikka 8-kirjassa

Röntgensäteilyn käsittely Physica 8-kirjassa

Alfahajoamisen käsittely Fotoni 8-kirjassa

Alfahajoamisen käsittely Fysiikka 8-kirjassa

Alfahajoamisen käsittely Physica 8-kirjassa

Beetahajoamisen käsittely Fotoni 8-kirjassa

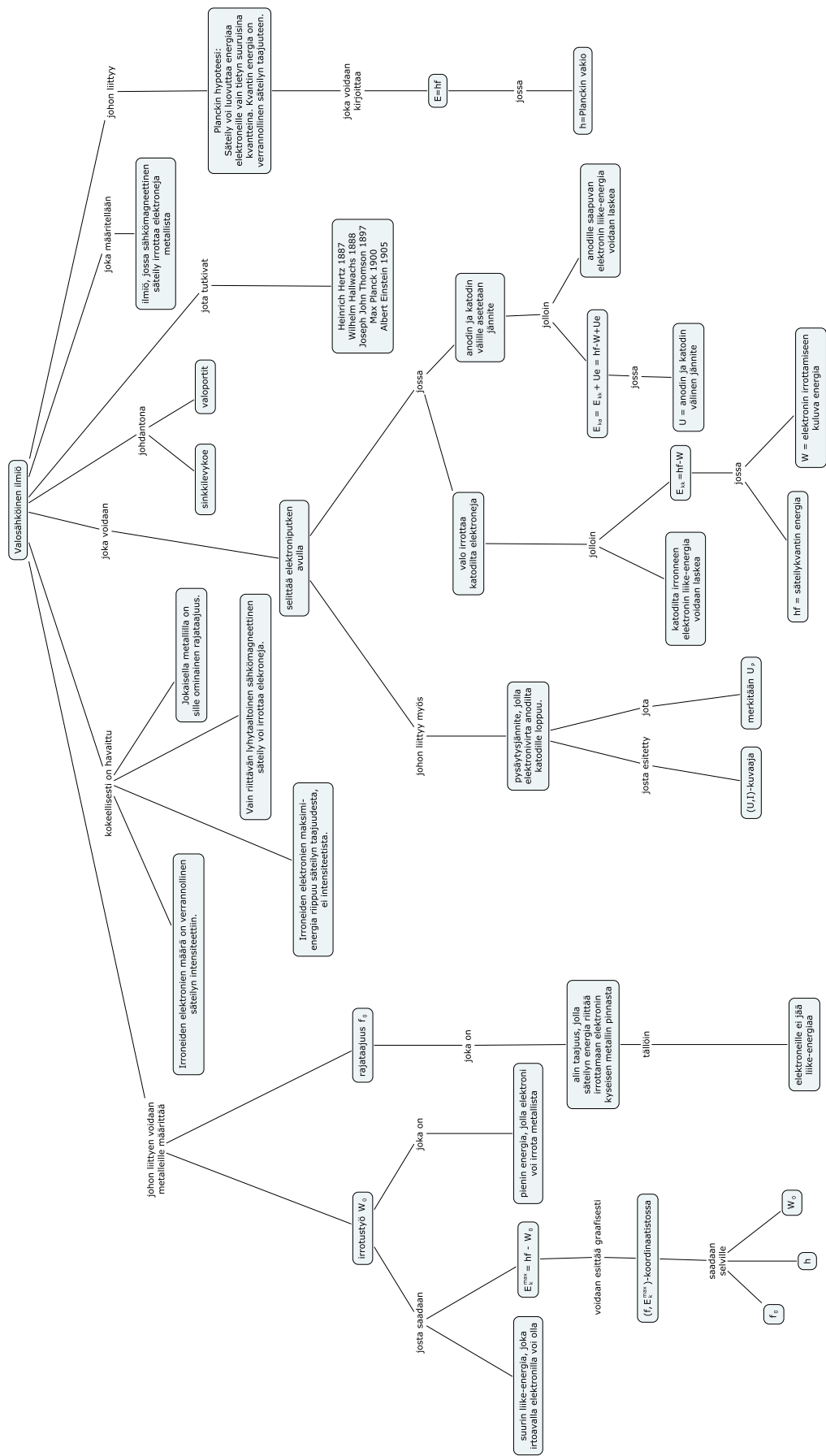
Beetahajoamisen käsittely Fysiikka 8-kirjassa

Beetahajoamisen käsittely Physica 8-kirjassa

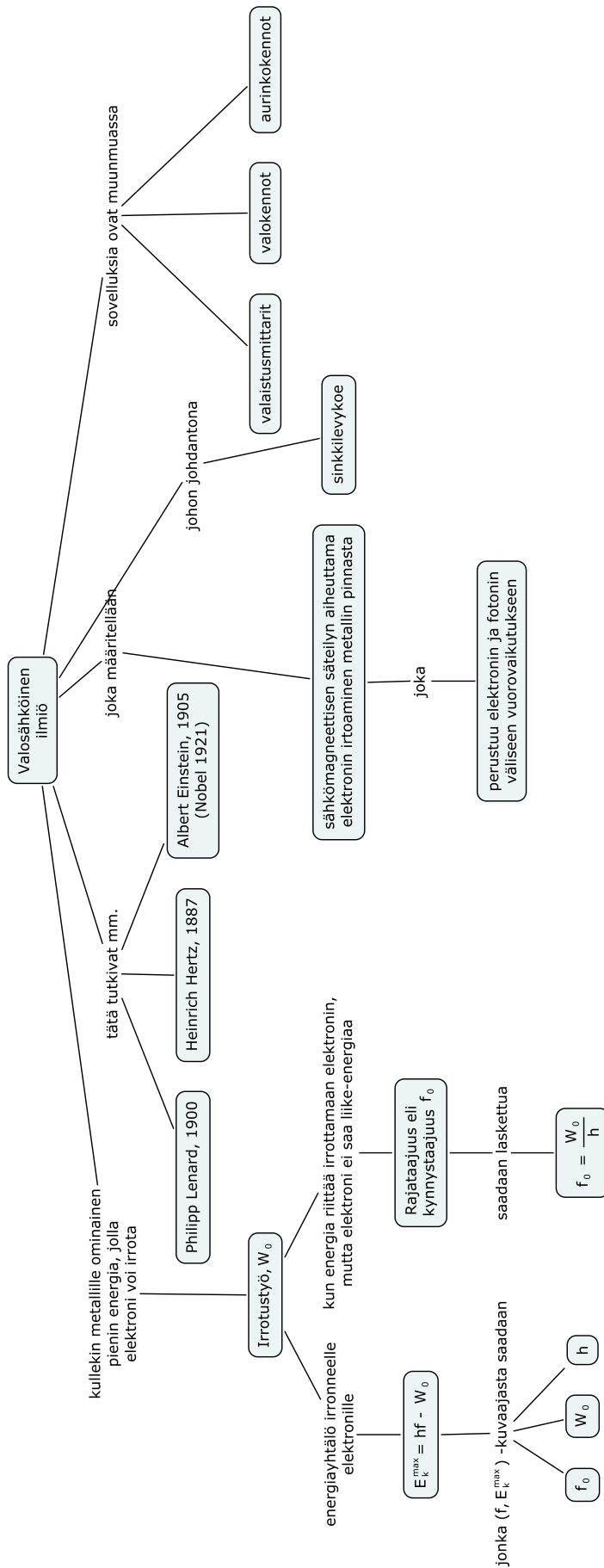
Gammahajoamisen käsittely Fotoni 8-kirjassa

Gammahajoamisen käsittely Fysiikka 8-kirjassa

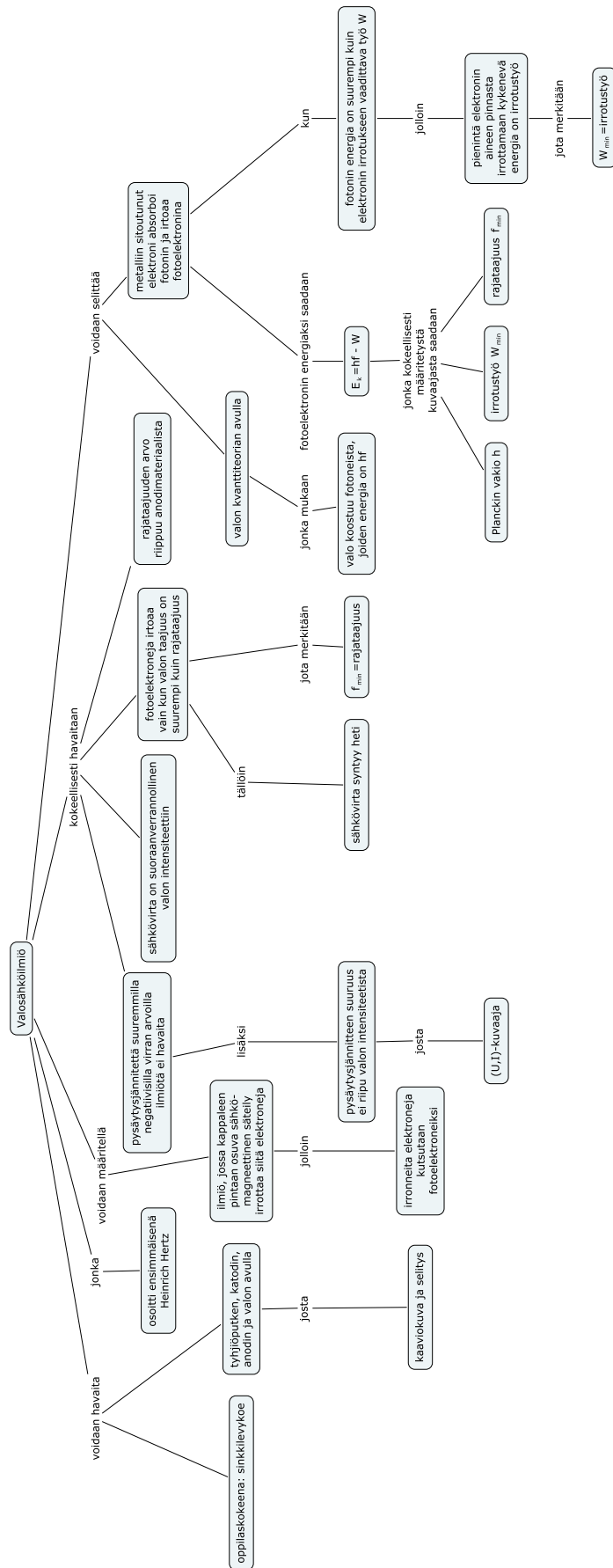
Gammahajoamisen käsittely Physica 8-kirjassa



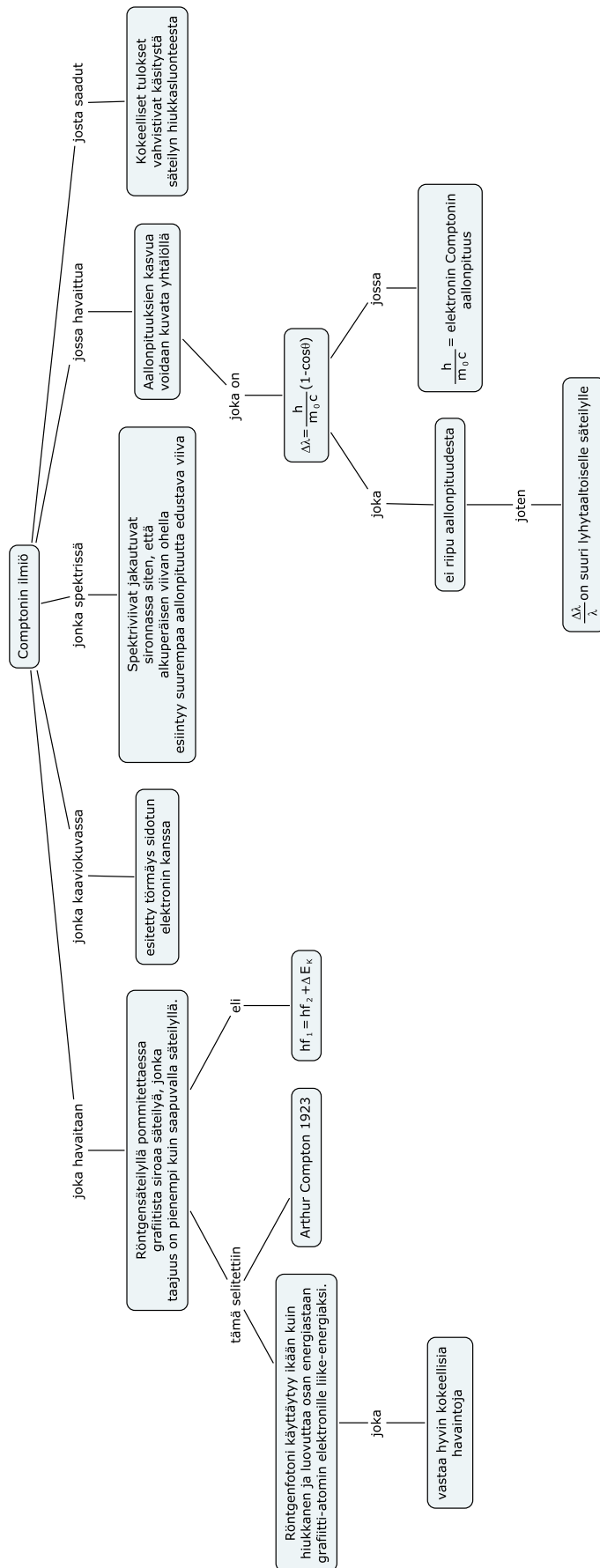
Kuva 13. Käsitekartta valosähköilyn käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 20-25]



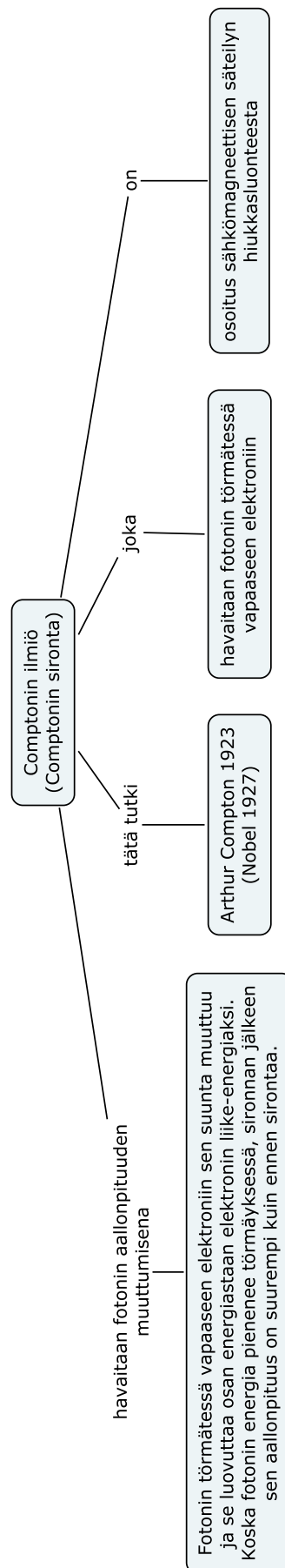
Kuva 14. Käsitekartta valosähköilmiön käsittelystä Fysiikka 8 -kirjassa. [10, s. 17-23]



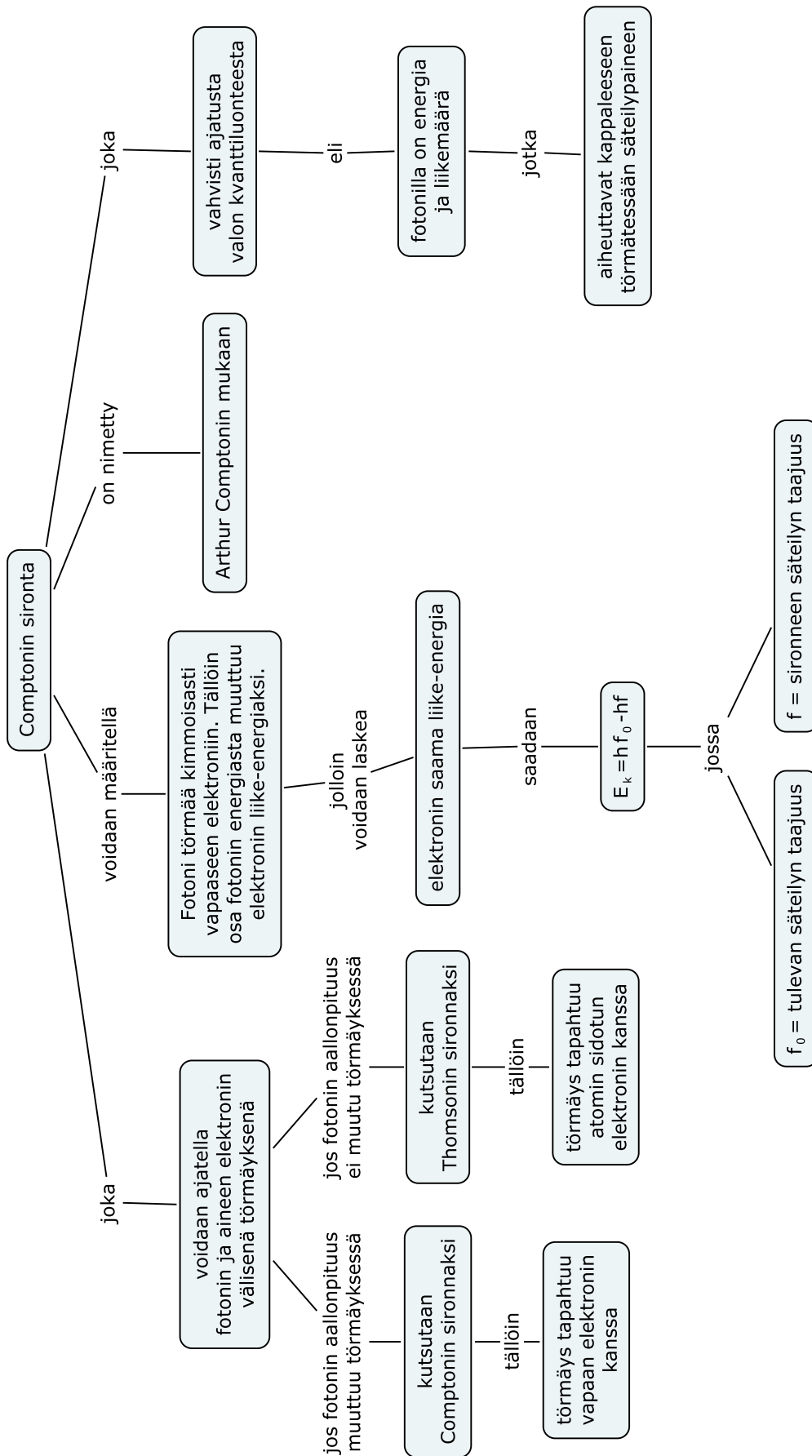
Kuva 15. Käsitekartta valosähköilmiön käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s.18-23]



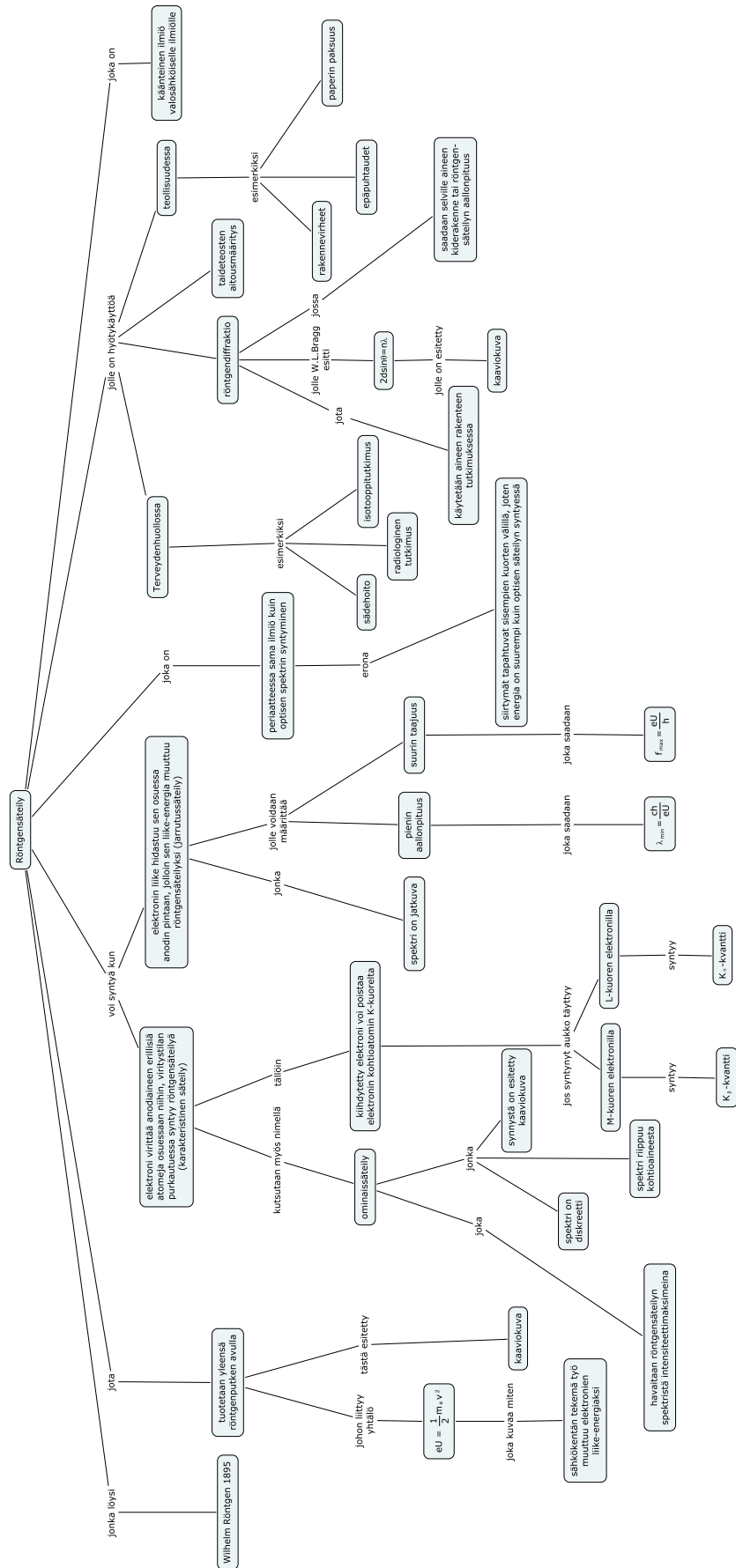
Kuva 16. Käsitekartta Comptonin ilmiön käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 41-42]



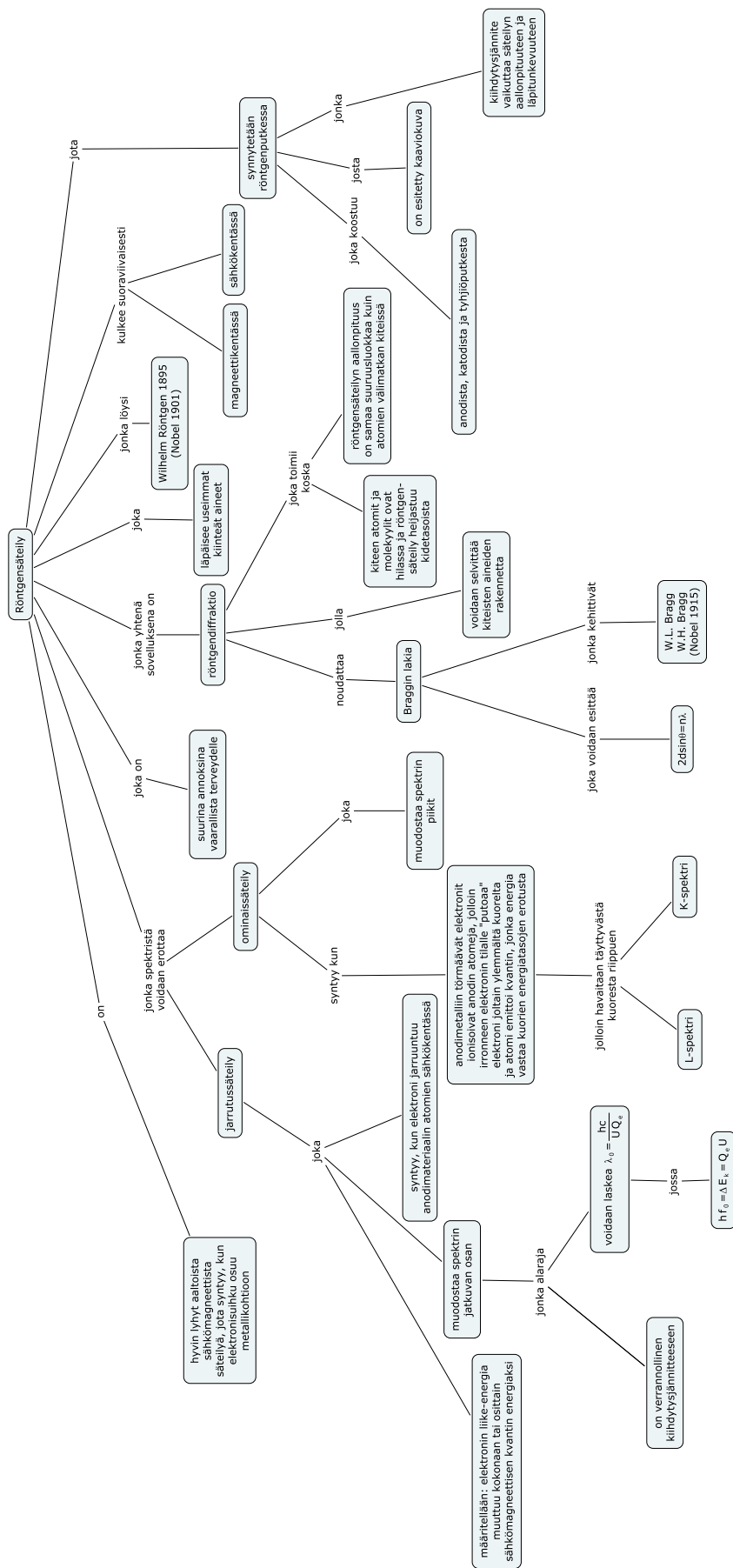
Kuva 17. Käsitekartta Comptonin ilmiön käsittelystä Fysiikka 8 -kirjassa. [10, s. 24]



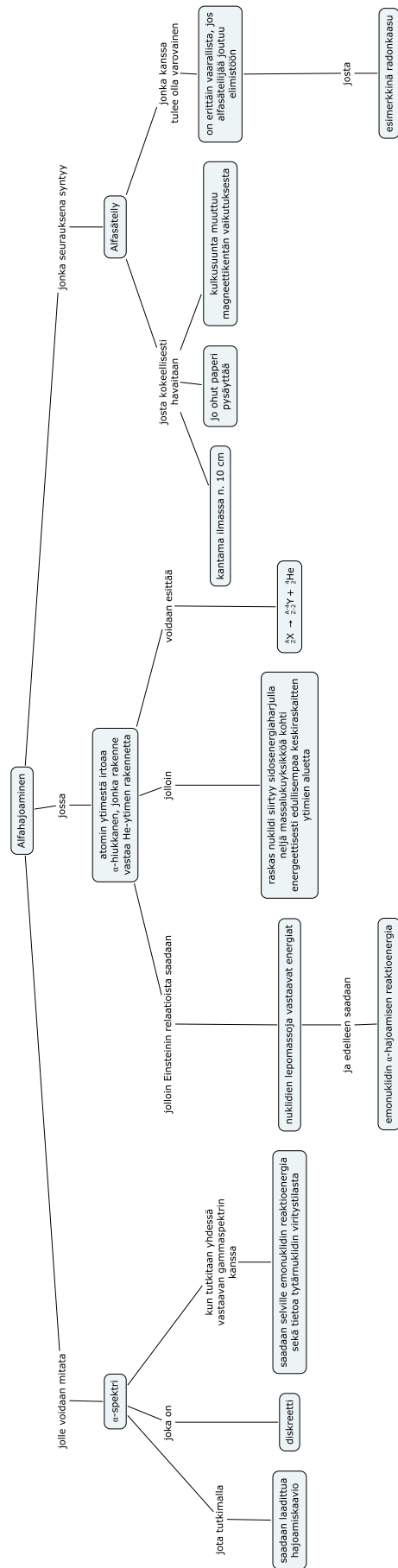
Kuva 18. Käsitekartta Comptonin ilmiön käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s. 23-24]



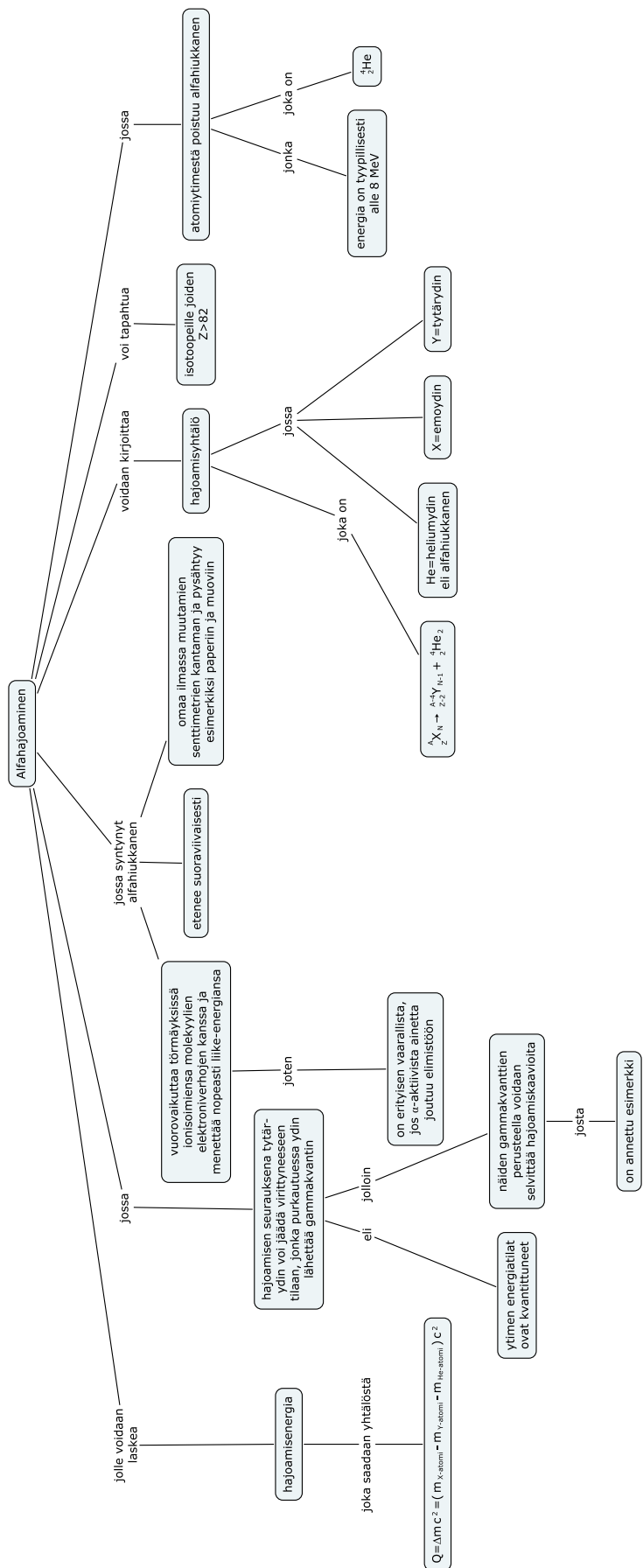
Kuva 19. Käsittekartta röntgensäteilyn käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 36-40]



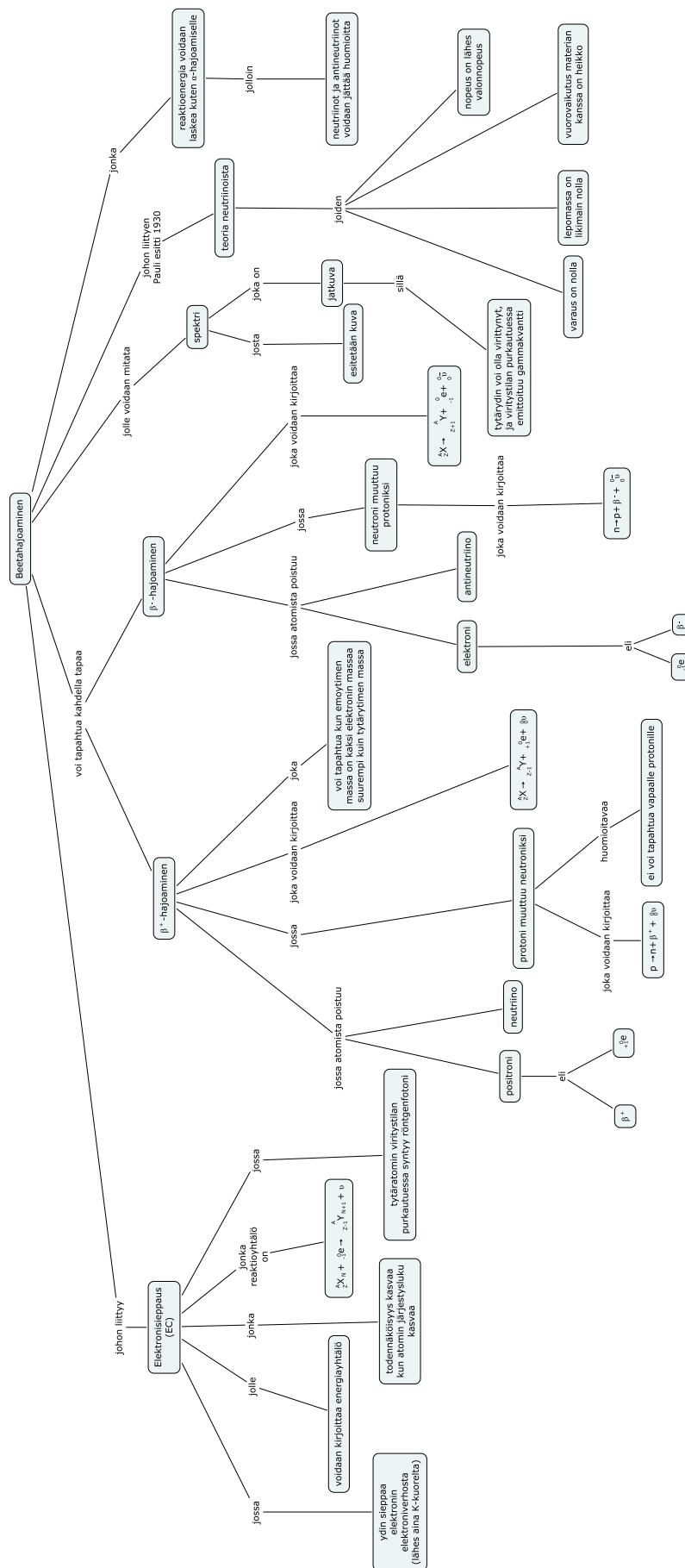
Kuva 21. Käsittekartta röntgensäteilyn käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s. 28-34 ja 63-64]



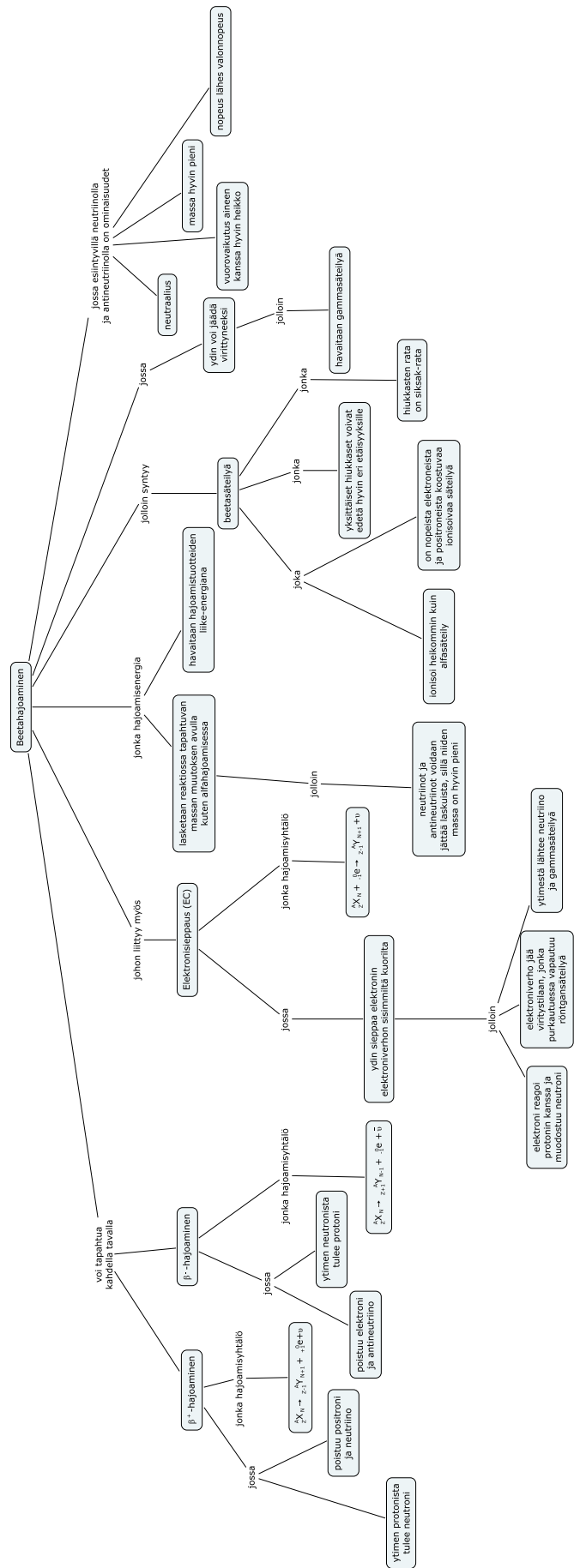
Kuva 22. Käsitekartta α-säteilyn käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 136-141]



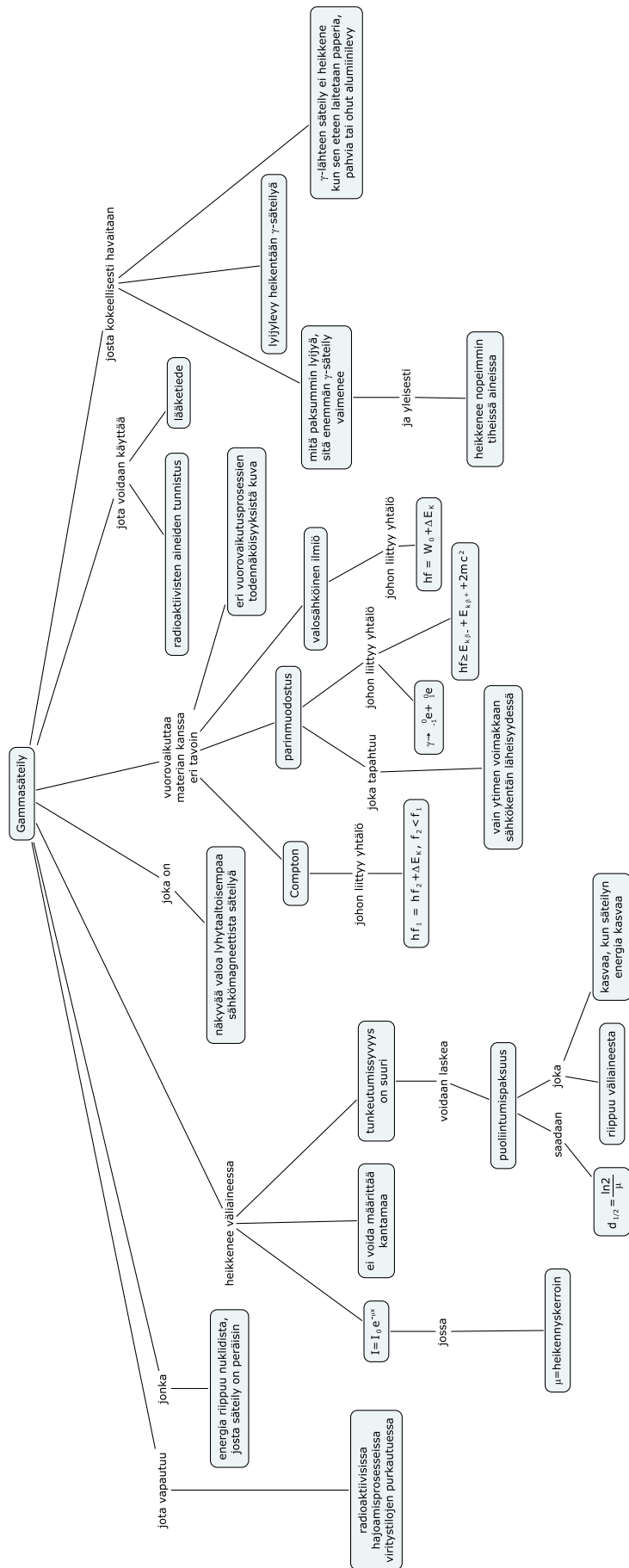
Kuva 24. Käsitekartta α -säteilyn käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s. 85-88]



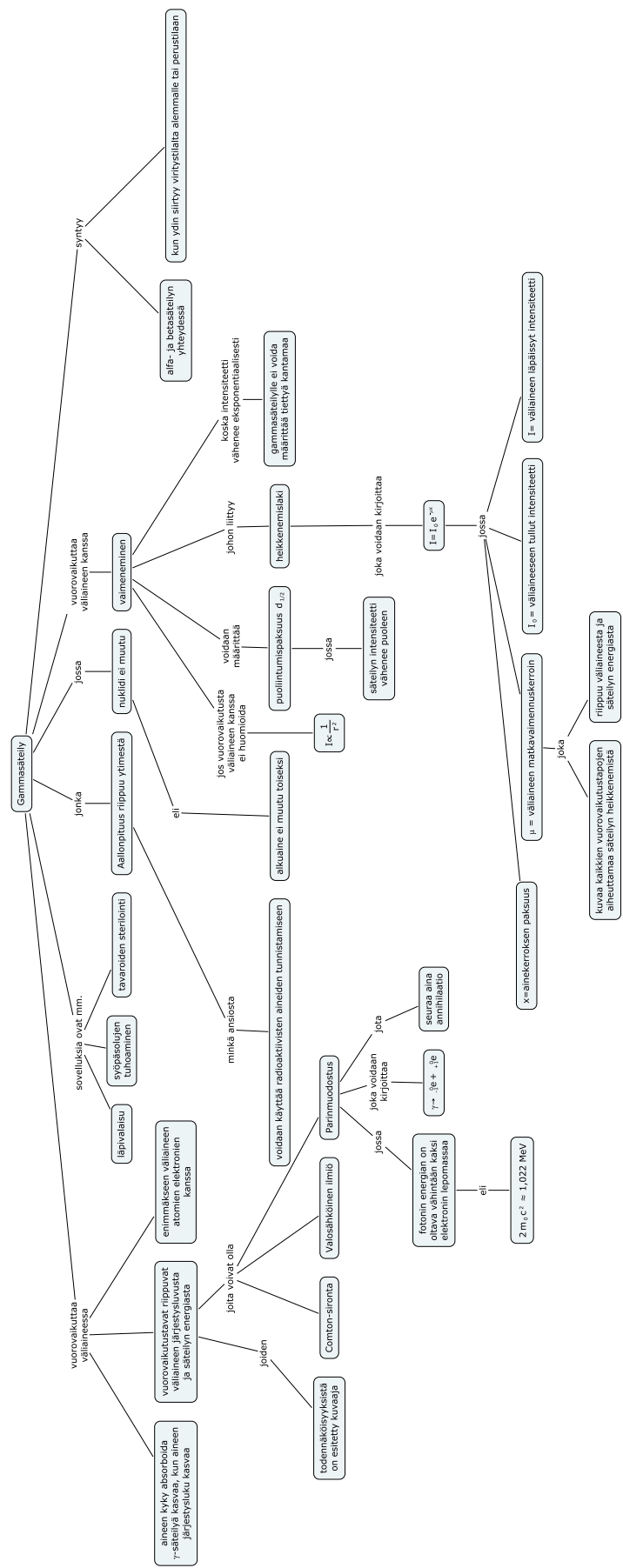
Kuva 25. Käsitekartta β-säteilyn käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 141-146]



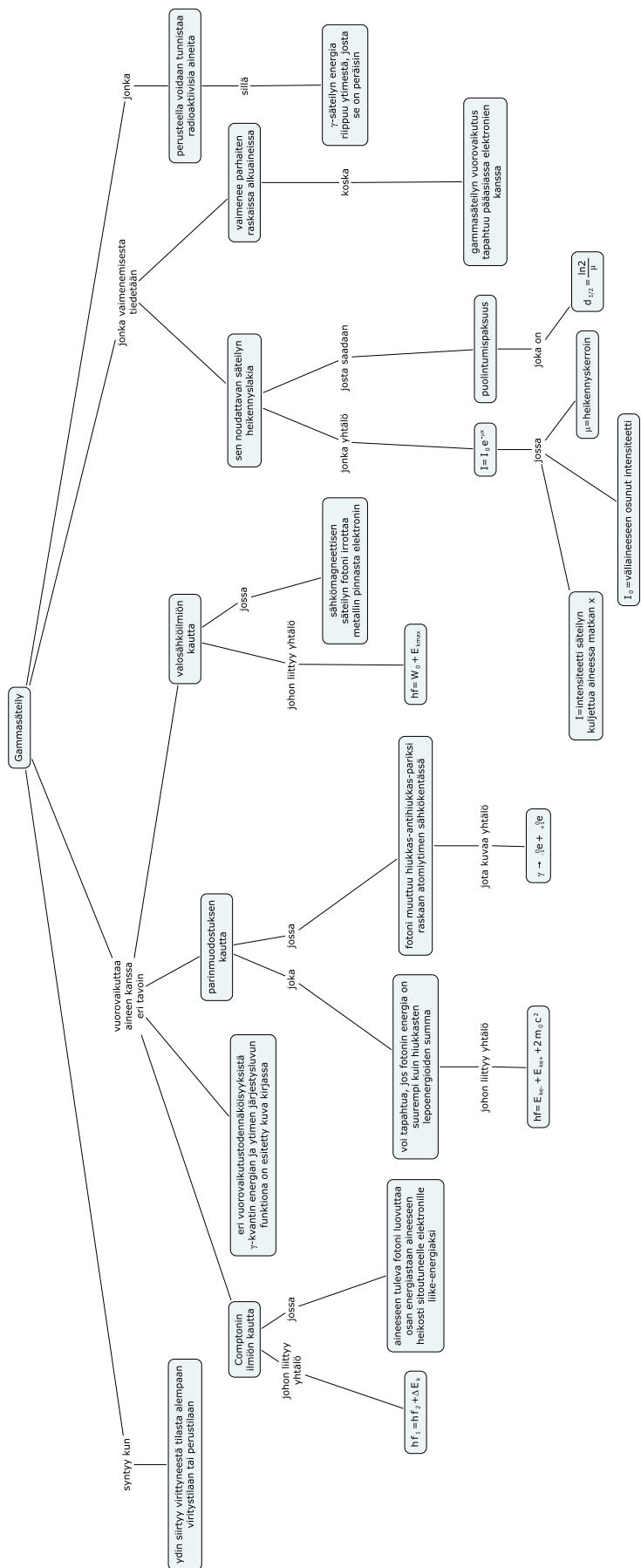
Kuva 27. Käsitekartta β -säteilyn käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s. 89-92]



Kuva 28. Käsitekartta γ -säteilyn käsittelystä Fotoni 8 -kirjassa. [33, s. 147-148 ja 159-162]



Kuva 29. Käsitekartta γ -säteilyn käsittelystä Fysiikka 8 -kirjassa. [10, s. 118-123]



Kuva 30. Käsitekartta γ -säteilyn käsittelystä Physica 8 -kirjassa. [15, s. 93, 103-104]