

Säteilyn vuorovaikutus aineen kanssa

Eetu Uusikylä

10. marraskuuta 2022

1 Säteilylajit

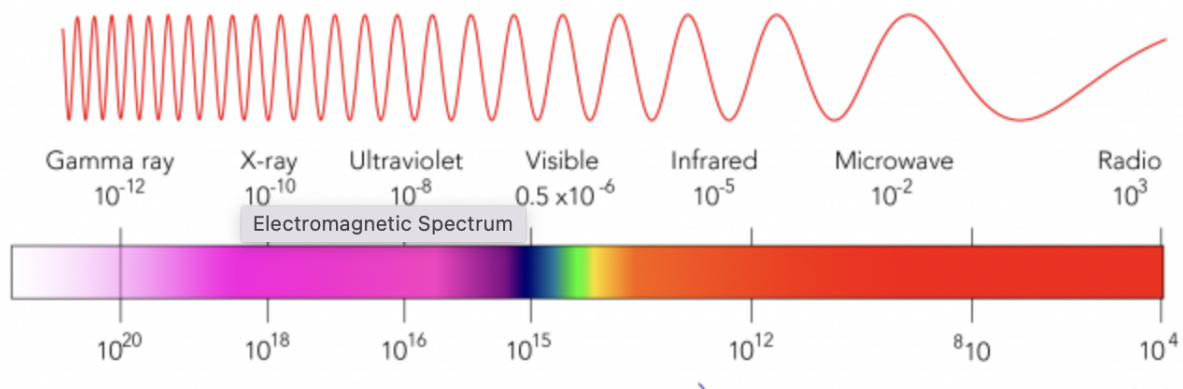
Ionisoiva säteily on säteilyä, jonka energia riittää irrottamaan atomista elektronin. Se voi myös viritää väliaineen atomeja ja aiheuttaa näin karakteristista säteilyä. Myös sironta väliaineen atomeista on mahdollista. Vuorovaikutukset säteilyn ja aineen välillä auttavat ymmärtämään ja muokkaamaan aineen rakennetta ja mahdollistavat myös säteilyn havaitsemisen ja sen ominaisuuksien tutkimisen.

¹

1.1 Röntgen- ja gammasäteily

Ionisoiva säteily voidaan jakaa sähkömagneettiseen säteilyyn ja hiukkassäteilyyn. Sähkömagneettinen säteily on massatonta ja etenee tyhjiössä valon nopeudella. Sen energia on suoraan verrannollinen taajuuteen ja kääntäen verrannollinen aallonpituuteen. Sähkömagneettista säteilyä on useaa eri lajia (Kuva 1). Niistä röntgen- ja gammasäteily ovat ionisoivaa säteilyä.

Röntgen- ja gammasäteily ovat fotoneista muodostuvaa lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Röntgensäteilyn aallonpituus on välillä 0.01-10 nm, kun taas gammasäteilyn aallonpituus on lyhyempi (0.001 - 0.1 nm). Ero röntgen- ja gammasäteilyn välillä perustuu niiden syntytapaan. Röntgensäteily syntyy elektronien jarrutussäteilynä tai viritystilojen purkautumisista atomin elektronikuorella. Jarrutussäteilyssä elektronin liikerata kaareutuu atomytimen vuorovaikutuskentässä, jolloin osa elektronin liike-energiasta muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi. Gammasäteily syntyy muutoksista atomytimen viritystiloissa.



Kuva 1: Sähkömagneettisen säteilyn tyypit aallonpituuden mukaan

Sähkömagneettiselle säteilylle väliaineessa voidaan määrittää puoliintumispaksuus. Tämä tarkoittaa väliaineen paksuutta, jonka läpäistessä säteilyn intensiteetti pienenee puoleen. Sähkömagneettisen säteilyn energia voidaan laskea yhtälöstä

¹materiaali on vapaasti käytettävissä CC-BY -lisenssin ehtojen mukaisesti

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

missä $h = 4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ on Planckin vakio, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ on valon nopeus tyhjiössä ja λ on säteilyn aallonpituus.

Tehtävä 1

- a) Laske 100 keV:n gammasäteilyn aallonpituus metreinä.
- b) Näkyvä valo kattaa aallonpituusalueen 380–750 nm. Mitkä ovat näkyvän aallon mahdolliset taajuuudet?
- c) Laske, mitä energioita röntgen- ja gammasäteily voivat saada. Aallonpituudet näille säteilylajeille ovat 0.01 nm - 10 nm ja 0.01 pm - 10 pm.

1.2 Hiukkassäteily

Hiukkassäteily muodostuu massallisista hiukkasista, kuten alfa- ja betahiukkasista, protoneista ja neutroneista tai raskaammista ioneista. Hiukkassäteilyä syntyy radioaktiivisen hajoamisen ja ydinreaktioiden seurauksena. Hiukkassäteilylle väliaineessa voidaan määrittää kantama, eli keskimääräinen matka, jonka kuljettuaan hiukkanen pysähtyy.

2 Säteilyn ja aineen vuorovaikutus

2.1 LET-arvo

LET-arvo (Linear Energy Transfer) kuvaa säteilyn luovuttamaa energiamäärää väliaineessa kuljetta matkaa kohden. Säteilyn LET-arvo on sitä suurempi, mitä tiheämmin säteily vuorovaikuttaa väliaineen atomien kanssa. LET-arvo riippuu säteilyn energiasta, lajista ja väliaineen rakenteesta. Hiukkassäteilyn LET-arvo on tyypillisesti suurempi kuin röntgen- ja gammasäteilyn. Yleisesti LET-arvo voidaan määrittää kaavalla

$$LET = \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

missä dE on säteilyn luovuttama energia yksikköpituutta dx kohden.

Suuren LET-arvon säteily ionisoi väliainetta paikallisesti, mutta sen kantama on lyhyt. Jos säteilyn LET-arvo on pieni, se ionisoi laajalla alueella, mutta sen paikallinen vaikutus jää vähäiseksi.

Tehtävä 2

Hiukkassäteilyn kantama väliaineessa voidaan ilmaista yhtälön

$$R = \frac{1}{\rho} \int_0^E \frac{dE}{LET_\rho} \quad (3)$$

mukaan. Tässä LET_ρ on keskimääräinen absorboitunut energia yksikköpolun pituudessa. Laske kantamat seuraaville säteilylajeille vedessä:

5 MeV:n alfahiukkanen, jonka $LET_\rho = -1450.0 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{gm}}$

5 MeV:n elektronille, jonka $LET_\rho = -2.0 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{gm}}$

5 MeV:n protonille, jonka $LET_\rho = -420.0 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{gm}}$

2.2 Gammasäteilyn ja aineen vuorovaikutus

2.2.1 Valosähköinen ilmiö

Valosähköisessä ilmiössä fotonin luovuttaa koko energiansa atomin elektronille. Vuorovaikutuksen seurauksena elektroni irtaantuu atomista ja saa liike-energiäkseen

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (4)$$

Tässä E_γ on fotonin energia ja E_b on elektronin sidosenergia atomissa. Elektronin jättämä aukko täyttyy ylempään kuoren elektronilla, jolloin vapautuu karakteristista röntgensäteilyä tai augerelektrooneja. Valosähköinen ilmiö on fotonien yleisin vuorovaikutustapa pienillä energioilla.

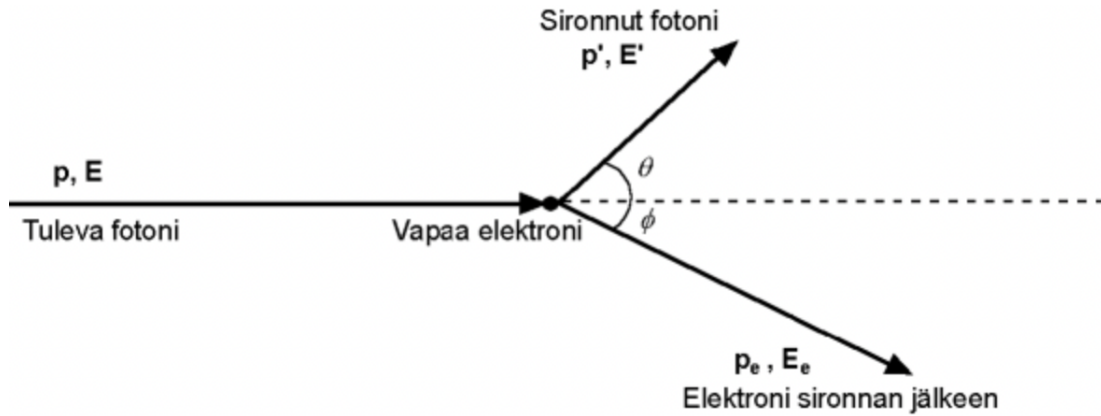
2.2.2 Comptonin ilmiö

Comptonin ilmiössä fotonin siroaa atomiin sitoutuneesta elektronista tai vapaasta elektronista. Fotonin menettämä vuorovaikutuksessa energiaa, joka siirtyy elektronin liike-energiaksi. Siroavien fotonien energia ja liikemäärä muuttuvat siroavien yhteydessä. Energianmenetys riippuu siroavien kulmasta ja fotonin alkuperäisestä energiasta.

Fotonin aallonpituus Comptonin siroavissa muuttuu kaavan

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \quad (5)$$

mukaan. Tässä θ on fotonin siroavien kulma, m_e on elektronin massa ja λ_i ja λ_f ovat fotonin aallonpituudet ennen siroavien ja siroavien jälkeen.



Kuva 2: Comptonin ilmiö fotonin osuessa vapaaseen elektroniin

Tehtävä 3

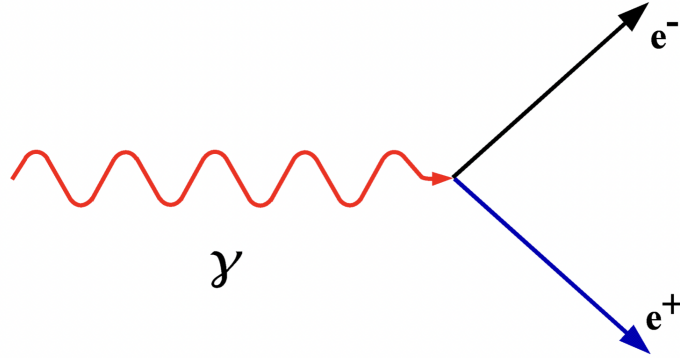
a) 5 keV:n fotonin osuu vapaaseen elektroniin ja siroaa siitä 30° :n kulmassa. Laske fotonin aallonpituus ennen törmäystä ja törmäyksen jälkeen.

b) Osoita, että Compton-ilmiössä siroavien fotonin energia on $E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + (\frac{E_\gamma}{m_e c^2})(1 - \cos(\theta))}$, missä E_γ on fotonin energia ennen siroavien.

2.2.3 Parinmuodostus

Kun fotonin energia on suurempi kuin $2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$, se voi synnyttää elektroni-positroniparin osuessaan ytimen sähkökenttään. Syntyvän e^-e^+ -parin liike-energiaksi jää $E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}$. Parinmuo-

dostuksessa syntyvät positronit vuorovaikuttavat elektronien kanssa. Tässä annihilaatioksi kutsutussa vuorovaikutuksessa elektroni ja positroni muuttuvat kahdeksi 0.511 MeV:n gammafotoniksi, jotka lähtevät likimain vastakkaisiin suuntiin liikemäärän säilymislain mukaisesti.

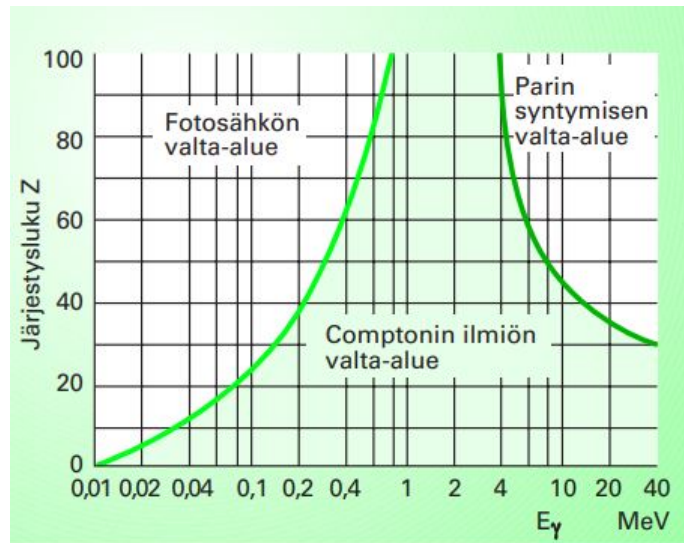


Kuva 3: Parinmuodostuksessa energeettinen fotoni ($E_\gamma \geq 1.022 \text{ MeV}$) muuttuu elektroni-positronipariksi.

Tehtävä 4

Allaolevasta kuvasta nähdään fotonin vallitseva vuorovaikutustapa energian ja väliaineen järjestysluvun funktiona. Arvioi kuvan perusteella, mikä vuorovaikutus tapahtuu todennäköisimmin kun

- Röntgenfotoni osuu lyijyyn,
- 1 MeV:n gammafotoni osuu hiileen,
- 1 MeV:n gammafotoni osuu rautaan,
- 10 MeV:n gammafotoni osuu kultaan.



2.3 Lineaarinen vaimennuskerroin

Gammasäteily vaimenee vuorovaikuttaessaan väliaineen elektronien tai ytimien kanssa. Kokonaisvaimennusta kuvataan kaavalla

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (6)$$

missä x on fotonin kulkema matka ja μ lineaarinen vaimennuskerroin. Näistä jälkimmäinen ilmaistaan vaimennuskertoimien summana

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{compton} + \mu_{pair}, \quad (7)$$

missä μ_{photo} , $\mu_{compton}$ ja μ_{pair} ovat todennäköisyydet valosähköiselle ilmiölle, Comptonin siroinnalle ja parinmuodostukselle. Vaimennuskertoimen μ suuruus riippuu gammakvantin energiasta ja väliaineen tiheydestä.

Säteilyn vaimeneminen väliaineessa ilmoitetaan usein massavaimennuskertoimenä $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$, joka on lineaarinen vaimennuskerroin jaettuna väliaineen tiheydellä. Gamma- ja röntgensäteilyn massavaimennuskertoimia löytyy esim. XCOM-tietokannasta <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Ohjeita XCOMin käyttöön löytyy Kuvista 4 ja 5.

Select by: (only elements 1 - 100) Atomic Number: or Symbol: Al	Options for output units: ☒ All quantities in cm^2/g ☐ All quantities in barns/atom ☐ Partial interaction coefficients in barns/atom and total attenuation coefficients in cm^2/g
Graph options: ☒ Total Attenuation with Coherent Scattering ☐ Total Attenuation without Coherent Scattering ☐ Coherent Scattering ☐ Incoherent Scattering ☐ Photoelectric Absorption ☐ Pair Production in Nuclear Field ☐ Pair Production in Electron Field ☐ None	Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed) Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored. ☒ Include the standard grid Energy Range: Minimum: 1 MeV Maximum: 10 MeV

Kuva 4: Vaimennuskertoimien etsimistä XCOM tietokannasta. Kirjoita oikeaan yläkulmaan alkuaine (kuvassa alumiini), jonka kanssa fotonit vuorovaikuttaa. Valitse energia-alue fotonille kohdan "Energy Range" alle.

Tehtävä 5

Montako prosenttia 5 MeV:n fotoneista läpäisee 1 cm:n paksuisen alumiinilevyn? Entä 1 cm:n lyijylevyn? Arvioi tämän perusteella, kumpi näistä on parempi suojamateriaali käsiteltäessä korkeaan energian säteilylähdettä. Alumiinin tiheys on $\rho_{Al} = 2.70 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ja massavaimennuskerroin $\mu_m = 0.02836 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. Lyijylle vastaavat arvot ovat $\rho_{Pb} = 11.35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ja $\mu_m = 0.04272 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$.

Tehtävä 6

Kalium-40 emittoi γ -säteilyä 1.46 MeV:n energialla (≈ 1.5 MeV). Kuinka paksu lyijysuojus tarvitaan vaimentamaan ^{40}K :n gammasuihku kymmenesosaan alkuperäisestä? Etsi tarvittavat arvot XCOM-tietokannasta ja katso tarvittaessa mallia Kuvista 4 ja 5.

Tehtävä 7

Selvitä osoitteesta <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>, mitkä ovat ^{60}Co :n kaksi yleisintä gammafotonia. Arvioi, kuinka paksu lyijylevy tarvitaan käytettäessä ^{60}Co -lähdettä, kun suojuksen tulee absorboida gammahiukkasista vähintään 95 %.

Edge	(required) Photon Energy MeV	Scattering		Photoelectric Absorption cm ² /g	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
		cm ² /g	cm ² /g		cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.000E+00	2.991E-03	4.993E-02	1.810E-02	0.000E+00	0.000E+00	7.102E-02	6.803E-02
	1.022E+00	2.865E-03	4.944E-02	1.732E-02	0.000E+00	0.000E+00	6.962E-02	6.676E-02
	1.250E+00	1.930E-03	4.476E-02	1.168E-02	3.781E-04	0.000E+00	5.875E-02	5.682E-02
	1.500E+00	1.347E-03	4.075E-02	8.321E-03	1.806E-03	0.000E+00	5.222E-02	5.088E-02
	2.000E+00	7.626E-04	3.482E-02	5.034E-03	5.450E-03	0.000E+00	4.607E-02	4.530E-02
	2.044E+00	7.304E-04	3.441E-02	4.854E-03	5.769E-03	0.000E+00	4.577E-02	4.504E-02
	3.000E+00	3.406E-04	2.744E-02	2.631E-03	1.192E-02	9.585E-06	4.234E-02	4.200E-02
	4.000E+00	1.919E-04	2.290E-02	1.723E-03	1.712E-02	3.906E-05	4.198E-02	4.178E-02
	5.000E+00	1.229E-04	1.978E-02	1.263E-03	2.148E-02	7.769E-05	4.272E-02	4.260E-02
	6.000E+00	8.542E-05	1.749E-02	9.894E-04	2.523E-02	1.191E-04	4.391E-02	4.382E-02
	7.000E+00	6.278E-05	1.572E-02	8.103E-04	2.853E-02	1.602E-04	4.528E-02	4.522E-02
	8.000E+00	4.807E-05	1.431E-02	6.845E-04	3.151E-02	2.000E-04	4.675E-02	4.670E-02
	9.000E+00	3.799E-05	1.315E-02	5.915E-04	3.421E-02	2.380E-04	4.823E-02	4.819E-02
	1.000E+01	3.078E-05	1.219E-02	5.203E-04	3.671E-02	2.740E-04	4.972E-02	4.969E-02

Kuva 5: Vaimennuskertoimia 1-10 MeV:n fotoneille alumiinissa. Fotonin energia löytyy ensimmäisestä sarakkeesta. Sarakkeen "Total Attenuation"; "With Coherent Scattering" löydät kutakin fotonin energiaa (kuvassa 5 MeV) vastaavan massavaimennuskertoimen.

2.4 Hiukkassäteilyn ja aineen vuorovaikutus

Hiukkanen luovuttaa energiaansa väliaineelle ionisoidessaan sen atomeita. Mitä suurempi on vuorovaikuttava hiukkanen, sitä suurempi on sen vuorovaikutustiheys, eli sitä enemmän hiukkanen luovuttaa energiaansa väliaineelle ja sitä lyhyempi on tällöin sen kantama. Vastaavasti mitä suurempi on väliaineen elektronitiheys, sitä tiheämmin siinä tapahtuu ionisaatiota ja sitä tehokkaammin se näin ollen vaimentaa hiukkassäteilyä. Myös hiukkasen sähkövaraus ja energia vaikuttavat voimakkaasti sen vuorovaikutusmekanismeihin väliaineen kanssa.

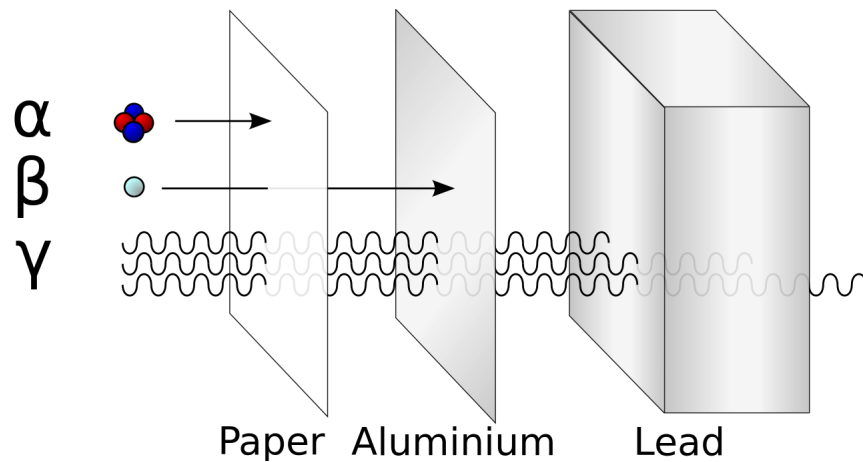
2.4.1 Varaukselliset hiukkaset

Varaukselliset hiukkaset, kuten elektronit ja ionit, voivat vuorovaikuttaa suoraan elektronien ja ytimien kanssa Coulombin sähköisen vuorovaikutuksen kautta. Suoran vuorovaikutuksen myötä varatut hiukkaset absorboituvat tehokkaammin väliaineeseen kuin epäsuorasti vaikuttavat varauksettomat hiukkaset, kuten neutronit.

"Kevyillä" varauksellisilla hiukkasilla tarkoitetaan useimmiten elektroneja ja positroneja. Pienen massansa vuoksi ne muuttavat suuntaa (siroavat) usein. Niiden reitti väliaineessa on siten mutkitteleva. "Raskailla" hiukkasilla tarkoitetaan tavallisesti elektronia raskaampia hiukkasia, eli käytännössä protonia ja ioneja. Esimerkiksi protonin massa on noin 1800 kertaa suurempi kuin elektronin. Raskashiukkaset kulkevat väliaineessa paljon suurempaa linjaa kuin elektronit.

Hiukkasen ja väliaineen väliset törmäykset voidaan jakaa elastisiin ja epäelastisiin törmäyksiin. Elastisessa eli kimmoisassa törmäyksessä liike-energia ja liikemäärä säilyvät, eli energia siirtyy hiukkaselta väliaineelle tai päinvastoin. Täysin elastisia törmäyksiä tapahtuu vain hiukkasmaailmassa, mutta esim. biljardipallojen törmäykset ovat lähes täysin kimmoisia. Epäelastisessa törmäyksessä liikemäärä ja -energia eivät säily; hiukkanen siirtää energiaansa väliaineeseen ja hidastuu. Tämä menetetty energia voi vapautua fotonina tai ionisoida atomeja. Arkisia esimerkkejä kimmottomasta törmäyksestä ovat esim. luodin pysähtyminen seinään tai auton törmäys siten, että ne tarttuvat toisiinsa.

Hiukkassäteilyn ionisoidessa väliainetta se tuottaa ionipareja, eli elektronin irtoamista atomista, josta tulee ionisaation myötä positiivinen ioni. Keskimääräistä ioniparin synnyttämiseen tarvittavaa energiaa kutsutaan W-arvoksi. Esim. kuivan ilman W-arvo on NTP-oloissa noin 33.97 eV. Tyypillisesti hiukkassäteilyn energia on vähintään kiloelektronivolttien luokkaa, joten tavanomainen hiukkassäteily tuottaa paljon ionipareja.



Kuva 6: Säteilyn vaimeneminen väliaineessa säteilytyypeittäin. Tavanomainen alfasäteily vaimenee jo paperiarkkiin, kun taas betasäteilyn pysäyttämiseen tarvitaan alumiinifoliota. Gammasäteily on lyhyen aallonpituudensa vuoksi läpitunkevaa, joten sen vaimentamiseen tarvitaan paksumpia ja tiheämpiä väliainekerroksia, kuten lyijyä.

Tehtävä 8

a) Laske 10 MeVin alfahiukkasen kantama alumiinissa. (Tarvittavat tiedot alfahiukkasen ja väliaineen vuorovaikutuksista löydät osoitteesta <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>)

b) Kuinka paljon energiaa 3.5 MeVin protoni luovuttaa 5 mm:n alumiinilevyllä kulkiessaan sen läpi? (Tarvittavat tiedot protonin ja väliaineen vuorovaikutuksista löydät osoitteesta: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>)

c) Kuinka pitkälle on 500 keVin elektroni kulkeutuu keskimäärin ilmassa? Montako ioniparia se voi tuottaa, kun ilma on NTP-olosuhteissa? (Tarvittavat tiedot elektronin ja väliaineen vuorovaikutuksista löydät osoitteesta: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>)

Kantamat löydät sarakkeesta "CSDA (g/cm²)". Kohdassa b) tarvitset saraketta "Stopping Power; Total".

2.4.2 Neutronit

Neutronit ovat varauksettomia hiukkasia, joten niiden ja väliaineen välillä ei ole Coulombisia voimia. Neutronit voivat kuitenkin vuorovaikuttaa ytimen ja elektronien kanssa absorption, elastisen - ja epäelastisen sironnan kautta. Neutronin absorptio ytimeen voi aiheuttaa myös fission tai muita ydinreaktioita. Neutronisäteilyn kantama väliaineessa on suurempi kuin ioneilla. Vaikka neutronit eivät ionisoi suoraan, ne voivat synnyttää varattuja hiukkasia tai gammafotoneja sekä kuljettaa rekyylienergiaa, joka saa atomit ionisoitumaan tai virittymään. Neutronisäteily on siis välillisesti ionisoivaa säteilyä.

Neutronien ja ytimien vuorovaikutukset riippuvat voimakkaasti neutronien energiasta. Vuorovaikutuksen todennäköisyyttä neutronien ja muiden hiukkasten välillä kutsutaan vaikutusalueksi. Se ilmoitetaan yksikössä barn [b] = 10^{-28} m^2 , joka on samaa suuruusluokkaa kuin atomiytimen pinta-ala. Neutronin kokonaisvaikutusala voidaan ilmaista kolmen eri vaikutusalan summana:

$$\sum_{total} = \sum_{elastic} + \sum_{abs} + \sum_{inelastic} \quad (8)$$

missä $\sum_{elastic}$, $\sum_{abs}$ ja $\sum_{inelastic}$ ovat vaikutusalat elastiselle sironnalle, absorptiolle ja epäelastiselle sironnalle. Neutronien vaimeneminen väliaineessa ilmaistaan kokonaisvaikutusalan avulla yhtälön

$$I(x) = I_0 e^{-\sum_{total} \cdot N \cdot x} \quad (9)$$

mukaan. Tässä on N on hiukkasten lukumäärätiheys väliaineessa, I_0 neutronivuon tiheys alussa ja $I(x)$ neutronivuon tiheys sen jälkeen, kun se on kulkenut matkan x .

Tehtävä 9

0.0253 eVin neutronivuo osuu intensiteetillä $I_0 = 7.2 \cdot 10^{15} \frac{1}{cm^2 s}$ paksuun kohtioon, jonka lukumäärätiheys on $N = 4.23 \cdot 10^{22} \frac{1}{cm^3}$. Neutronien kokonaisvaikutusala $\sum_{total} = 4.2$ b ja absorption vaikutusala $\sum_{abs} = 3.4$ b.

- Mikä on neutronivuon intensiteetti, kun se on edennyt 5 cm, eikä se ole vielä törmännyt?
- Kun neutroni törmää ytimen kanssa, millä todennäköisyydellä se vuorovaikuttaa absorption kautta?

3 Säteilyn havaitseminen

Säteilyä ei voi havaita aistein, vaan siihen tarvitaan mittauslaitteita. Säteilyn ilmaisimien toiminta perustuu mitattavan säteilyn vuorovaikutukseen ilmaisimateriaalien kanssa. Ilmaisintyypit voidaan jakaa karkeasti kaasui- ja puolijohdeilmaisimiin sekä tuikeilmaisimiin. Jokaisella ilmaisintyyppillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Sopivan ilmaisintyyppin valitseminen riippuu käyttötarkoituksesta. Yksi keskeisimpiä ilmaisimen ominaisuuksia on energiarisoluutio, eli kyky erottaa säteilykvanttien energiat toisistaan. Tämä on tärkeää erityisesti mitattaessa hiukkasia, joiden energiat ovat lähes samat. Myös aikaresoluutio on ilmaisimelle tärkeä. Jos säteilyhiukkasen rekisteröityminen kestää liian kauan, voi yhden tai useamman hiukkasen energia rekisteröityä ilmaisimeen samanaikaisesti. Tällöin säteilyhiukkasen energia tulee mitatuksi väärin.

Lisätietoa ilmaisimista ja säteilyn havaitsemisesta löytyy Säteilyturvakeskuksen kirjasarjasta osoitteessa <https://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/sateily-ja-sen-havaitseminen>.

3.1 Kaasuilmaisimet

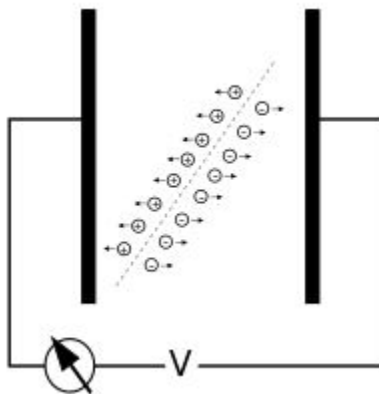
Kaasuilmaisimien toiminta perustuu ilmaisimessa olevan kaasun ionisoitumiseen mitattavan säteilyn toimesta. Tunnetuimpia kaasuilmaisimia ovat ionisaatiokammio, Geigermittari ja verrannollisuuslaskuri. Kaasuilmaisimilla on heikko energiarisoluutio, joten ne sopivat lähinnä yksittäisten ja hyvin tunnettujen säteilyenergioiden mittaamiseen.

Geigermittarissa säteilyä havaitseva osa on kaasutäytteinen Geiger-Müller-putki, jonka seinämä toimii katodina ja sisällä oleva putkensuuntainen piikki anodina. Geigermittarissa mitattava säteily ionisoi putken sisällä olevia kaasumolekyylejä, jotka sähkökentän pakottamana liikkuvat kohti elektrodeja. Elektrodien välille syntyy sähkökenttä. Elektroni ionisoi matkallaan lisää kaasumolekyylejä ionisoiden niitä. Sen seurauksena syntyvä elektronivyöry ionisoi lisää kaasumolekyylejä. Molekyylien viritystilojen purkautuessa emittoituu fotoneita, jotka tuottavat uusia elektronivyöryjä. Ne aiheuttavat laitteeseen havaittavan signaalivirran.

Verrannollisuuslaskuri muistuttaa rakenteeltaan geigermittaria. Sen toiminta perustuu niin ikään kaasumolekyylien ionisoitumiseen ja elektronivyöryihin. Erona geigermittariin verrattuna on, että verrannollisuuslaskuri pystyy erottamaan matala- ja korkeanenergiset hiukkaset, sillä elektronivyöryjen aiheuttaman signaalin voimakkuus on verrannollinen kammion läpäisseen hiukkasen energiaan.

Ionisaatiokammio on tavallisesti joko lieriön tai suorakulmion mallinen. Ilmaisimen seinä on katodi, ja sen keskellä on anodilanka. Kaasun ionisoituessa anodi vetää puoleensa irronneita elektroneja ja katodi

vastaavasti ioneja. Näin katodin ja anodin välille syntyy jännite-ero, jonka suuruus on verrannollinen ionien ja elektronien lukumäärään. Ionisaatioiden määrä on puolestaan verrannollinen säteilyn energiaan ja laatuun.



Kuva 7: Yksinkertainen kaaviokuva ionisaatiokammista

Tehtävä 10

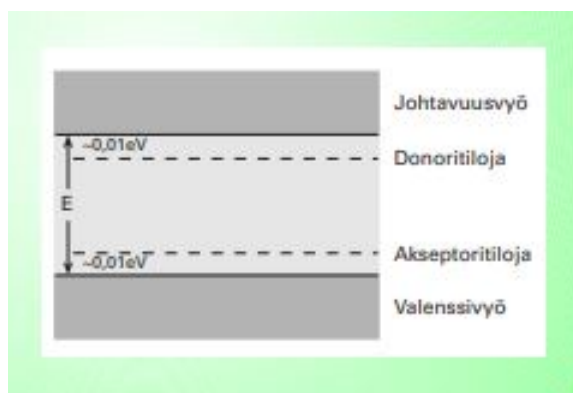
- a) Ionisaatiokammilla mitattava alfahiukkanen synnyttää kammion kaasussa 12000 elektroni-ioniparia. Laske alfahiukkasen tuottama kokonaisvaraus ilmaisimessa.
- b) 4.25 MeV:n alfahiukkanen vuorovaikuttaa ionisaatiokammion kaasumolekyylien kanssa synnyttäen 300 hiukkasta sekunnissa. Jos alfahiukkanen menettää koko energiansa ionisaatiokammioon ja yhden ioniparin synty vaatii 35 eV, mikä on alfahiukkasten synnyttämän sähkövirran suuruus? Ilmaisimen jännite-eroksi halutaan 1 V. Laske tähän tarvittavan vastuksen resistanssi, kun vastus kytketään ilmaisimen kanssa sarjaan.
- c) Laske tuotettu virta, kun 10 MeV:n alfahiukkaset läpäisevät kaasuilmaisimen. Mitattavia hiukkasia syntyy 600 / tunti.

3.2 Puolijohdeilmaisimet

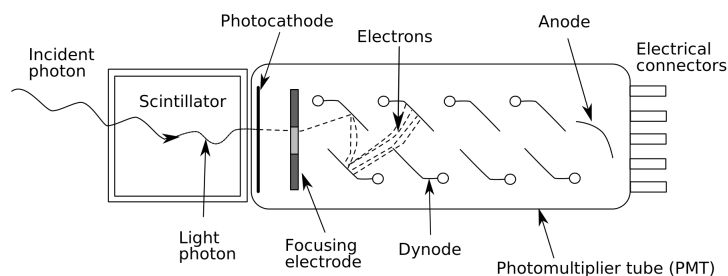
Säteilyn havaitseminen puolijohdeilmaisimella perustuu ilmaisimen ja fotonien vuorovaikutuksista syntyvien elektroni-aukkoparien keräämiseen. Syntyvien varausten määrä on verrannollinen säteilyn energiaan. Puolijohdeilmaisimella on käytännössä estosuuntaan kytketty diodi. Valtaosa puolijohdemateriaalin (kiteen) elektroneista on yksittäisiin atomeihin sidottuja (valenssielektroneja), jotka voivat siirtyä johtavuusvyölle ja liikkua kiteessä saatuaan riittävästi energiaa. Puolijohdeilmaisimella on hyvä energaresoluutio, mutta huono aikaresoluutio.

3.3 Tuikeilmaisimet

Tuikeilmaisimen toiminta perustuu säteilyn energia muuntamiseen valovälähdykseksi. Tuikeilmaisimella koostuu tuikeaineesta, valomonistinputkesta ja laskurielektronikasta. Tuikeaine voi olla sekä kiinteää, nestemäistä, että kaasumaista. Valomonistinputkesta on fotokatodi ja useita dynodeita. Säteilyn vuorovaikutus tuikeaineen kanssa virittää sen atomeja. Viritystilan purkautuessa atomista emittoituu fotoni, joka saapuu valomonistinputkelle ja aiheuttaa siinä valosähköisen ilmiön. Fotoelektronit ionisoivat saapuu dynodille ionisoiden sitä. Syntyy elektronivyöry, joka jatkaa matkaansa dynodien välillä elektronimäärän kasvaessa. Tästä aiheutuu jännitepulssi, jonka suuruus on verrannollinen havaittavan säteilyn energiaan. Tuikeilmaisimen vahvuus on hyvä aikaresoluutio.



Kuva 8: Kaaviokuva puolijohdeilmaisimesta



Kuva 9: Tuikeilmaisimen rakenne

4 Vastauksia

Tehtävä 1

$$a) E = hf = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \cdot 10^3 \text{ eV}} = 12.4 \text{ pm}$$

$$b) \text{Minimitaajuus: } f_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{750 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 1.33 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Maksimitaajuus: } f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{380 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 2.63 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}$$

c) Röntgensäteilylle:

$$\text{minimienienergia } E_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\text{rtg}, \max}} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 41.35 \text{ eV}$$

$$\text{maksimienienergia } E_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\text{rtg}, \min}} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.01 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 41.35 \text{ keV}$$

Gammasäteilylle:

$$\text{minimienienergia } E_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\gamma, \max}} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \cdot 10^{-12} \text{ m}} = 41.35 \text{ keV}$$

$$\text{maksimienienergia } E_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\gamma, \min}} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.01 \cdot 10^{-12} \text{ m}} = 41.35 \text{ GeV}$$

Tehtävä 2

$$\text{Hiukkassäteilyn kantamaksi vedessä } \left(\rho \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \text{ saadaan } R = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\rho} \int_0^E \frac{dE}{LET_\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{E}{LET_\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{5 \text{ MeV}}{LET_\rho}$$

$$5 \text{ MeV:n alfahiukkaselle } R = \frac{1}{\rho} \frac{5 \text{ MeV}}{1450 \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}} = \approx 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$5 \text{ MeV:n elektronille } R = \frac{1}{\frac{g}{cm^3}} \frac{5MeV}{2 \frac{MeVcm^2}{g}} = 2.5 \text{ cm}$$

$$5 \text{ MeV:n protonille } R = \frac{1}{\frac{g}{cm^3}} \frac{5MeV}{420 \frac{MeVcm^2}{g}} \approx 12 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

Tehtävä 3

a) Fotonin aallonpituus ennen sirontaa: $\lambda_i = \frac{hc}{E_\gamma} = \frac{4.135 \cdot 10^{-15} eVs \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{5 \cdot 10^3 eV} = 248.1 \text{ pm}$

b) Fotonin aallonpituus sironnin jälkeen: $\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$
 $\rightarrow \lambda_f = \lambda_i + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \approx 248.4 \text{ pm}$

c) $E_{\gamma'} = \frac{hc}{\lambda_f} = \frac{hc}{\lambda_i + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))} = \frac{hc}{\frac{hc}{E_\gamma} + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))} = \frac{hc}{(\frac{hc}{E_\gamma}) \cdot (1 + \frac{E_\gamma}{hc} \cdot \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)))} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta))}$

Tehtävä 4

a) Röntgenfotonin energia: $E \leq 0.042 \text{ MeV}$, lyijylle $Z = 82 \rightarrow$ valosähköinen ilmiö

b) $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$, $Z = 6 \rightarrow$ Comptonin ilmiö

c) $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$, $Z = 26 \rightarrow$ Comptonin ilmiö

d) $E_\gamma = 10 \text{ MeV}$, $Z = 79 \rightarrow$ parinmuodostus

Tehtävä 5

Alumiinille: $\frac{I}{I_0} = \exp(-0.02836 \frac{cm^2}{g} \cdot 2.70 \frac{g}{cm^3}) = 0.926286... \approx 93 \%$

Lyijylle: $\frac{I}{I_0} = \exp(-0.04272 \frac{cm^2}{g} \cdot 11.35 \frac{g}{cm^3}) = 0.615357... \approx 62 \%$

Lyijy vaimentaa alumiinia tehokkaammin gammasäteilyä. Tämä johtuu mm. siitä, että lyijyn elektronitiheys on selkeästi korkeampi kuin alumiinilla.

Tehtävä 6

1.5 MeV:n fotonin massavaimennuskertoimen lyijyssä on $\frac{\mu}{\rho} = 0.05222 \frac{cm^2}{g}$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow e^{-\mu x} = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{10}$$

$$\ln(e^{-\mu x}) = -\mu x = \ln(\frac{1}{10}) = -\ln(10)$$

Lasketaan kuinka pitkä matka fotoninvuon on kuljettava lyijyssä, jotta sen intensiteetti vaimenee kymmenesosaan alkuperäisestä:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln(10) = \frac{1}{\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho} \cdot \ln(10) = \frac{1}{\frac{0.05222 \frac{cm^2}{g}}{11.35 \frac{g}{cm^3}}} \cdot \ln(10) = 3.88493... \text{ cm} \approx 3.9 \text{ cm}$$

Tehtävä 7

^{60}Co :n yleisimmät gammafotonit ovat 1.173 MeV ja 1.332 MeV. Lähes jokainen ^{60}Co :n hajoaminen tuottaa sekä 1.173 MeV:n, että 1.332 MeV:n gammafotonin. Mitä suurempi on fotonin energia, sitä läpikulkeutuvampi se on. Jotta suojaus olisi varmasti riittävä, tulisi sen paksuus valita energettisemmän fotonin mukaan. XCOMista löytyy massavaimennuskertoimet 1.25 MeV:n ja 1.5 MeV:n fotoneille ($0.05875 \frac{cm^2}{g}$ ja $0.05222 \frac{cm^2}{g}$). Massavaimennuskertoimen 1.332 MeV:n fotonille on likimain näiden massavaimennuskertoimien keskiarvo: $5.5485 \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{g}$.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow e^{-\mu x} = \frac{I}{I_0} = 0.05$$

$$x = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln(0.05) = -\frac{\frac{E}{\rho}}{\rho} \cdot \ln(0.05) = -\frac{\frac{E}{\rho}}{\rho} \cdot \ln(0.05) = -\frac{1}{5.5485 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 11.35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \cdot \ln(0.05)$$

$$x = 4.754982... \text{ cm} \approx 4.8 \text{ cm}$$

Tehtävä 8

a) Kantama 10 MeV:n alfahiukkaselle alumiinissa: $R = \frac{CSDA}{\rho} = \frac{1.666 \cdot 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}}{2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0.0061704... \text{ cm} \approx 61.7 \mu\text{m}$

b) Protoni pysäytysjännite alumiinissa energialla 3.5 MeV on $73.88 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. 5 mm:n matkalla protoni menettää energian $E_{\text{loss}} = 73.88 \text{ MeV} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0.5 \text{ cm} = 99.738 \text{ MeV} \approx 100 \text{ MeV}$.

c) Kantama 500 keV:n elektronille ilmassa on $0.1995 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$. Ilman tiheys NTP-oloissa on noin $1.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Kantamaksi saadaan $R = \frac{CSDA}{\rho} = \frac{0.1995 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}}{1.27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \approx 157 \text{ m}$. Mikäli elektroni luovuttaa koko energiansa ilmaan, se voi tuottaa $\frac{500 \cdot 10^3 \text{ eV}}{33.97 \text{ eV}} \approx 14700$ ioniparia.

Tehtävä 9

a) Intensiteetti törmäämättömälle neutronivuolle:

$$I = I_0 e^{-\sum_{\text{total}} N x} = (7.2 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}) e^{-4.2b \cdot (\frac{10^{-24} \text{ cm}^2}{b}) (4.23 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}) (5 \text{ cm})} \approx 2.96 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

b) Todennäköisyys absorptiolle:

$$P = 1 - e^{-\sum_{\text{abs}} N x} = 1 - e^{-3.4b \cdot (\frac{10^{-24} \text{ cm}^2}{b}) (4.23 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}) (5 \text{ cm})} = 0.5128 \approx 51 \%$$

Tehtävä 10

a) Ioni-elektroniparien kokonaisvaraus on nolla, sillä jokaisessa parissa ionin varaus (+e) ja elektronin varaus (-e) kumoavat toisensa.

b) 4.25 MeV:n alfahiukkanen tuottaa $N_e = \frac{4.25 \cdot 10^6}{35} \text{ MeV} \approx 120\,000$ vapaata elektronia. Elektronien kokonaisvaraus $Q = N_e q = 120\,000 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 19 \cdot 10^{-15} \text{ C}$. Alfahiukkanen tuottaa 300 hiukkaa sekunnissa. $N_e = 120\,000$ elektronina syntyy $\frac{120\,000}{300} = 400$ sekunnissa. Alfahiukkasen tuottamaksi sähkövirraksi saadaan näin $I = \frac{Q}{t} = \frac{19 \cdot 10^{-15}}{400} \frac{\text{C}}{\text{s}} = 4.8 \cdot 10^{-17} \text{ A}$. 1 Voltin jännitteeseen tarvitaan resistanssi $R = \frac{U}{I} = \frac{1 \text{ V}}{4.8 \cdot 10^{-17}} = 2 \cdot 10^{16} \Omega$.

c) Alfahiukkasen varaus (+2e) on kaksi kertaa suurempi kuin protonin, joten $q = 2e = 3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Tunnin aikana ilmaisimen läpäiseen kokonaisvaraus $600 \cdot 3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Tämä vastaa sähkövirtaa $I = \frac{q}{t} = \frac{600 \cdot 3.2 \cdot 10^{-19}}{3600} \frac{\text{C}}{\text{s}} = 5.3 \cdot 10^{-20} \text{ A}$.