

## 1.1 ATOMIN DISKREETIT ENERGIATILAT

### 1.1.1 Johdanto

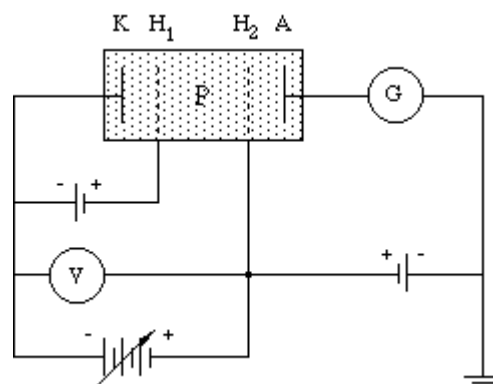
Bohrin atomimalli (v. 1913) oletti pysyvien, diskreettien elektronitilojen olemassaolon atomeissa. Tämän mallin mukaan atomien lähettämän sähkömagneettisen säteilyn diskreetti spektri aiheutui elektronien kokemista transiatioista energiatilalta toiselle. Suora kokeellinen näyttö diskreettien energiatilojen olemassaolosta saatiin v. 1914, jolloin Franck ja Hertz tutkivat atomien välisiä epäelastisia törmäyksiä.

Epäelastisessa törmäyksessä osa tulevan hiukkasen energiasta siirtyy kohtiohiukkasen sisäiseksi energiaksi. Ajatellaan kohtiota, joka on perustilassa eli alimmassa mahdollisessa energiatilassaan  $E_0$ , ja olkoon kohtion seuraavaksi matalin mahdollinen energiatila (ensimmäinen viritystila)  $E_1$ . Olkoon tulevan hiukkasen kineettinen energia  $E_K$ , ja oletetaan tilanne, jossa tulevan hiukkasen massa on hyvin pieni kohtion massaan verrattuna (esim. elektronin törmäys atomiin). Tällöin tulevan hiukkasen ja kohtion törmäys on elastinen, jos  $E_K < (E_1 - E_0)$ . Jos  $E_K \geq (E_1 - E_0)$ , voi kohtioatomi luovuttaa kineettistä energiaa kohtiolle, jolloin kohtio siirtyy ensimmäiseen viritystilaansa  $E_1$ . Kohtion virittyminen voidaan havaita tulevan hiukkasen kineettisen energian pienentymisenä.

### 1.1.2 Franckin ja Hertzin koe

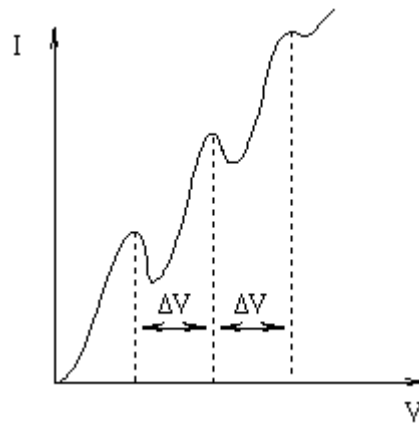
Franckin ja Hertzin koe suoritetaan kuvan 1 mukaisella laitteistolla. Franckin ja Hertzin putkessa P on neonkaasua, jota ionisoidaan hehkukatodilta K saatavilla elektroneilla. Hila  $H_1$  on noin +2 V:n potentiaalissa katodiin nähden, ja sen tehtävänä on vetää elektroneja pois katodin välittömästä läheisyydestä. Elektronit kiihdytetään hilojen  $H_1$  ja  $H_2$  välisessä sähkökentässä. Hilan  $H_2$  ja anodin A välillä on -8 V:n hidastava jännite estämässä taustavirtaa kasvattavia matalaenergisiiä elektroneja pääsemästä anodille.

Kun kiihdytysjännite on pieni, elektronit siroavat elastisesti putkessa olevista neonatomeista. Jännitteen kasvaessa yhä suurempi osa katodilta irronneista elektroneista pääsee anodille elastisten sirontojen kautta, jolloin anodivirta kasvaa. Kun elektronien kineettinen energia ylittää neonin ensimmäisen virityksen energian, elektronit voivat sirota epäelastisesti. Näiden elektronien jäljelle jäänyt kineettinen energia on niin pieni, että ne eivät pääse hilalta  $H_2$  anodille, jolloin anodivirta pienenee äkillisesti. Kun jännite



*Kuva 1: Mittauskytkentä Franckin ja Hertzin kokeessa.*

edelleen kasvaa, epäelastisesti sironneet elektronit kiihtyvät uudelleen (anodivirta kasvaa), kunnes ne jälleen voivat virittää neonatomin (anodivirta pienenee) jne. Tuloksena on siis kuvan 2 kaltainen anodivirran käyttäytyminen.



**Kuva 2:** Anodivirran käyttäytyminen Franckin ja Hertzin kokeessa.

Käyrän maksimikohtaa vastaava jännite antaa elektroneille sellaisen kineettisen energian, että ne voivat virittää neonatomin. Kahta peräkkäistä maksimia vastaava potentiaaliero on siten neonin ensimmäistä viritystilaa vastaava jännite. Huomattakoon, että kahden maksimin välinen jännite on kontaktipotentiaaleista (katso 1.1.3) johtuen erisuuri kuin nollan ja ensimmäistä maksimia vastaavan jännitteen väli.

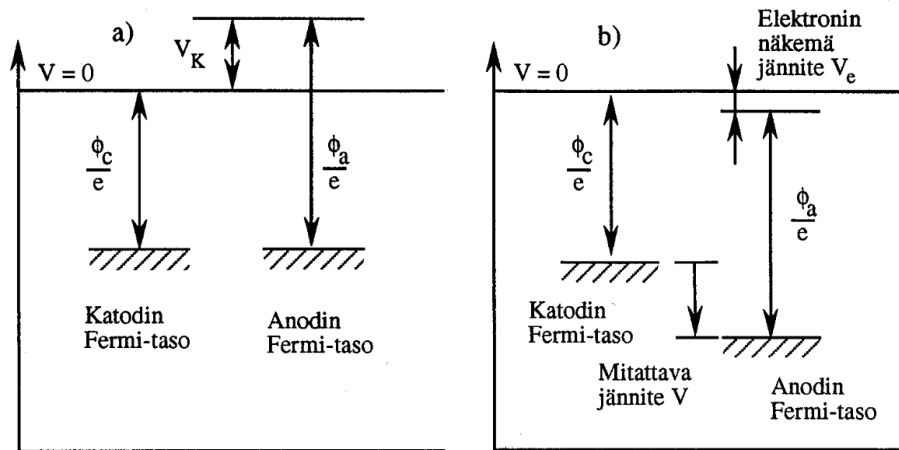
Putkessa kulkevien elektronien todennäköisyys neonatomista siroamiselle on kääntäen verrannollinen elektronien nopeuteen. Kuvassa 2 tämä ilmenee siten, että kiihdytysjännitteen kasvaessa virtaminimit osuvat yhä suuremmille virta-arvoille, ja suurilla jännitteillä käyrän aaltoilu katoaa kokonaan. Käyrän muoto riippuu myös neonatomien tiheydestä ja nopeusjakaumasta putkessa. Kumpaankin voidaan vaikuttaa putken lämpötilaa säätämällä.

### 1.1.3 Kontaktipotentiaalit

Tarkastellaan elektroniputken katodin ja anodin potentiaalitasokaaviota kahdessa eri tapauksessa. Ensimmäisessä tapauksessa katodi ja anodi ovat molemmat maadoitettuja (kuva 3a). Toisessa tapauksessa katodi on maadoitettu anodin ollessa matalammassa potentiaalissa (kuva 3b). Ensimmäisessä tapauksessa on sekä katodi- että anodimateriaalissa ylimmän miehitetyn elektronitilan energian (Fermi-tason) asetettava samalle tasolle. Jos nyt irrotetaan elektroni joko katodilta tai anodilta ja viedään se kauas materiaaleista (vastaten tyhjiön potentiaalia  $V=0$ ), kumpaankin elektroniin on tehtävä sama määrä työtä. Kuitenkin katodin ja anodin työfunktio (eli elektronin irrottamiseen tarvittavat työmäärät)  $\varphi_c$  ja  $\varphi_a$  ovat erisuuret. Tämä näennäinen ristiriita johtuu työfunktion määritelmästä, jonka mukaan työfunktio on se energia, joka tarvitaan irrottamaan elektroni materiaalista, mutta johon ei lasketa mukaan ulkoista kenttää vastaan tehtävää työtä. Tällöin irrotetun elektronin on jäätävä hyvin lähelle aineen pintaa.

Kun liitetään yhteen kaksi materiaalia, joilla on erisuuri työfunktio, liitoskohdan ulkopuolella lähellä pintaa on tällöin makroskooppinen ulkoinen sähkökenttä, jonka potentiaalia kutsutaan

kontaktipotentialiksi, ja joka tekee irrotettuihin elektroneihin sellaisen työn, että kaukana liitoskohdasta elektroneihin tehdyt työt tulevat yhtä suuriksi, vaikka työfunktiot ovatkin erisuuret. Kuvasta 3a nähdään, että jos irrotustyö anodilta on suurempi kuin irrotustyö katodilta, katodilta irtoava elektroni kokee kontaktipotentialin  $V_K = (\varphi_a - \varphi_c)/e$  vuoksi katodin ulkopuolella makroskooppisen sähkökentän, joka ajaa elektronia kohti anodia.



**Kuva 3:** Elektroniputken potentiaalitasokaavio kun katodi on maadoitettu ja a) myös anodi on maadoitettu, b) anodi on matalammassa potentiaalissa. Huomaa, että kuviin on piirretty oppikirjoissa esiintyvän käytännön mukaisesti positiivisen testivarauksen  $+e$  kokema potentiaali. Näin ollen korkein potentiaali vastaa tilaa, johon elektroni mieluiten haluaisi asettua. Kuvassa on oletettu, että irrotustyö anodilta on suurempi kuin irrotustyö katodilta (yleensäkin elektronien tuottamiseen tarkoitettujen materiaalien työfunktioiden tulee olla pieniä), ja että elektroni on tyhjiön energiatasolla lähellä katodimateriaalin pintaa (potentialin nollatason valinta ei kuitenkaan vaikuta tekstissä esitetyn laskun lopputulokseen).

Kuvassa 3b on esitetty potentiaalitasokaavio tilanteessa, jossa anodi on matalammassa potentiaalissa. Katodi- ja anodimateriaalit eivät enää ole sähköisessä kontaktissa toisiinsa, joten Fermi-tasojen paikat voivat muuttua toistensa suhteen. Maadoituksen vuoksi katodin nettovaraus pysyy nollassa, joten myös sen Fermi-taso pysyy paikallaan. Anodi varautuu negatiivisesti, joten sen Fermi-taso kuvassa 3 laskee alaspäin. Yleismittarilla mitattava jännite on anodi- ja katodimateriaalien Fermi-tasojen erotus. Elektronin näkemä jännite on tällöin

$$V_e = V_K + V = \frac{(\varphi_a - \varphi_c)}{e} + V, \quad (1)$$

missä  $V_K > 0$  ja  $V < 0$  valitun merkintätavan mukaan.

Tarkastellaan nyt työtä, jonka ulkoinen sähkökenttä tekee elektroniin, kun elektroni siirtyy läheltä katodin pintaa lähelle anodin pintaa. (Saavuttuaan anodille elektroni pääsee joka tapauksessa Fermi-tasolle, koska elektronin osuessa aineeseen vapautuu irroitustyön verran energiaa.) Sähköstatiikan merkkisääntöjen mukaan sähkökentän tekemä työ on

$$W_{c \rightarrow a} = q(V_c - V_a), \quad (2)$$

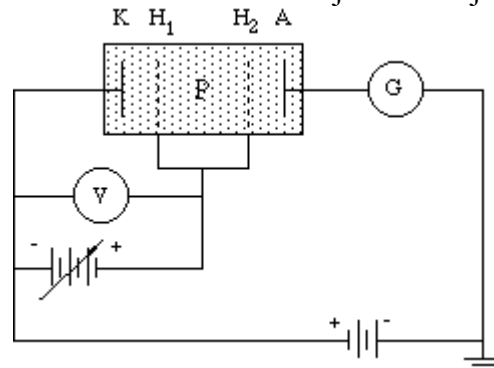
missä  $q$  on varaus (tässä tapauksessa  $-e$ ),  $V_c$  on sähköpotentiaali katodin pinnan lähellä (nollatason valinnan vuoksi  $V_c=0$ ) ja  $V_a$  sähköpotentiaali anodin pinnan lähellä. Potentiaaliin  $V_a$  vaikuttavat sekä kontaktipotentiaali  $V_K$  että varautumisesta aiheutuva (mitattava) jännite  $V$ . Työ on tällöin

$$W_{c \rightarrow a} = -e(-V_K + V), \quad (3)$$

sillä kontaktipotentiaali pyrkii kiihdyttämään ja anodin varautuminen jarruttamaan elektronia.

### 1.1.4 Neonin ionisaatiopotentiaalin mittaaminen

Franckin ja Hertzin putkella voidaan myös mitata neonin ionisaatiopotentiaali eli pienin jännite, jolla kiihdytetty elektroni voi törmäyksessä poistaa neonatomista yhden elektronin. Kytkeä on tällöin kuvan 4 mukainen. Elektronit kiihtyvät katodin ja hilan  $H_1$  välisessä sähkökentässä ja kulkevat vakionopeudella hilojen välissä, elleivät törmää epäelastisesti. Anodi on negatiivinen katodiin nähden, jolloin elektronit eivät pääse anodille. Sen sijaan positiiviset neon-ionit kulkeutuvat anodille. Ionisaatiopotentiaalin mittauksessa mitataan virtaa kiihdytysjännitteen funktiona. Kun kiihdytysjännite on pienempi kuin ionisaatiopotentiaali, virta on nolla. Ionisaatiopotentiaalin kohdalla virta alkaa kasvaa voimakkaasti. Neonin ionisaatiopotentiaali on virran nousukohtaa vastaava jännite korjattuna kontaktipotentiaalilla.



**Kuva 4:** Mittauskytkentä neonin ionisaatiopotentiaalin mittauksessa.