

1. Hilapisteiden määrä

Laske, kuinka monta hilapistettä on yksikkökopissa a) yksinkertaisessa kuutiollisessa, b) tkk:ssa ja c) pkk:ssa. (Ota huomioon, että esimerkiksi yksikkökopin kulmassa olevasta pisteestä lasketaan vain 1/8 kopin sisälle). Osoita lisäksi, että sinkkivälkerakenteessa molempia atomeja on yhtä paljon.

2. Hilojen täyttöasteet

Osoita, että suurin mahdollinen suhteellinen tilavuus, joka voidaan täyttää koviksi palloiksi oletetuilla atomeilla, on a) yksinkertaisessa kuutiollisessa rakenteessa 52%, b) tkk-rakenteessa 68% ja c) pkk-rakenteessa 74%. (Vihje: Määritä ensin pallojen maksimisäde ja käytä sen jälkeen edellistä tehtävää.)

3. Tiheyden, atomimassan, hilarakenteen ja hilavakion yhteys

Alumiinin tiheys on 2700 kg/m^3 ja sen atomimassa on 26.98 u. Mikä on alumiinikiteen hiukkastiheys, ts. kuinka monta Al-atomia kiteessä on 1 m^3 :ssä? Alumiinin kiderakenne on pkk. Päättele näistä tiedoista hilavakion arvo ja vertaa sitä mitattuun arvoon $a = 0.405 \text{ nm}$.

4. Pallomalli NaCl-rakenteelle

Olettamalla, että atomit käyttäytyvät kuin kovat pallot, laske optimaalinen pallojen säteiden suhde Na^+Cl^- -rakenteelle. Lähde siitä, että isommat pallot (Cl^-) ovat niin suuria kuin kopin koko sallii ja määritä sen jälkeen suurin mahdollinen väliin mahtuvan pallon (Na^+) säde. Vastaus: $\sqrt{2} + 1 = 2.4$.

5. Pkk Bravais-hilana

Osoita, että pkk-rakenne on Bravais-hila. Tätä varten valitse sopivat \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 ja \mathbf{a}_3 siten että lauseke $\mathbf{r} = n_1\mathbf{a}_1 + n_2\mathbf{a}_2 + n_3\mathbf{a}_3$, missä n_1 , n_2 ja n_3 ovat kokonaislukuja, antaa kaikki pkk-rakenteen hilapisteet yksikkökopin sisällä mutta ei näytä synnyttävän ylimääräisiä pisteitä.

1. Hilavakion mittaus

Kuparin kiderakenne on pkk. Käyttäen säteilyä, jonka aallonpituus on 0.1537 nm, havaittiin kuparin (111)-heijastus sirontakulman θ arvolla $21^\circ 40'$ ja (200)-heijastus arvolla $\theta = 25^\circ 13'$. Mikä on hilavakion a arvo? [Merkintä (200) tarkoittaa heijastusta tasosta (100) vastaten kertalukua $n = 2$.]

2. Hilataosot

Piirrä kuutiollisen kiteen yksikkökoppiin hilatasot (210) ja (111). Osoita, että hilatasojen etäisyys yksinkertaisen kuutiollisen kiteen tapauksessa on kaavan

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

mukainen.

3. Hilarakenteen määrittäminen

Diffraktiomittauksessa havaittiin intensiteettihiiput seuraavilla sirontakulman θ arvoilla: 20° , 29° , 36.5° , 43.4° , 50.2° , 57.35° ja 65.55° . Käytetyn säteilyn aallonpituus oli 0.154 nm. Oletetaan että pienin kulma vastaa yksinkertaisen kuutiollisen hilan heijastusta (100). Pystytkö tällä oletuksella selittämään kaikki loput intensiteettihiiput?

4. Elektronien diffraktio

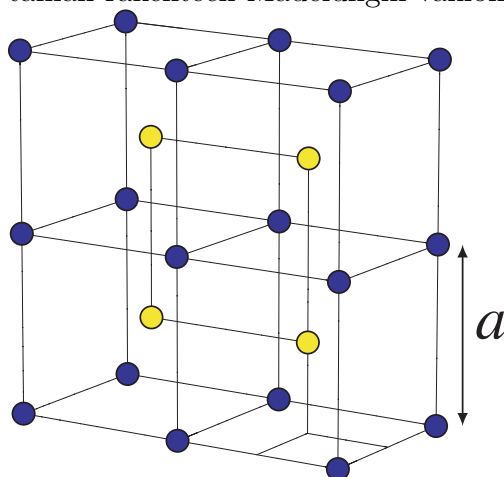
a) Ainetta tutkitaan elektronidiffraktiolla. Mikä on elektronin energian vähintään oltava, jotta saataisiin diffraktiopiikki yksinkertaisesta kuutiollisesta hilasta, jonka hilavakio on 0.2 nm? b) Jotta elektronit tunkeutuisivat kunnolla näytteeseen käytetään energiaa 100 keV. Missä kulmassa saadaan alimman kertaluvun heijastus? (Vastaus: 9.4 eV, 0.56°)

5. Heijastuksen sammuminen

Tutki onko tasoissa (100), (110) ja (111) sammuneita heijastuksia tilakeskeisessä kuutiollisessa rakenteessa. Toista sama pintakeskeisessä rakenteessa.

1. Madelungin vakio CsCl-rakenteelle

CsCl muodostuu Cs^+ - ja Cl^- -ioneista, jotka asettuvat tilakeskeisen rakenteen vuoropaikoille (kuva). Totea että lähinaapuriatomien etäisyys toisistaan $R = \frac{\sqrt{3}}{2}a$. Laske tämän rakenteen Madelungin vakion kolme ensimmäistä termiä.



2. Ionisidoksen malli

Oletetaan, että kahden atomin välisen vuorovaikutuksen energia on

$$U(R) = -\frac{\alpha}{R} + \frac{\beta}{R^8}, \quad (1)$$

missä R on atomien välinen etäisyys ja α ja β ovat positiivisia vakioita.

- Laske atomien välinen voima. Kumpi termeistä kuvaa attraktiota ja kumpi repulsiota?
- Laske atomien välinen tasapainoetäisyys.
- Vertaa attraktio- ja repulsienergiaita toisiinsa tasapainotilassa, missä attraktio- ja repulsiivoimat ovat yhtä suuret.

3. Pitkäaalloiset hilavärähtelyt

Osoita, että hilavärähtelyjen liikeyhtälö

$$M \frac{d^2 \xi_n}{dt^2} = K(\xi_{n-1} - 2\xi_n + \xi_{n+1}) \quad (2)$$

palautuu pitkällä aallonpituuksilla, jolloin ξ_n on hyvin hitaasti muuttuva n :n funktio, normaaliksi jatkuvan väliaineen aaltoyhtälöksi

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Vihje: Lausu ξ_{n+1} ja ξ_{n-1} kehittämällä $\xi(x)$ Taylorin sarjaksi pisteessä $x = na$.

4. Hilavärähtelyt kaksiatomiselle kannalle

Luennolla esitettiin värähtelytaajuksien lasku atomiketjulle, jossa on kahdesta erimassaisesta atomista koostuva kanta. Käy yksityiskohtaisesti läpi tämän laskun välivaiheet. Laske sekä akustisen että optisen haaran värähtelytaajuudet erikoistapauksissa a) $k = 0$ ja b) $k = \pi/a$ olettaen $M_1 > M_2$.

5. Hilavärähtelyjen parametrien arviointi

Äänen nopeus kuparissa on 4000 m/s. Arvioi atomien välinen jousivakio K sekä akustisten hilavärähtelyjen maksimitaajuus. Arvioi Debye-lämpötila kaavalla $\Theta_D \approx \hbar\omega_{\max}/k_B$. (kupari: pkk, hilavakio 361 pm, atomimassa 63.55 u. Oletetaan äänen suunnaksi [110], jolloin atomiketjumallissamme atomien välinen tasapainoetäisyys on hilavakio jaettuna $\sqrt{2}$:lla). (Vastaus: $K = 26$ N/m, $\Theta_D \approx 240$ K.)

6. Timantin ominaislämpö

Määrää timantin lämpökapasiteetti moolia kohden huoneen lämpötilassa. Käytä $\Theta_D = 1860$ K ja luentomonisteen kuvaa (sivu 13), jossa Debyen mallin mukainen lämpökapasiteetti on graafisesti esitetty lämpötilan funktiona. [Vastaus: $C = 5.7$ J/(K mol).]

1. Malli kovalentille sidokselle

a) Äärimmäisen yksinkertaistettuna mallina elektronille atomissa voidaan pitää syvää potentiaaliukuoppaa

$$U(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ kun } 0 < x < a \\ \infty & \text{ muulloin.} \end{cases} \quad (4)$$

Lausu neljä alinta energia-arvoa (vastaten kahdeksaa alinta energiatasoa) ja piirrä nämä pystysuoralle energia-akselille.

b) Ajatellaan, että meillä on kaksi tällaista potentiaaliukuoppaa täysin toisistaan erotettuna. Totea, että sallitut energia-arvot ovat samat kuin edellisessä kohdassa, mutta kunkin energia-arvon tasojen määrä on kaksinkertaistunut (= 4).

c) Ajatellaan seuraavaksi, että b)-kohdan potentiaaliukuopat yhtyvät yhdeksi potentiaaliukuopaksi, jonka leveys on $2a$. Piirrä tämän 8 alinta energia-arvoa vastaavalle akselille kuin kohdassa a). Vertaamalla kohtien b) ja c) energiatasoja pyri ymmärtämään mitkä tasot vastaavat toisiaan ja miten niiden energiat ovat muuttuneet potentiaaliukuoppien yhdistyessä.

d) Oletetaan, että kummassakin b)-kohdan potentiaaliukuopassa on 2 elektronia. Mikä on tämän mallin mukainen kovalentin sidoksen sidosenergia eli kuinka paljon energiaa vapautuu potentiaaliukuoppien yhdistyessä?

2. Schrödingerin yhtälön ratkaisu laatikossa

Osoita, että aaltofunktio

$$\psi(x, y, z) = A \sin \frac{n_1 \pi x}{L} \sin \frac{n_2 \pi y}{L} \sin \frac{n_3 \pi z}{L} \quad (5)$$

(n_1 , n_2 ja n_3 ovat positiivisia kokonaislukuja) on Schrödingerin yhtälön ratkaisu, ja että se häviää L -sivuisen kuution pinnalla (sivutahkot siis kohdissa $x, y, z = 0$ ja L).

3. Energiatasojen tarkka lukumäärä

Tarkastellaan elektroneja kuution muotoisessa syvässä potentiaaliukuopassa, jonka tilavuus $V = L^3$. Etsi kaikki energia-arvot, jotka ovat pienempiä tai yhtä suuria kuin $E_r = 6\hbar^2\pi^2/mL^2$. Laske kuinka monta energiatasoa näissä on. Vertaa energiatasojen määrää luennolla arvioituun $n(E)V = (2\sqrt{2m^3V/3\pi^2\hbar^3})E^{3/2}$. [Vastaus: $n^{\text{tod}}(E_r) \approx 0.5n^{\text{arvioitu}}(E_r)$.]

4. Fermi-energiat numeerisesti

Laske vapaaelektronimallin mukainen Fermi-energia, Fermi-lämpötila, Fermi-aaltoluku ja Fermi-nopeus kuparille (tiheys 8.96 g/cm^3 , atomimassa 63.55 u , $Z = 1$) ja alumiinille (tiheys 2.70 g/cm^3 , atomimassa 26.982 u , $Z = 3$). (Vastaukset: 7.0 ja 11.6 eV , $81\,000$ ja $130\,000 \text{ K}$, 1.36 ja $1.75 \cdot 10^{10} \text{ 1/m}$, 1.57 ja $2.02 \cdot 10^6 \text{ m/s}$)

5. Vapaiden elektronien keskimääräinen energia

Laske vapaiden elektronien keskimääräinen energia perustilassa:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{n_e} \int_0^{\varepsilon_F} g(E) E dE. \quad (6)$$

(Vastaus: $\langle E \rangle = \frac{3}{5} \varepsilon_F$.)

1. Blochin aaltofunktio

Johda luentomateriaalin kaavat

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{i\hbar^2 k}{m} \frac{du}{dx} + U(x)u = \left(E - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right)u, \quad (7)$$

$$\langle p \rangle = \hbar k + \int u^*(x) \left(-i\hbar \frac{d}{dx}\right) u(x) dx. \quad (8)$$

2. Tiukan sidoksen menetelmä

Laske välivaiheet luennoilla esitetystä laskusta, missä johdetaan tiukan sidoksen mallin dispersiorelaatio $E_k = -\alpha - 2\beta \cos(ka)$. [Vihje: laske lausekkeen

$E_k = (\int \psi^*(x) H \psi(x) dx) / \int \psi^*(x) \psi(x) dx$ nimittäjä ja osoittaja erikseen. Kirjoita kumpikin tuplasummausmuotoon $\sum_{n'} \sum_n A_{n'n}$ ja laske kaikki $A_{n'n}$ käyttäen hyväksi kidepotentiaalin $U(x)$ jaksollisuutta. Oleta, että ketjussa olevien atomien määrä N on suuri, jolloin voit sivuuttaa kaikki ketjun päistä mahdollisesti aiheutuvat hankaluudet.]

3. Ryhmänopeus

Laske ryhmänopeus v a) hilavärähtelyille (oleta 1-ulotteinen hila ja 1-atominen kanta) ja b) vapaille elektroneille. c) Aaltopaketti voi edetä muotoaan muuttamatta, jos $v(k)$ on vakio. Missä tapauksissa niin on?

4. Elektronin liike ideaalisessa kiteessä

Tarkastellaan tiukan sidoksen mallia, missä dispersio on $E(k) = -\alpha - 2\beta \cos(ka)$. Ratkaise $v(k)$, $k(t)$, $v(t)$ ja $x(t)$ käyttäen puoliklassisia liikeyhtälöitä

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}, \quad F = \hbar \frac{dk}{dt}, \quad (9)$$

kun elektroniin vaikuttaa vakiovoima F ja se lähtee levosta $k(0) = 0$, $x(0) = 0$. Kuinka kauan kestää, että elektroni on palannut lähtöpisteeseensä?

5. Efektiivinen massa

Luennolla efektiivinen massa määriteltiin kaavalla

$$E \approx E_0 + \frac{\hbar^2 (k - k_0)^2}{2m^*}. \quad (10)$$

Osoita, että efektiivinen massa voidaan laskea lausekkeesta

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2}. \quad (11)$$

Sovella tätä tiukan sidoksen malliin $E = -\alpha - 2\beta \cos(ka)$ laskemalla m^* arvoilla $k = 0$ ja $k = \pi/a$. Laske myös energiakaistan leveys.

1. Varaustenkujettajien keskimääräinen nopeus

Aiemmin olemme laskeneet kuparin johtavuuselektronien tiheydeksi $8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Kuparijohdossa, jonka poikkipinta-ala on 1 mm^2 , kulkee 100 A:n virta. Arvioi Druden mallin mukainen johtavuuselektronien keskimääräinen nopeus ja vertaa sitä Fermi-nopeuteen.

2. Druden mallin perustelu

Tutkitaan Druden mallia ilman ulkoista sähkökenttää, jolloin elektronien keskimääräinen liikemäärä \mathbf{p} noudattaa yhtälöä

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\mathbf{p}}{\tau}. \quad (12)$$

(a) Osoita että yhtälön (12) ratkaisu alkuehdolla $\mathbf{p}(t=0) = \mathbf{p}_0$ on

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 e^{-t/\tau}. \quad (13)$$

(b) Edellinen tulos voidaan tulkita, että todennäköisyys sille, että elektroni ei vielä ole sironnut hetkellä t , on $F(t) = e^{-t/\tau}$. Laske tästä todennäköisyystiheys $f(t) = -dF/dt$ sille, että elektroni siroaa ensimmäisen kerran hetkellä t .

(c) Keskimääräinen aika, joka elektronilla kuluu ennen sirontaa, määritellään kaavalla $\langle t \rangle = \int_0^\infty t f(t) dt$. Osoita että $\langle t \rangle = \tau$.

(d) Kuinka kauan kestää, että puolet elektroneista on sironnut?

3. Druden mallin vapaa matka

Kuparin resistiivisyys ρ huoneen lämmössä on $1.68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Mikä on kuparin Druden mallin mukainen relaksaatioaika τ ? Laske kuinka pitkän matkan $l = v_F \tau$ Fermi-nopeudella kulkeva elektroni kulkee tässä ajassa, ja vertaa sitä kuparin hilavakioon 361 pm.

4. Malli epäpuhtaudelle puolijohteessa

Tarkatellaan n-tyyppin puolijohteen epäpuhtaustasoa olettamalla, että epäpuhtausatomin ytimen ylimääräinen varaus e aiheuttaa paikallisen Coulombin potentiaalin johtavuuskaistan elektronille. Vapaassa vetyatomissa perustilan sidosenergia ja perustilan radan säde ovat

$$E = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} = 13.6 \text{ eV} \quad , \quad r \approx \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = 53 \text{ pm}. \quad (14)$$

Väliaineessa on otettava huomioon, että elektronin efektiivinen massa muuttuu $m_e \rightarrow m^*$ ja varaus varjostuu, joten tyhjiön permittiivisyys täytyy korvata $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon\epsilon_0$, missä ϵ on dielektrisyysvakio. Arvioi tämän perusteella n-tyyppin epäpuhtaustason etäisyys johtavuuskaistan reunasta sekä epäpuhtaustilan säde indiumantimonidissa (InSb), missä $m^* = 0.01m_e$ ja $\epsilon = 17$. Vertaa energiaa InSb:n energiarakoon $E_g = 0.17 \text{ eV}$ ja sädettä hilavakioon 648 pm.

5. Varauksenkuljettajien tiheydet puolijohteessa

Osoita, että Fermi-funktiolle pätee

$$f(E) = \begin{cases} e^{-(E-\mu)/k_B T}, & \text{kun } E - \mu \gg k_B T \\ 1 - e^{-(\mu-E)/k_B T}, & \text{kun } \mu - E \gg k_B T. \end{cases} \quad (15)$$

Tutkitaan puolijohdetta, jossa elektronien tiheys johtavuuskaistassa on $n_n = \int f(E)g(E)dE$. Tässä integrointi on yli johtavuuskaistan, jonka alareuna on energialla E_n ja yläreuna energialla E'_n . Oletetaan että kaista on leveä ($E'_n - E_n \gg k_B T$) ja sen tilatiheys

$$g(E) = \frac{\sqrt{2}m_n^{3/2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E - E_n}, \quad (16)$$

missä m_n on johtavuuskaistan efektiivinen massa. Käyttäen yllä olevaa approksimaatiota $f(E)$:lle osoita, että

$$n_n = Am_n^{3/2}T^{3/2}e^{-(E_n-\mu)/k_B T}. \quad (17)$$

Mikä on vakion A arvo? Vastaava lasku aukoilta antaa tuloksen

$$n_p = Am_p^{3/2}T^{3/2}e^{-(\mu-E_p)/k_B T}, \quad (18)$$

missä E_p on valenssikaistan yläreunan energia ja m_p valenssikaistan efektiivinen massa. Johda näistä kaava

$$n_n n_p = A^2 (m_n m_p)^{3/2} T^3 e^{-E_g/k_B T}, \quad (19)$$

missä E_g on energiaraon leveys.

Apu: esim. Mathematica laskee $\int_0^\infty \sqrt{x}e^{-x}dx = \sqrt{\pi}/2$.

1. Tasasuuntaus diodissa

Arvioi päästö- ja estosuuntaisten virtojen suhde n-p-diodissa huoneen lämpötilassa, kun jännite on 0.5 V.

2. Ledin ja aurinkokennon materiaalit

Tutkitaan valoa emittoivaa diodia, jossa puolijohdemateriaalina on a) Si, b) $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ tai c) $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$. Näiden energiaraot ovat vastaavasti $E_g = 1.17, 1.82$ ja 2.8 eV. Minkä väristä valoa näistä diodeista saadaan? Jos samoista materiaaleista tehtäisiin aurinkokenno, mitä hyviä ja huonoja puolia kullakin näistä on? Huomaa että aurinkokennossa energiaraon ylittävää fotonin energiaa ei saada talteen.

3. Valon absorptio

a) Miksi timantti on läpinäkyvä? Sen energiarao on 5.33 eV.

b) Miksi kalsiumsulfidi on oranssinkeltainen? Sen energiarao on 2.42 eV.

c) Puhdas KCl on läpinäkyvä ja väritön. Tietyissä oloissa kiteeseen muodostuu ns. F-keskuksia, jotka absorboivat 2.2 eV:n fotoneita. Mitä aallonpituuksia tämä vastaa? Mitä voidaan sanoa kiteen väristä?

4. Elektroni tyhjällä paikalla kiteessä

F-keskus on alkali-halidi-kiteestä puuttuva negatiivinen ioni, jonka tilalla on elektroni. Mallinnetaan KCl-kiteessä energialla 2.2 eV havaittava absorptiopiikki elektronin siirtymäksi tasojen välillä, jotka vastaavat kahta alinta energia-arvoa äärettömän syvässä 1-ulotteisessa kuoppapotentialissa. Mikä on tällöin kuopan leveys? Vertaa sitä hila-
vakioon 0.629 nm. (Vastaus: 0.72 nm)

5. Johtavuuselektronien paramagnetismi

Laske vapaaelektronimallin mukainen Paulin paramagneettinen susceptibiliteetti alumiinille. (Käytä hyväksi aiemmissä tehtävissä laskettuja arvoja.) Vertaa tulosta mitattuun arvoon 2.1×10^{-5} . Susceptibiliteetti on laaduton suure, joka kertoo kuinka paljon näytteessä oleva kenttä poikkeaa magnetoivasta kentästä. Tulkitse tulos tämän perusteella.

1. Magneettisten dipolivoimien aiheuttama magnetismi

Lähtien kaavoista

$$\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad \text{ja} \quad \mathbf{M} = \frac{\chi}{\mu_0} \mathbf{B}, \quad (20)$$

tutki milloin magnetisaatio voi syntyä spontaanisti ilman magneetoivaa kenttää \mathbf{H} . Missä lämpötilassa tämä voisi toteutua paramagneettisille ioneille, joiden yksinkertaisen kuutiollisen hilan hilavakio on 0.3 nm?

2. Magneettinen tila potentiaalikuopassa

Tarkastellaan yksiulotteista hyvin syvää potentiaalikuoppaa, jonka leveys on L .

- Mitkä ovat Schrödingerin yhtälöstä saatavat kaksi alinta energia-arvoa?
- Potentiaalikuopassa on kaksi elektronia, joiden välistä vuorovaikutusta ei oteta huomioon. Perustelee, että näiden perustila ei ole magneettinen, ts. magneettinen momentti alimman energian tilassa häviää. Kuinka paljon korkeammalla energiassa on alin magneetoitunut tila?

3. Ferromagneettisten alueiden rajapinta

Ferromagneettisten alueiden rajapinnan paksuuden määrää kaksi tekijää.

- Magneetoituma \mathbf{M} pyrkii kiteessä olemaan aina tiettyyn suuntaan (raudassa [100]). Rajapinnassa tämä ei voi toteutua, joten siitä aiheutuu lisäenergia $E_1 \approx aLA$, missä L on rajapinnan paksuus ja A pinta-ala.
- Rajapinnassa \mathbf{M} :n suuntakulma θ muuttuu. Tästä aiheutuu energiatiheys $b(d\theta/dx)^2$. Laske energia olettaen, että θ muuttuu lineaarisesti nolasta π :hin. Olettaen, että rajapinnan rakenne vastaa kohdista 1 ja 2 saatavan kokonaisenergian minimiä L :n suhteen, laske seinämän paksuus ja energia. (a ja b ovat positiivisia vakioita.)

4. Suprajohtava lanka

Jos lämpötilassa T olevaan suprajohteeseen kohdistetaan kasvava magneettikenttä B , suprajohtavuus katoaa kentän saavutettua kriittisen arvon

$$B_c = B_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right], \quad (21)$$

missä B_0 on vakio. Lyijyllä $B_0 = 0.0803$ T ja $T_c = 7.193$ K. Minkä suuruinen sähkövirta voi korkeintaan kulkea 4 mm:n läpimittaisessa lyijylangassa lämpötilassa (i) 7.193 K, (ii) 4 K ja (iii) 0 K niin että lanka pysyy supratilassa? Mikä on näitä sähkövirtoja vastaava virtatiheys j ?

Opastus: Pitkässä, suorassa johtimessa kulkevan sähkövirran I synnyttämä magneettikenttä etäisyydellä r johtimen keskipisteestä on johtimen ulkopuolella $B = \mu_0 I / 2\pi r$. Vastaukset (ii) ja (iii): 555 ja 803 A, ja 4.4 ja $6.4 \cdot 10^7$ A/m²

5. Suprajohteen vuoviivat

Luentomonisteessa on esitetty kuva vuoviivoista toisen lajin suprajohteessa. Tarkista, että kuvassa vuoviivojen tiheys vastaa annettua magneettikenttää 1 T.