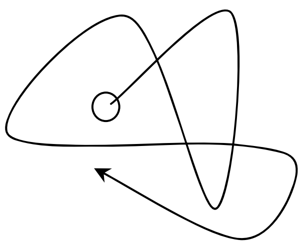
3. KORRONTEAREN EROAPENA

Aurreko ikasgaian, erdieroale batean oreka termodinamikoan elektroi eta hutsune-kontzentrazioak ebazteko erabiltzen diren ekuazioak ikasi genituen.

Oreka termo*dinamikoan*, eramaile mota bakoitzaren mugimendu garbia nulua izan arren, eramaileak ez daude geldirik. Jatorri termikoa duen energia zinetikoa dutenez, eramaileak etengabe mugitzen dira. Ibilaldiak laburrak eta aleatorioak dira, sare kristalinoan atomoekin talka egiten dutelako. Mugimendu termiko hori aleatorioa denez, korrontea, guztira, zero da.



3.1 Irudia. *Elektroi baten mugimendu aleatorioa*

Talken artean, mugimenduak nahiko azkarrak izaten dira giro-tenperaturan ere v_{th} = 1E7 cm/s (orduko 360.000 km).

Kanpotik perturbazio bat datorrenean bakarrik gerta daiteke korronte elektrikoa, bestela eramaileen guztizko erantzuna hutsa da-eta.

Erdieroaleetan, hiru erantzun posible daude kanpoko eragin baten aurrean: atoia, barreiapena (difusioa) eta sorrera-birkonbinaketa prozesuak. Kapitulu honetan lehenengo biak ikusiko ditugu, eta azken prozesua hurrengoan ikasiko dugu.

Nahiz eta bakoitza bere aldetik analizatu, hiru prozesuak batera gertatzen dira, eta elkarrekin erlazionatzen dira.

3.1 Korrontearen eroapenaren mekanismoak:

- Atoiko mekanismoa: erdieroalean, kanpoko kausa bat dela-eta, eremu elektriko bat – potentzial bat- agertzen denean gertatzen da. Metaletan gertatzen denaren antzekoa da, eta bere adierazpide matematikoa Ohmen legea da.
- Barreiapeneko mekanismoa: elektroi- eta hutsune-kontzentrazioetan, gradienteak edo espazioarekiko aldaketak daudenean gertatzen da. Mekanismo hori erdieroaleen berezitasun bat da eta hortik datoz dispositiboen ezaugarri eta aplikazio gehienak.

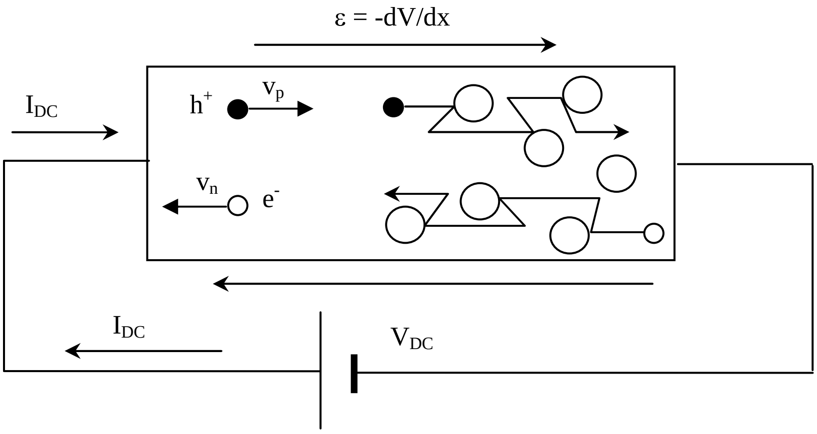
3.2 Atoiaren bidezko eroapena: Ohmen legea

Atoia edo deriba, definizioz, karga duen partikula aske batek aplikatutako eremu elektriko baten menpean duen mugimendua da.

Erdieroale batean, aplikatutako eremu batek, karga positiboak eta negatiboak bereizten ahalegintzen da. Karga positiboek (hutsuneek) eremuaren noranzkoan joateko joera agertzen dute. Negatiboek (elektroiek), aldiz, eremuaren kontrako noranzkoan joko dute (ikus 3.2 Irudia).

Sarearen kontrako talkak direla-eta –termikoki iraultzen ari den sareko atomoen eta ezpurutasunen ioien kontra- azelerazioa eten eta berrasten da.

Esan daiteke kanpotik, ikuspegi makroskopikotik, eramaile bakoitzaren higidura garbia v konstante batez gertatzen dela (batez beste).

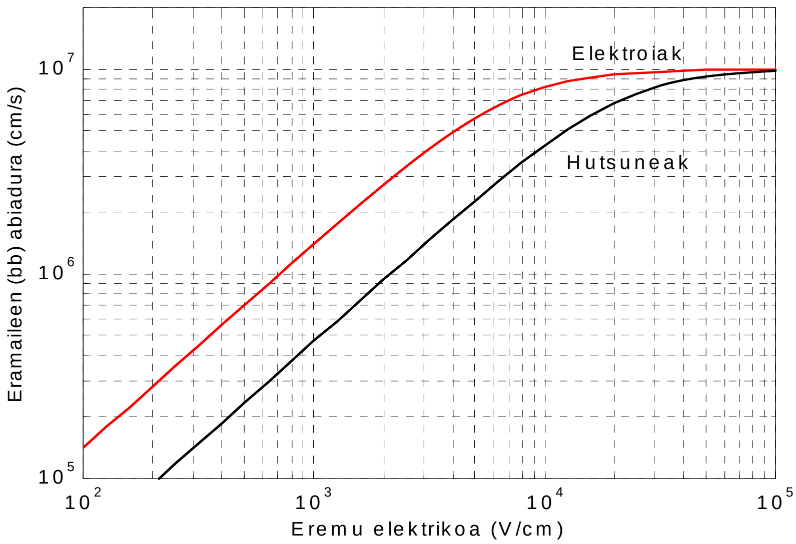


***3.2 Irudia** Atoiko korrontearen mekanismoa*

Atoia, beraz, eremuak eramaileak –bere noranzkoan edo kontrakoan- mugiaraztea da; mugimendu hori abiadura eraginkor konstanteaz gertatzen da.

Higidura termikoak bere horretan jarraitzen du. Gainezartzen zaion atoiaren eragina hutsa izango ez denez, mugimendu termikoa ez dugu normalean aipatzen, baina ez da desagertu. Hau da, praktikoki, aintzat ez hartzeko modukoa da.

Eramaileek hartzen duten batez besteko abiadura eremuaren balio absolutuaren araberakoa da. Kasu orokorrean, menpekotasun nahiko konplexuak agertzen dira eta modelatze matematikoa ez da batere erraza. Baina, gure ohiko egoeretan, eramaileek hartzen duten abiadura eremuarekiko proportzionala da, 3.3 Irudian ikusten denez (interesgarria izaten den tartean). Gero asetzen da, eta ez dago 1E7 cm/s lortzerik.



***3.3 Irudia.** Atoiko abiaduraren neurketa esperimentalak (tenperatura eta dopaketa finkoak mantenduz): eremuarekiko menpekotasun lineala du tarte zabal batean*

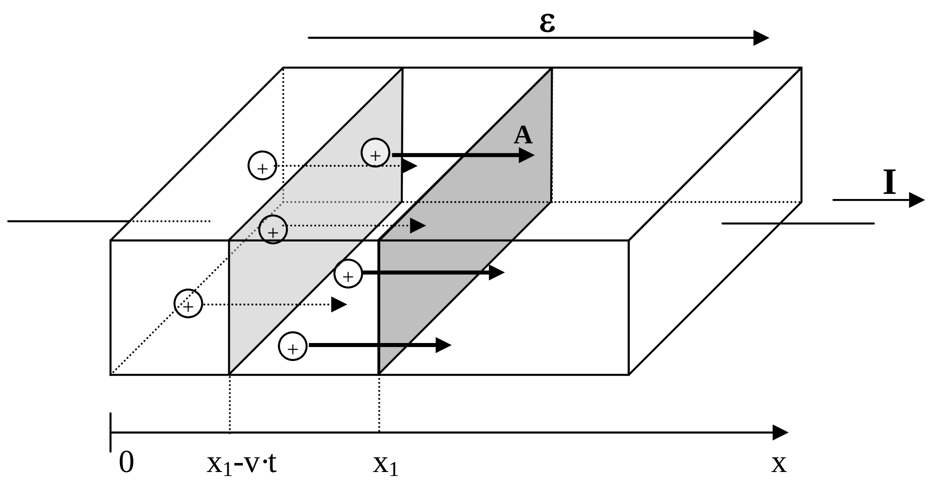
Beraz, eta eragiten duen abiaduraren noranzkoa kontuan hartuta, guri interesatzen zaigun tartean:

$v_n(cm/s) = -\mu_n \ x \ \varepsilon(V/cm)$

$v_p(cm/s) = +\mu_p \ x \ \varepsilon(V/cm)$

non μ mugikortasuna baita, μ_n = 1200 $cm^2/s/V$ eta μ_p = 400 $cm^2/s/V$ izaten baitira gutxi gorabehera.

ATOIKO KORRONTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENA:



3.4 Irudia. *Atoiko korrontearen ebazpenerako eskema (hutsuneetarako)*

L luzera eta A sekzioa dituen erdieroalezko lagina hartuta, t denboran sekzio bat **eskuinerantz** zeharkatzen duen **c motako eramaileen korrontea** kalkulatuko dugu:

c bolumeneko c motako eramaileen kontzentrazioa da

v eramaileen abiadura da (negatiboa izan liteke) eta, beraz, eramaileek v·t distantzia egiten dute t denboran.

T denboran A sekzioa **eskuinerantz** zeharkatzen duten c eramaileak = cAv·t

Denbora horretan A sekzioa **eskuinerantz** zeharkatzen duen karga = q_ccAv·t

Korrontea = Karga / t = q_ccAv.

Korronte-dentsitatea = Korronte/A = $q_c$cv.

Emaitza elektroietarako eta hutsuneetarako bereiziz gero:

$J_{n,\ atoi} = -q \ x \ n \ x \ v_n$

$J_{p,\ atoi} = \ q \ x \ p \ x \ v_p$

Aurreko ekuazioetan abiaduren adierazpenak erabilita,

$$J_{n,\,atoi} = -q \times n \times (-\mu_n \times \varepsilon) = q\ p\ \mu_n\ \varepsilon$$

$$J_{p,\,atoi} = q \times p \times (+\mu_p \times \varepsilon) = q\ p\ \mu_p\ \varepsilon$$

Beraz, atoiko korrontea, guztira:

$$\mathbf{J_{atoi} = J_{n,\,atoi} + J_{p,\,atoi} = q\ n\ \mu_n\ \varepsilon + q\ p\ \mu_p\ \varepsilon = q\ (n\mu_n + p\mu_p)\ \varepsilon}$$

Bestalde, Ohmen legeak dioenez: $I \times R = V$

$$JA \times \rho\ (L/A) = \varepsilon \times L \rightarrow \mathbf{J = \varepsilon / \rho = \sigma \times \varepsilon}$$

non σ eroankortasuna eta ρ erresistibitatea diren.

Eroankortasuna materialak eroateko duen erraztasuna da (siemens/cm edo 1/ohm/cm). Erresistibitatea materialak korrontea eroateari jartzen dion oposizioa da.

$\sigma = q\ (n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$

$\rho_n = 1 / \sigma_n$ $\rho_p = 1 / \sigma_p$ $\rho_n = 1 / (1/\rho_n + 1/\rho_p)$

Beraz, bi eramaile mota izatea bi erresistentzia paraleloan izatea bezalakoa da.

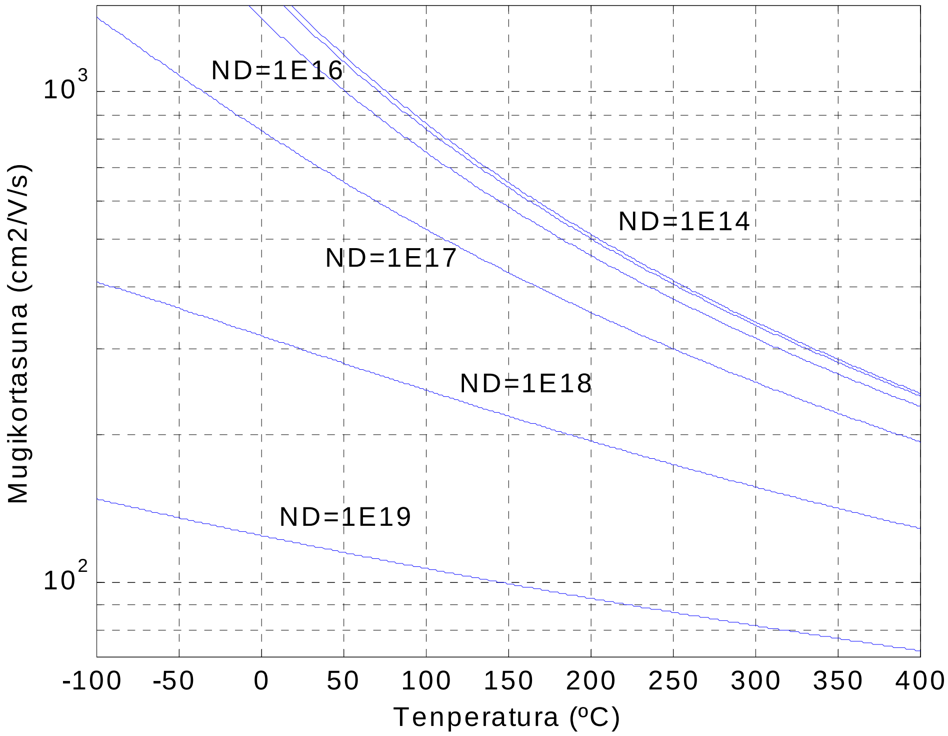
- Berezko erdieroale batean, orekan, $n = p = n_i$ eta, beraz, $\sigma = q\ (\mu_n + \mu_p)\ n_i = \sigma_i$ (berezko eroankortasuna). Berehala ikusten denez, tenperatura igo ahala, n_i hazten da eta erdieroaleak hobeto eroaten du.
- Erdieroale estrintseko batean, $M >> m$ eta, beraz:

  $\sigma = q\ (m\mu_m + M\mu_M) \sim q\ M\mu_M$. Orduan, $\sigma = \sigma_M$.

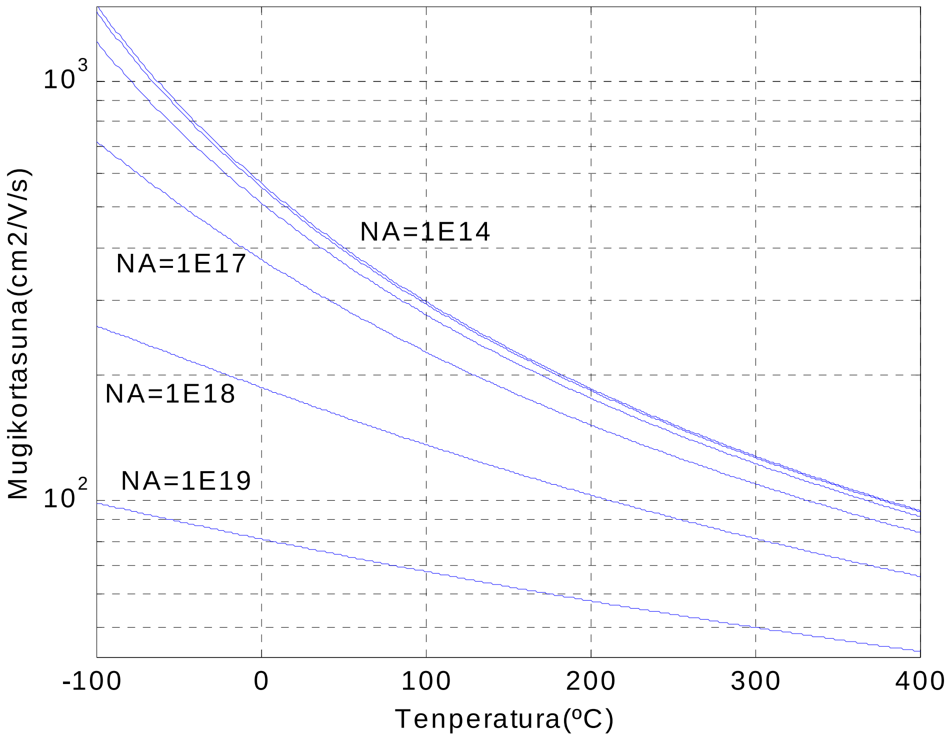
MUGIKORTASUNA, μ:

Atoiaren parametro nagusia aztertu behar dugu jarraian, hau da, mugikortasuna:

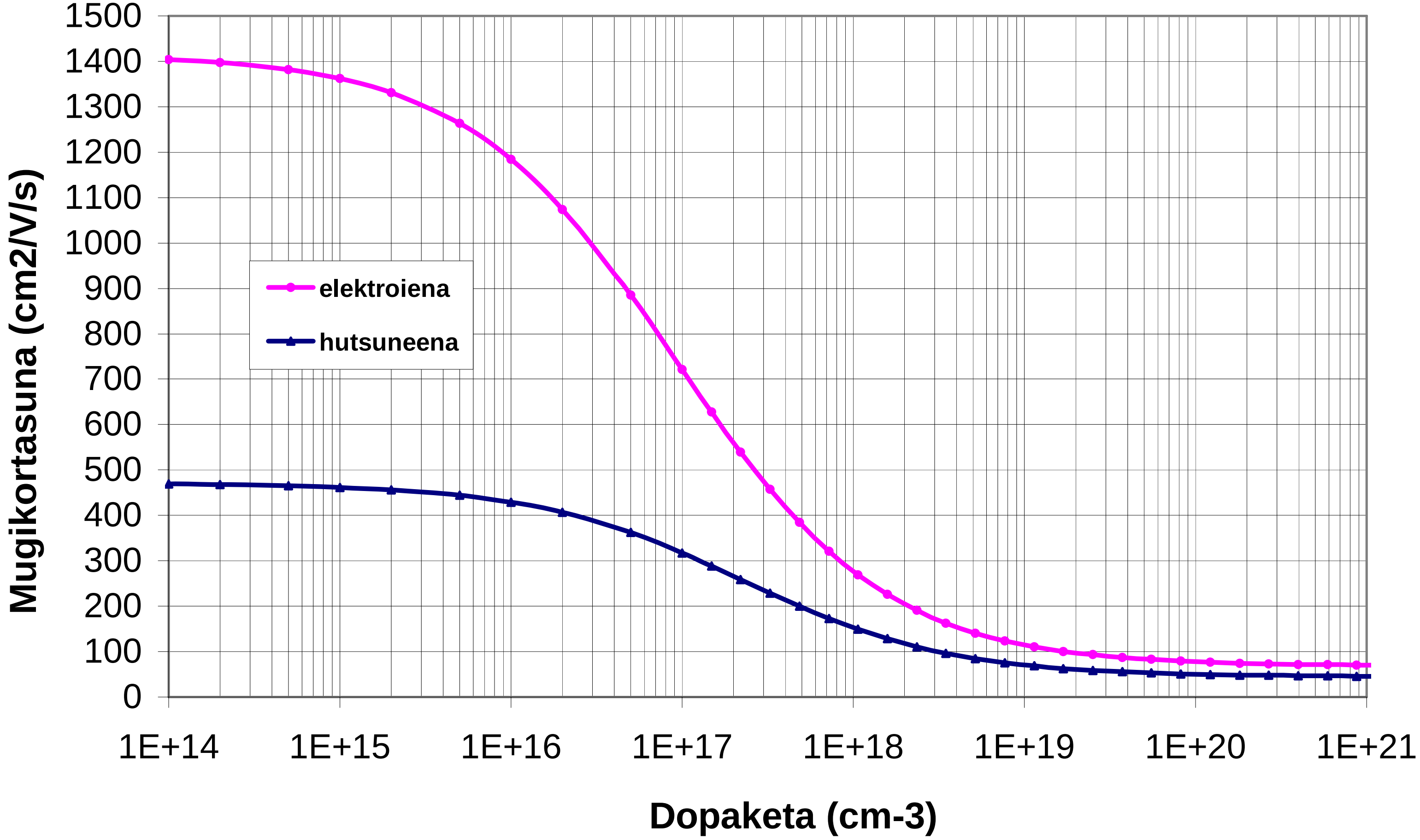
- Unitateak: $cm^2/V/s$
- Gure problemetan konstantea izango den arren, ez da zehazki konstantea. Tenperaturarekin eta ezpurutasun-kontzentrazioarekin jaisten da eta eremuaren menpe dago.
- Eramaile baten mugikortasunak, bere izenak adierazten duenez, eramaileak -eremu baten pean- duen mugitzeko erraztasuna adierazten digu.
- Kasu gehienetan, $\mu_n > \mu_p$; Normalean izaten ditugun dopaketekin, $\mu_n \sim 2.5\ \mu_p$. Horregatik, dopaketa berdina izanez gero, n motako erdieroaleak eroale hobeak izaten dira.



3.5 Irudia. *Elektroien mugikortasuna tenperaturaren eta dopaketaren arabera*



3.6 Irudia. *Hutsuneen mugikortasuna tenperaturaren eta dopaketaren arabera*



3.7 Irudia. *Hutsuneen eta elektroienen mugikortasuna dopaketaren arabera (silizioan, giro-tenperaturan)*

3.3 Barreiapeneko eroapena

Gasen zinetikan, barreiapena edo difusioa fenomeno ezaguna da partikula klasikoetan, eta , higidura termiko aleatorioan du jatorria. Higidura horrek, gasa bere gordailu osoan zehar barreiatzera, mugitzera, darama.

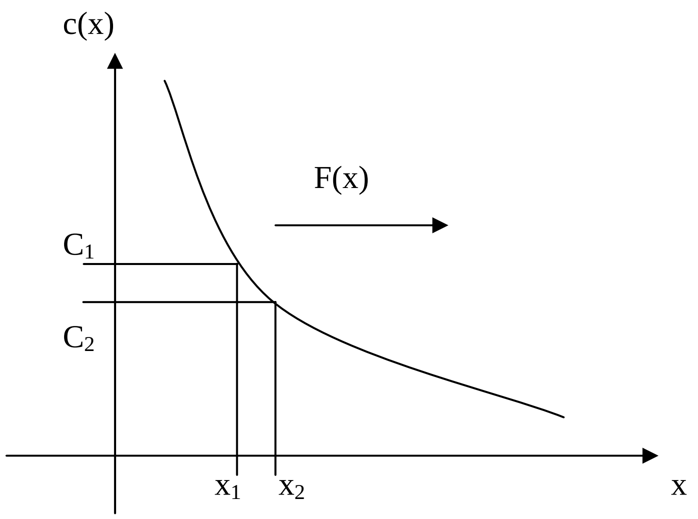
Talka baten ondoren, partikula bakoitzak edozein noranzko hartzeko probabilitate berak ditu. Hori dela-eta, eramaileak oso ugari diren tokietatik, oso urri direnetarantz mugitu edo barreiatzen dira. Gas-ihesak horren adibide izango dira.

Barreiapena, beraz, kontzentrazioaren aldaketa espazialak daudenean gertatzen da. Barreiatzeko ez da beharrezkoa partikulek karga izatea (partikula askeak izatearekin nahiko da).

Partikula horiek karga dutenean, difusioko jarioak korronte elektrikoa dakar.

BARREIAPENEKO KORRONTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENA:

Demagun erdieroale batean eramaile mota orokor baten kontzentrazioa C(x) dela, hau da, posizioaren funtzioa dela.



3.8 Irudia. *X ardatzean aldatzen den eramaile-kontzentrazioa eta barreiapeneko jarioa*

Horrenbestez, eramaile mota horren jarioak puntu batetik alboko puntu batera dagoen kontzentrazio aldearekiko menpekotasun lineala du. Era berean, distantziarekiko menpekotasun inbertsoa du. Jarioa C handiagoa den lekutik C txikiagoa den lekura doa.

Matematikoki:

F = - K x (C2-C1)/(D2-D1).

$F(x) = - K \times [C(x_2)-C(x_1)]/(x_2-x_1)$

$x_2 \sim x_1$ eginez,

$F(x) = - K \times [C(x+dx)-C(x)/(x + dx - x) = -K \times dC(x)/dx = -K \times \nabla C(x)$

$F(x) = -D \times \nabla C(x)$ (**Ficken lehenengo legea)**

D (cm^2/s) difusio edo barreiapeneko koefizientea da

Hala, fluxu-dentsitateak $cm^2/s \cdot partikula/cm^3$ / cm = $partikula/cm^2/s$ unitateak izango ditu.

(Kasu praktiko batean, x puntua gainazal bat da. Laginaren sekzioa A (cm^2) bada, F = partikula / cm^2 /s)

$F(x) = -D \times \nabla C(x)$ bada eta eramaileen karga *k* bada,

$I_{eramaile\_barreiapen} = k_{eramaile} \times (-D_{eramaile} \times \nabla C(x) \times A)$

$\mathbf{J_{n\_barreiapen}} = -q \times (-D_n \times \nabla n(x)) = qD_n\nabla n =$ (normalean) $\mathbf{qD_n dn/dx}$

$\mathbf{J_{p\_barreiapen}} = q \times (-D_p \times \nabla p(x)) = -qD_p\nabla p =$ (normalean) $\mathbf{- qD_p dp/dx}$

Erdieroalean normalean bi eramaile motak izaten ditugunez,

$\mathbf{J_{barreiapen} = J_{n\_barreiapen} + J_{p\_barreiapen} = qD_n\nabla n - qD_p\nabla p = q(D_n\nabla n - D_p\nabla p)}$

3.4 Einsteinen erlazioa

$D_{eramaile}$ eramaile horren barreiapenaren koefizientea da. Mugikortasunarekin gertatzen zen bezalaxe, eramaile motaren, materialaren, tenperaturaren eta ezpurutasun-kontzentrazioaren menpe dago.

Izan ere, bi parametroen arteko erlazio bat dago: **Einsteinen erlazioa,** hain zuzen ere.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} = V_T$$ (non V_T potentzial termikoa baita)

non K ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K edo $8.625 \cdot 10^{-5}$ eV/K), Boltzmannen konstantea baita.

Giro-tenperaturan (25ºC-tan), KT/q = 0.02569 V.

Erlazio horrek argi uzten du atoia eta barreiapena ez direla independenteak. Ikuspuntu sinple batetik, aurrikus genezakeen, zeren, mugikortasuna handiagoa bada, difusio koefizientea handiagoa izango baita.

Tenperatura igotzerakoan, eramaileen eta sarearen mugimendu aleatorioak areagotzen dira. Beraz, barreiatzeko joera (D_m) handiagoa da, baina kanpoko eremu baten pean sarean zehar ibilbide zuzena hartzeko erraztasuna (μ_m) txikixeagoa.

3.5 Guztizko korronteak

Eroapena bi mekanismoez gertatzen denez, guztira:

$J = J_n + J_p = J_{n\_b} + J_{n\_a} + J_{p\_b} + J_{p\_a}$

$J = J_{n\_a} + J_{p\_a} + J_{n\_b} + J_{p\_b} = J_{atoi} + J_{barreiapen}$

$$\mathbf{J = \sigma \times \varepsilon + q(D_n \nabla n - D_p \nabla p) = J_{ohm} + J_{difusio}}$$

non $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q\,(n\mu_n + p\mu_p)$

Hor ikusten dugunez, Ohmen legea ez da beti betetzen erdieroaleetan.

Izan ere, bakarrik $D_n\nabla n = D_p\nabla p$ denean betetzen da: adibidez, uniformeki dopatutako laginetan, oreka termodinamikoko kontzentrazioak ditugunean ($\nabla n = 0$ eta $\nabla p = 0$) .