5. EKUAZIO OROKORRAK

Aurreko lau ikasgaietan, erdieroaleen oinarrizko portaerarekin zerikusia duten fenomeno fisikoak analizatu ditugu eta orekatik kanpo gertatzen diren eramaileen erantzunik garrantzitsuenen ereduak ondorioztatu dira.

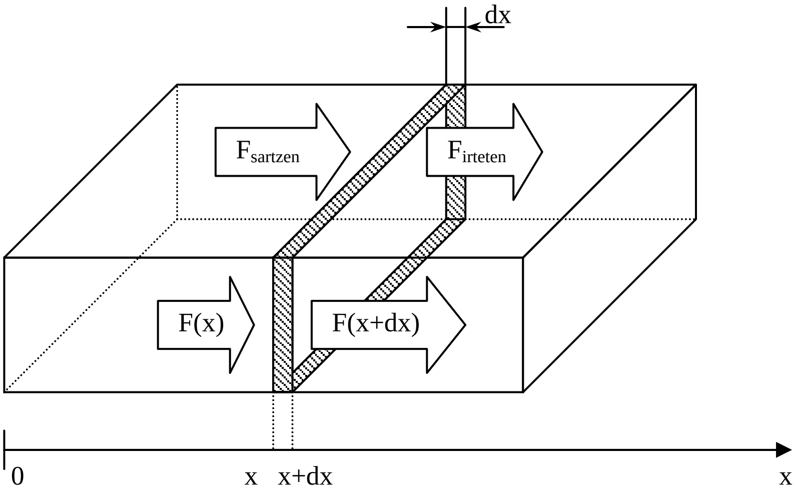
Bakoitza beraren aldetik analizatu badira ere, erantzun horiek guztiak batera gertatzen dira eta elkarren artean eragindako ondoriok kontuan hartu behar dira. Hori dela eta, fenomeno horiek guztiek kontzentrazioetan duten eragina kuantifikatzea izango da gure hurrengo helburua. Emaitza **jarraitutasunaren ekuazioak** izango dira.

Beraz, erdieroalean gertatzen dena goitik behera jakiteko gauza gara. **Egoeraren ekuazioak edo ekuazio orokorrak** dira horretarako balio duen ekuazio multzoa. Ekuazioak ebaztea zaila da, eta metodo numerikoak eta tresna informatikoak behar izaten dira, elkarrekin erlazionatutako ekuazio diferentzialak baitira.

Hala ere, zenbait egitura eta egoera errazetan, ekuazioak analitikoki ebatz daitezke. Izan ere, ikasgai honetan hiru kasu berezi eta oso esanguratsu ebatziko dira. Horien bidez, oinarrizko kontzeptu batzuk aztertzeaz gain, erabili ohi diren tresna matematikoekin lan egiten hasiko gara.

5.1 Jarraitutasunaren ekuazioak

Ebazpena erraztearren, onartuko dugu laginak *y* eta *z* ardatzetan uniformeak direla eta *x* ardatzarekin bakarrik lan egingo dugu bakarrik. Hala, 5.1 Irudiko laginaren [x – x+dx] eskualdean gertatzen dena analizatuko dugu.



5.1 Irudia. *Eramaileen jarraitutasuna aztertzea: lagin orokorra*

Jarraian, bolumeneko diferentzial horretan dauden eramailea zenbatuko ditugu. Partikula orokor baterako, bere kontzentrazioa *k(x,t)* bada:

- Bolumena dV = A·dx da.
- Eramaileen kontzentrazioa, K(x,t) da [K(x,t); K(x+dx,t) ~ K(x,t)].
- Bolumen horretan –zutean- ditugun fluxu dentsitateak F(x,t) (ezkerreko gainazalean) eta F(x+dx,t) (eskuinekoan) dira. Fluxuak eskuinerantz doazenez, F(x,t) bolumenera sartzen den fluxu dentsitatea da; eta F(x+dx,t) fluxu dentsitateak bolumenetik irteten diren eramaileen berri ematen digu.
- G(x,t) kanpoko sorrera da [G(x,t); G(x+dx,t) ~ G(x,t)].
- U(x,t) birkonbinaketa garbia da (R_{th} kenduz) [U(x,t); U(x+dx,t) ~ U(x,t)]
- G_{th}-k eta R_{th}-k elkar konpentsatzen dute.

Denbora joan ahala,

- <u>Fluxuak bolumena zeharkatzean jasaten duen murrizketak kontzentrazioa handitzen du:</u>
    - F(x) eramaile/cm^2/s sartzen dira; eta F(x+dx) irteten dira.
    - Beraz, F(x)-F(x+dx) eramaile/cm^2/s geratzen dira barruan (dx luzeran).
    - Beraz, cm^3 eta segundo bakoitzeko [F(x)-F(x+dx)]/dx = **-dF/dx** eramaile.
- <u>Kanpoko Sorrerak kontzentrazioa handitzen du:</u>
    - G eramaile gehiago ditugu cm^3-ko eta segundo bakoitzeko.
- <u>Birkonbinaketak kontzentrazioa murrizten du:</u>
    - U eramaile gutxiago daude cm^3–ko eta segundo bakoitzeko.

Ondorioz, denboran zehar eramaileen kontzentrazioak duen bilakaera bi eragin nagusien funtzioan honela adieraz daiteke:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)_{sorrera-birkonbinaketa} + \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)_{sarrerakofluxua-irteerakofluxua}$$

Horrek, zuzenean, honako ekuazio hau dakar:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = G - U - \frac{\partial F_k(x,t)}{\partial x}$$

Hiru dimentsioak kontuan hartuz:

$$\frac{dk(x,y,z,t)}{dt} = G(x,y,z,t) - U(x,y,z,t) - \vec{\nabla}\vec{F}_k(x,y,z,t)$$

Eta, beraz, elektroietarako eta hutsuneetarako:

$$\frac{dn}{dt} = G_n - U_n - \frac{dF_n}{dx} = G_n - U_n + \frac{1}{q}\cdot\frac{dJ_n}{dx} = \langle orokorrean \rangle = G_n - U_n + \frac{1}{q}\cdot\frac{\vec{\nabla}\vec{J}_n}{dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{1}{q}\cdot\frac{dJ_p}{dx} = \langle orokorrean \rangle = G_p - U_p - \frac{1}{q}\cdot\frac{\vec{\nabla}\vec{J}_p}{dx}$$

5.2 Egoeraren ekuazioak

Erdieroalezko laginaren ezaugarriak, bost ekuazio behar dira:

Poissonen ekuazioa:

$$\nabla^2 V(x,y,z) = -\frac{\rho(x,y,z)}{\in} \Rightarrow \frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\in} = -\frac{q\cdot\left[p + N_D^+ - n - N_A^-\right]}{\in}$$

non ρ(x) karga dentsitatea baita

Jarraitutasunaren ekuazioak:

$$\frac{dn(x,y,z,t)}{dt} = G_n - U_n - \vec{\nabla}\left(\vec{F}_n(x,y,z,t)\right) \Rightarrow \frac{dn(x,t)}{dt} = G_n - U_n - \frac{dF_n(x,t)}{dx}$$

$$\frac{dp(x,y,z,t)}{dt} = G_p - U_p - \vec{\nabla}\left(\vec{F}_p(x,y,z,t)\right) \Rightarrow \frac{dp(x,t)}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p(x,t)}{dx}$$

Garraioaren ekuazioak:

$$J_n(x,t) = -q\cdot F_n = q\cdot n(x,t)\cdot\mu_n\cdot\varepsilon(x,t) + q\cdot D_n\cdot\frac{dn(x,t)}{dx}$$

$$J_p(x,t) = +q\cdot F_p = q\cdot p(x,t)\cdot\mu_p\cdot\varepsilon(x,t) - q\cdot D_p\cdot\frac{dp(x,t)}{dx}$$

Bost ekuazioak ez-linealak eta diferentzialak dira eta elkarrekin daude erlazionaturik (akoplaturik daude).

Ebazpenak, oro har, memoria handiko ordenadorea, denbora luzea eta programa konplexuak behar ditu.

Hala ere, errazak eta fisikoki mamitsuak diren kasu batzuk ebatziko ditugu.

5.3 Eramaileen denborarekiko aldaketa: erdibizitza

Badugu ezpurutasun emaileez uniformeki dopatutako erdieroalezko lagin bat. t = 0 unean, bolumen osoa argiztatzen dugu uniformeki, segundo eta cm^3 bakoitzeko G_L eramaile pare sortzen dituen erradiazioa erabiliz (betiere injekzio baxuan).

Analizatu eramaile-kontzentrazioaren denborarekiko bilakaera (geldikortasunera arte):

Hasi baino lehen:

a) Lagina uniformeki dopatuta dagoenez eta argiztapena uniformea denez, espazioan ez da aldaketarik espero:

p(x,t) = p(t); n(x,t) = n(t)

b) Injekzio baxuan gaudenez,

p'(t) → n(x,t) = n_0 + p'(t) ~ N_D; eta p(x,t) = p_0 + p'(t) = ?

Ariketa urrienez ebatziko dugu.

c) Gainera p'(t) = p(t) - p_0 = p(t) -n_i^2/N_D → dp'(t) = dp(t) (dp_0 = 0 baita).

Beraz, hutsuneen jarraitutasunaren ekuaziotik abiatuz:

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - 0$$ (dena uniformea denez, $F_p(x) = F_p = 0$)

$$\frac{dp'(t)}{dt} = G_L - \frac{p'(t)}{\tau_p}$$ (injekzio baxuan gaude eta dp = dp' da)

Ekuazio diferentziala ebatziz:

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p + K \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$ non K konstante ezezagun ba baita.

Badakigu p'(t = 0^-) = 0. Eta, argia piztu berria denean, ere p'(t = 0^+) = p'(t = 0^-) = 0.

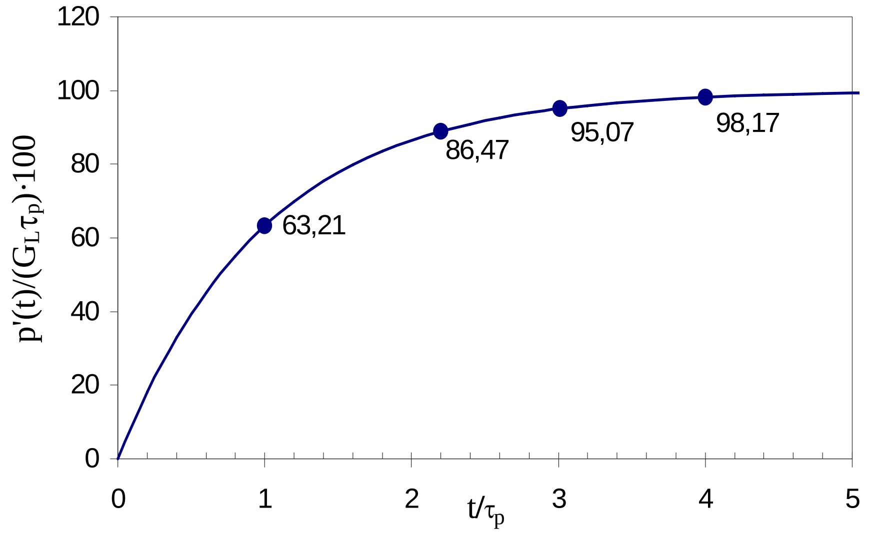
Beraz, $p'(0^+) = G_L \cdot \tau_p + K \cdot \exp(0) = 0 \Rightarrow K = -G_L \cdot \tau_p$

eta $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right]$

p(t) = p_0 + p'(t) = n_i^2/N_d + p'(t)

n(t) = n_0 + n'(t) = N_D + p'(t) ~ N_D

Denbora luzearen ondoren → p'(t luzea) = $G_L \cdot \tau_p$ ($cm^{-3}/s \cdot s = cm^{-3}$)



5.2 Irudia. *Soberakin normalduaren ($p'(t)/G_L\tau_p$) denborarekiko bilakaera argia piztean*

Formulan ikusten denez, ez digu t denborak axola, t/τ_p zatidurak baizik.

$t/\tau_p = 1$ denean --> $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.632$

$t/\tau_p = 2$ denean --> $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.865$

Sorrera, birkonbinaketa eta hazkundearen analisia:

Sorrera: G_L **Konstantea**

Birkonbinaketa: $U = \frac{p'(t)}{\tau_p} = G_L \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right]$ **Gero eta handiagoa**

Eta hazkundearen abiadura: $\frac{dp(t)}{dt} = G_L \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$ **Gero eta txikiagoa**

Erdibizitzak adierazten du sistemak egoera geldikorrera iristeko (hurbiltzeko) behar duen denbora.

[Oharra: amaieran, egoera egonkorrera iristean ez dago denborarekiko menpekotasunik. Beraz, tarte horretan dagoen soberakina ebazteko, jarraitutasunaren ekuazioa erraztuz:

$$\frac{dp'(t)}{dt} = G_L - \frac{p'(t)}{\tau_p} = 0 \Rightarrow p'(t) = G_L \cdot \tau_p \text{]}$$

Lagin horretan, t = t_{itzali} unean, behin egoera geldikorrera iritsi eta gero ($t_{itzali} >> \tau_p$), unean argia itzaltzen dugu. Analizatu eramaileen kontzentrazioaren denborarekiko bilakaera (geldikortasuna lortu arte) (Beti injekzio baxuan).

Lehen bezala, hutsuneen soberakinari begira:

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = 0 - U_p - 0$$ (dena uniformea da -F(x) = F = 0- eta ez dago sorrerarik)

$$\frac{dp'(t)}{dt} = -\frac{p'(t)}{\tau_p}$$ (injekzio baxuan gaudenez eta dp = dp’ denez)

Ekuazio diferentziala ebatziz:

$$p'(t) = K \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$ non K konstante ezezagun bat baita.

Badakigu p'(t_{itzali}^{-}) = $G_L \cdot \tau_p$. Eta, argia itzali berria denean ere, p'(t_{itzali}^{+}) = p'(t_{itzali}^{-}).

$$p'(t_{itzaili}^{+}) = K \cdot \exp\left(-\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right) = G_L \cdot \tau_p \Rightarrow K == G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right)$$

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-\frac{t'}{\tau_p}\right)$$ non t’ = t - t_{itzali}

Sorrera: beti hutsa da.

Birkonbinaketa: $U = \dfrac{p'(t)}{\tau_p} = G_L \cdot \exp\left(-\dfrac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right)$

Hazkundearen abiadura: $\dfrac{dp'(t)}{dt} = -\dfrac{G_L}{\tau_p} \cdot \exp\left(-\dfrac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right)$ (beraz, murrizten dira)

t = t_{itzali}: p' = G_L·tau_p

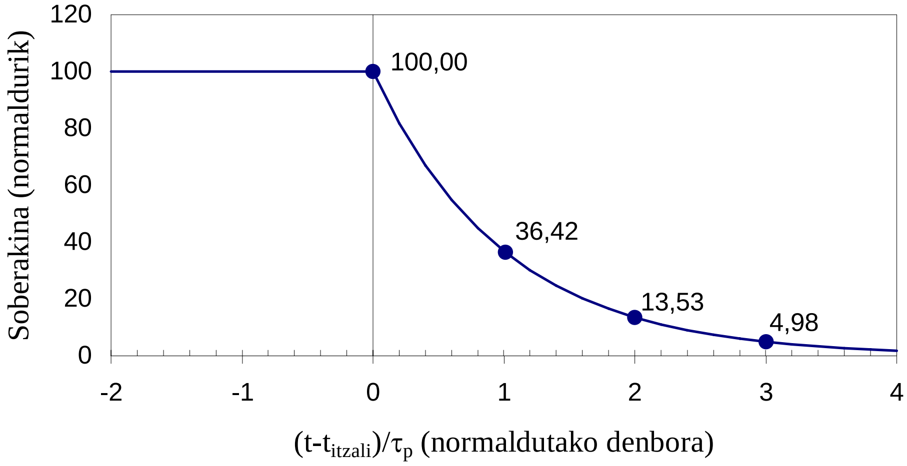
t = t_{itzali}+ taup: p' = G_L·tau_p·0.368

t = t_{itzali}+ 2tau_p: p' = G_L·tau_p·0.135

Berriro, (t-t_{itzali})/τ_p da denborarekiko aldaketaren abiaduraren adierazlea.

Izan ere, eramaileen batez besteko biziraupena τ_p da, estatistikoki frogatzen denez:

$$t_{bbbiziraupena} = \frac{\int_{t_{itzali}}^{\infty} p'(t) \cdot dt}{p'(t_{itzali})} = \tau_p$$



5.3 Irudia. *Denborarekiko bilakaera argia itzaltzean*

5.4 Eramaileen posizioarekiko aldaketa: barreiapeneko luzera

Badugu uniformeki dopatutako n motako erdieroalezko lagin bat. Haren mutur batean (x=0 gainazalean,) eramaile soberakin bat mantentzen da (kanpoko eramaile jario batez edo sorrera batez) erregimen geldikorrean. Beste gainazala oso urruntzat jotzen da. Injekzio baxuan gaudela onartuta, analizatu laginean zehar dauden eramaileen profilak.

Datuak: p'(0) eta τ_p.

Hasi baino lehen:

Gainazalean soberakin bat agertzen bada, bolumen osora zabaltzen —barreiatzen— saiatuko da, baina, gainazaletik urrundu ahala, eta birkonbinaketaren ondorioz, soberakina murriztuz joango da (batez beste, hutsuneek τ_p denboraz bizirauten dute). Hori dela-eta, beste ertzean ez da p'(0) soberakinaren efektua nabarituko, eta p'(x >> 0) = 0. Beraz, eramaileen profila ez da uniformea izango. Gainera, egoera geldikorrean gaudenez, denboran zehar ez da aldaketarik agertuko.

Urrienen soberakinaz ebatziko ditugu kontzentrazioak:

$p(x,t) = p_0 + p'(x,t) = p_0 + p'(x)$; $\qquad n(x,t) = N_d + n'(x,t) = N_d + p'(x) \sim N_d$

eta p'(0) = datua $\qquad$ eta dp = dp'

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$F_p(x) = F_{ap} + F_{bp} \approx F_{bp} = -D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} = -D_p \cdot \frac{dp'(x)}{dx}$$

Froga daitekeenez, dopaturiko erdieroale homogeneoetan, urrienen atoiko fluxua aintzat ez hartzeko modukoa izaten da*. Beraz, $F_m = F_{bp} + F_{ap} \sim F_{bp}$.

[*Dopaturiko erdieroale homogeneo batean $\varepsilon(x) \sim 0$, zeren, bestela, σ_M oso altua denez, ugarienen atoiko korronte-dentsitatea oso oso altua bailitzateke $J_{aM}(x) = \sigma_M \cdot \varepsilon(x)$. Beraz, urrienen korronte-dentsitatea $J_{am} = \sigma_m \cdot \varepsilon(x) = (\sigma_m/\sigma_M) \cdot \sigma_M \cdot \varepsilon(x) = (\sigma_m/\sigma_M) \cdot J_{aM}$ oso baxua izango da: $J_m \sim J_{bm}$]

Injekzio baxuan gaudenez eta denborarekiko menpekotasunik ez dagoenez:

$$0 = 0 - \frac{p'(x)}{\tau_p} - \frac{d\left(-D_p \cdot \frac{dp'(x)}{dx}\right)}{dx} \Rightarrow p'(x) = D_p \cdot \tau_p \cdot \frac{d^2 p'(x)}{dx^2}$$

$$p'(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{x}{L_p}\right)$$

non $L_p(cm) = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$ barreiapeneko luzera baita

Bi (inguru) baldintza bete behar dira:

p'(x >> 0) finitua izango da

$$p'(\infty) = A \cdot \exp(-\infty) + B \cdot \exp(\infty) = A \cdot 0 + B \cdot \infty \neq \infty$$ eta ,beraz, B = 0

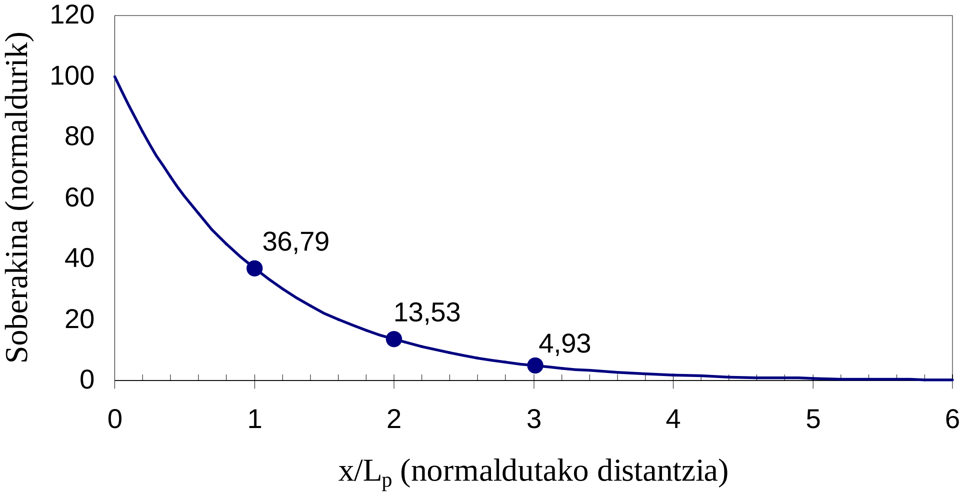
eta p'(0) datua da.

$$p'(0) = A \cdot \exp(0) + B \cdot \exp(0) = A + B = \langle B = 0 \text{ denez} \rangle = A \Rightarrow A = p'(0)$$

Beraz, $p'(x) = p'(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$ eta, horrenbestez, x-k baino, x/L_p erlazioak agintzen du

x = 0:	p'(0)
x = L_p:	p'(0)·0.368
x = 2·L_p:	p'(0)·0.135
x = 3·L_p:	p'(0)·0.049

Beraz, L_p parametroak adierazten du, nolabait, eramaileen soberakina noraino barreiatzen den. Hori dela-eta, L_p-ri hutsuneen barreiapeneko luzera deitzen diogu.



5.4 Irudia. *Soberakin normalduaren espazioarekiko aldaketa*

5.5 Gainazaleko birkonbinaketa

Uniformeki dopatutako p motako erdieroalezko lagin bat dugu eta uniformeki argiztatzen dugu bolumen osoan (cm^3 eta segundoko G_L pare sortzen dira). Haren aurpegi batean (x=0 gainazalean), birkonbinaketa-abiadura S cm/s da. Erregimen geldikorrean eta injekzio baxuan gaude. Beste gainazala oso urruntzat hartzen da. Analizatu laginean zehar dagoen eramaileen profila.

$$\frac{dn}{dt} = G - U - \frac{dF_n}{dx}$$

non $F_n(x) = F_{an} + F_{bn} \approx F_{bn} = -D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} = -D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx}$

$$0 = G_L - \frac{n'(x)}{\tau_n} - \frac{d\left(-D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx}\right)}{dx} = G_L - \frac{n'(x)}{\tau_n} + D_n \cdot \frac{d^2 n'(x)}{dx^2}$$

$$n'(x) = G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + K_2 \cdot \exp\left(\frac{x}{L_n}\right)$$

Baina $n'(\infty) = G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp(-\infty) + K_2 \cdot \exp(\infty) \neq \infty \Rightarrow K_2 = 0$

Eta, dakigunez, $F_{\text{ezkerrerantz}}(0^+) = -F(0^+) = U_S = \langle IB \rangle = S \cdot n'(0)$

$$F_n(x) = -D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx} = -D_n \cdot K_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \cdot \left(-\frac{1}{L_n}\right) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

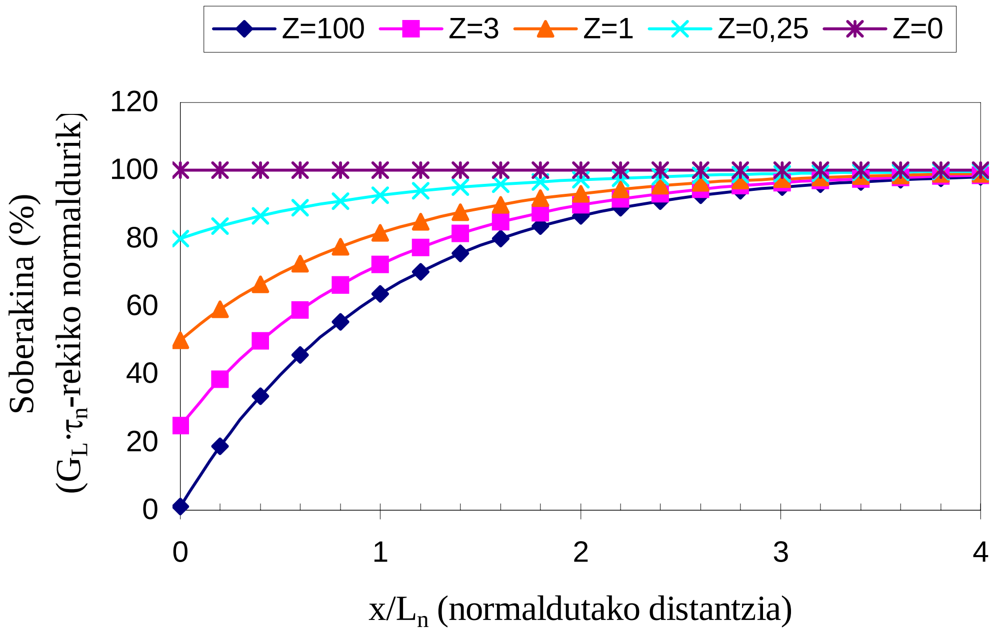
$$F_n(0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot \exp(-0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \Rightarrow -F_n(0) = -K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} = U_S$$

$$-F_n(0) = S \cdot n'(0) \Rightarrow -K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} = S \cdot [G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp(0)] = S \cdot (G_L \cdot \tau_n + K_1)$$

$$K_1 = -\frac{S \cdot G_L \cdot \tau_n}{S + \frac{D_n}{L_n}} = -\frac{G_L \cdot \tau_n}{1 + \frac{D_n}{SL_n}} = -\frac{G_L \cdot \tau_n}{1 + Z^{-1}} = -\frac{Z \cdot G_L \cdot \tau_n}{Z + 1}$$ non $Z = L_n \cdot S/D_n$ baita

eta, beraz, $n'(x) = G_L \cdot \tau_n \cdot \left[1 - \frac{Z}{Z+1} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)\right]$

5.5 Irudian Z erabili da Soberakinaren S-rekiko menpekotasuna analizatzeko.



5.5 Irudia. *Espazioarekiko aldaketa S batzuentzat ($Z = L_n \cdot S/D_n$)*

$$S >> D_n \cdot L_n;\ Z >> 1 \Rightarrow n'(x) = G_L \cdot \tau_n \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)\right]$$ (beraz, $n'(0) = 0\ cm^{-3}$)

$$S << D_n \cdot L_n;\ Z \approx 0 \Rightarrow n'(x) = G_L \cdot \tau_n$$

Muturreko bi kasu daude:

- S = ∞ cm/s denean, gainazalari *ohmikoa* deitzen zaio eta n'(0) = 0 behartzen du, birkonbinaketa finitua baita:

  $S \cdot n'(0) = U_S = \textit{finitua} \Rightarrow \infty \cdot n'(0) = \textit{finitua} \Rightarrow n'(0) = 0\ cm^{-3}$

  Erdieroale-metalen kontaktuak mota horretakoak izatea bilatuko dugu.
- S = 0 cm/s denean, gainazala *pasibaturik* dago, eta, bertako birkonbinaketa nulua denez, ez dago jariorik: $S \cdot n'(0) = 0 = U_S = -F(0)\ cm^{-2}/s$. Kasu horretan ematen du materiala ez dela amaitzen (hemen ere, uniformea eta infinitua zenean lortzen zen profila agertzen da $n'(x) = G_l \cdot \tau_n$).

Eranskina: ebatzi beharko ditugun ekuazio diferentzialak (injekzio baxuan)

A) Egoera iragankorrean, fluxuak konstanteak (edo nuluak) badira:

$$\frac{dm'(t)}{dt} = G_{kanpo} - \frac{m'(t)}{\tau_m} \Rightarrow$$

$$m'(t) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right)$$

Non A (integratzerakoan agerturiko konstantea) mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baita.

B) Egoera geldikorrean, sorrera, birkonbinaketa eta fluxu aldakorrak baditugu:

$$0 = G_{kanpo} - \frac{m'}{\tau_m} + D_m \cdot \frac{d^2 m'(x)}{dx^2} \Rightarrow$$

$$m'(x) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + A \cdot \exp\left(\frac{x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) \text{ edo}$$

$$m'(x) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + C \cdot Sh\left(\frac{x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) + D \cdot Ch\left(\frac{-x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right)$$

Non A eta B (edo C eta D) mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baitira.

(Integrazio prozesutik sortu diren sasi-konstanteak dira)

C) Egoera geldikorrean, birkonbinaketa nulua bada:

$$0 = G_{kanpo} + D_m \cdot \frac{d^2 m'(x)}{dx^2} \Rightarrow$$

$$0 = -\frac{G_{kanpo}}{D_m} \frac{x^2}{2} + Ax + B$$

Non A eta B mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baitira.