

# ALACSONY HŐMÉRSÉKLETŰ PLAZMAFIZIKA

2016

Dr. Donkó Zoltán / Dr. Derzsi Aranka

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet  
Komplex Folyadékok Osztály

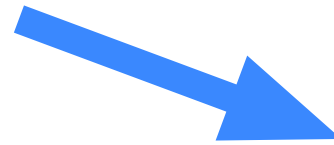
MTA Csillebérc / KFKI  
donko.zoltan@wigner.mta.hu  
zoltan.donko@gmail.com

(5)

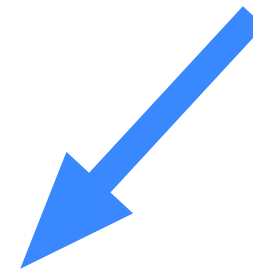
# Tartalom

- Gázok átütése
- Önfenntartó gázkisülések
- Egyenfeszültségű gázkisülések önkonzisztens numerikus leírása
  - Folyadékmodellek
  - Hibrid modellek
  - Nehéz részecskék szerepe alacsony nyomású gázkisülésekben

Plazmafizikai alapok



Gázkisülések leírása  
(egyenáramú, tranziens,  
rádiófrekvenciás)



- Egyenfeszültségű gázkisülések
  - A gáz átütése
  - Működési üzemmódok, önfenntartási folyamatok
  - Térrészek

# Townsend $\alpha$ ionizációs együttható

## Töltött részecskék keletkezése a gáztérben

Townsend alapján:

▶ A  $\lambda$  szabad úthossz alatt felvett energia:  $\Delta\varepsilon = Ee\lambda$

▶ Ionizáció feltétele:  $Ee\lambda > eV_i$  ( $V_i$ : ionizációs potenciál)

▶ Az ionizáció valószínűsége:  $P\left(\lambda > \lambda_i = \frac{V_i}{E}\right) = \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\lambda}\right) = \exp\left(-\frac{V_i}{\lambda E}\right)$

ugyanis  $P_0(x) = \exp(-x/\lambda)$  (ütközés nélkül megtett út)

▶ Az ionizációs együttható definíciója: az egységnyi hosszban keltett elektron-ion párok száma

▶ Az ionizációk száma hosszegység alatt = ütközések száma hosszegység alatt  $\times$  ionizáció valószínűsége:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{V_i}{\lambda E}\right)$$

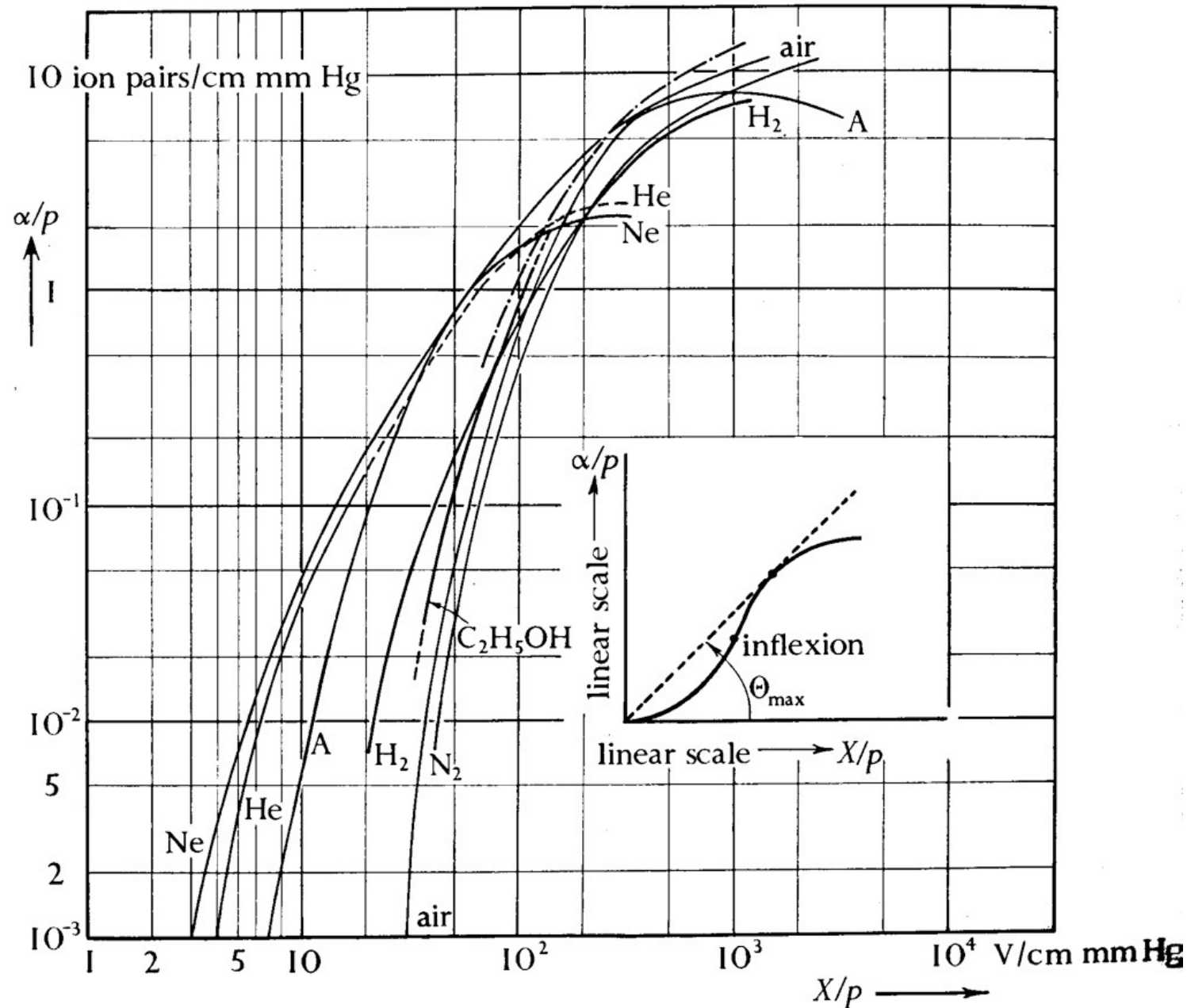
$1/\lambda = Ap$      $B = V_i/p\lambda$   
(ahol A és B az adott gázra jellemző állandók)



$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right)$$

Ez egy egyszerű modell az ionizációs együtthatóra - pontosan pl. szimulációval számítható ki

# Townsend $\alpha$ ionizációs együttható



$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right)$$

Az egyszerű megfontolások alapján származtatott formula jó közelítést biztosít számos gáz esetére

A. von Engel, "Ionized gases" (Oxford University Press, 1965)

# A gáz átütése

## A gáz átütésének feltétele a töltéshordozók reprodukciója a gázban és a felületeken

- ▶ Gázban jelenlévő homogén elektromos térben az elektronok számának növekedése:

$$\Gamma_e(x) = \Gamma_e(0) \exp(\alpha x)$$

- ▶ Az elektronok száma az anódnál:

$$\Gamma_e(L) = \Gamma_e(0) \exp(\alpha L)$$

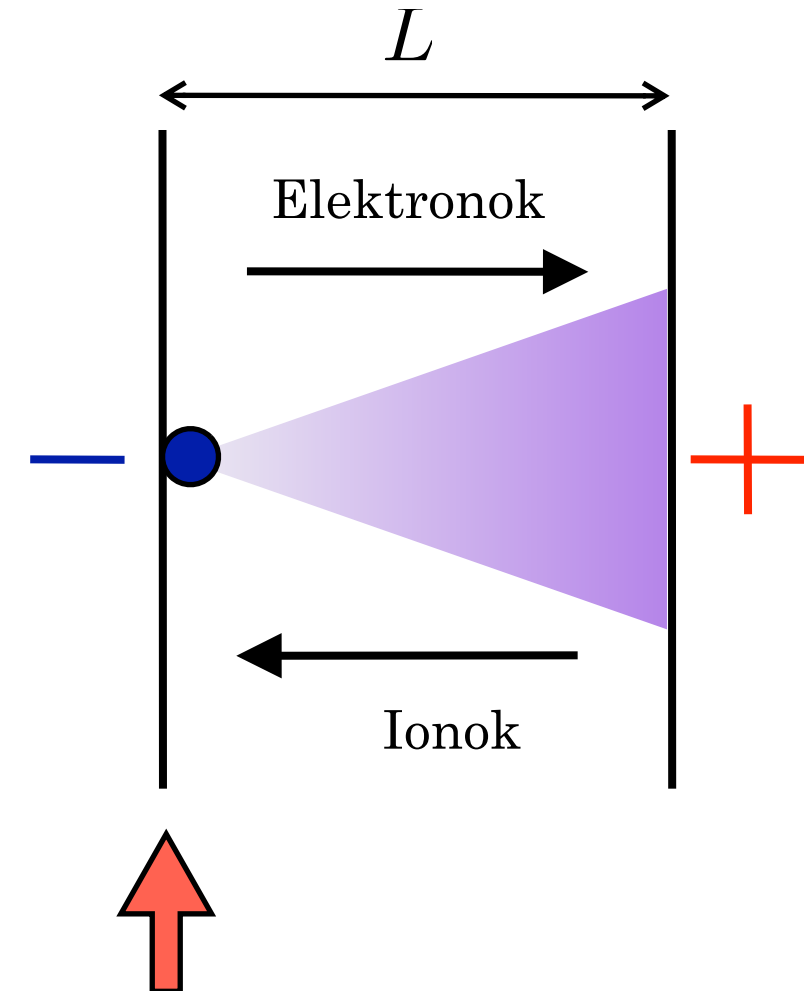
- ▶ A keltett ionok fluxusa a katódnál:

$$\Gamma_i(0) = -\Gamma_e(0) [\exp(\alpha L) - 1]$$

- ▶ Az átütés / önfenntartás feltétele:

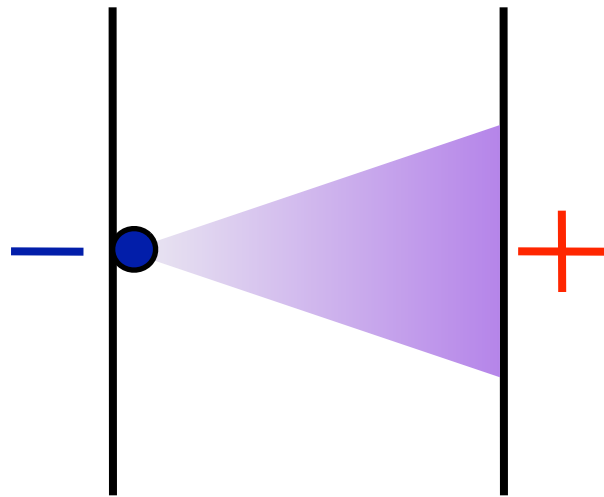
$$\alpha L = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

ugyanis  $\Gamma_e(0) = -\gamma \Gamma_i(0)$



Elektronkiváltási  
együttható  
 $\gamma$

# A gáz átütése



Az ionizációs együttható függése a feszültségtől és a nyomástól:

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right)$$

Townsend-féle átütési feltétel:

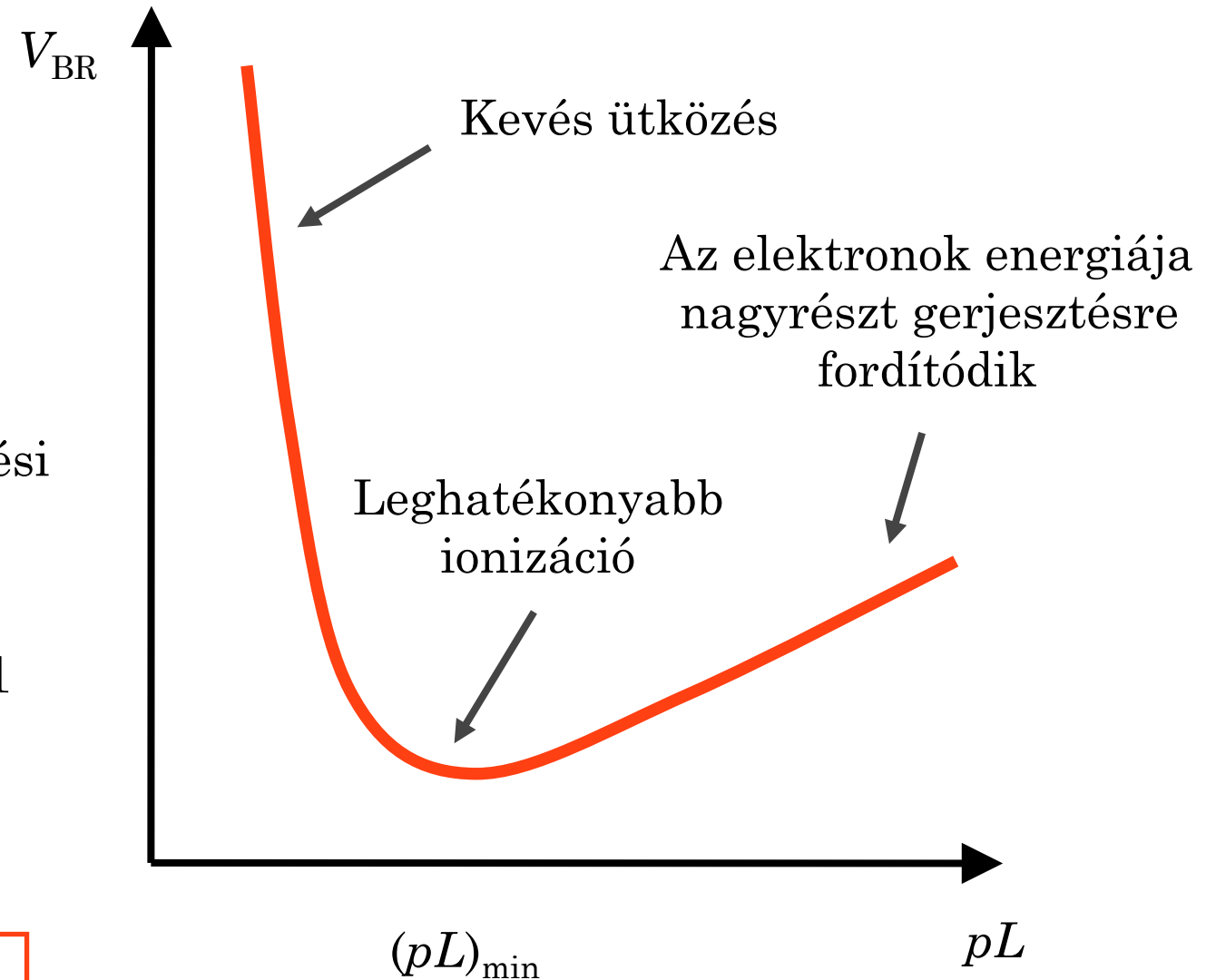
$$\gamma[\exp(\alpha L) - 1] = 1$$



$$\alpha L = A(pL) \exp\left[-\frac{B}{V/(pL)}\right] = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

**PASCHEN törvény:  $V$  csak  $pL$  függvénye**

## *Paschen görbe*



*Feltételezések:*

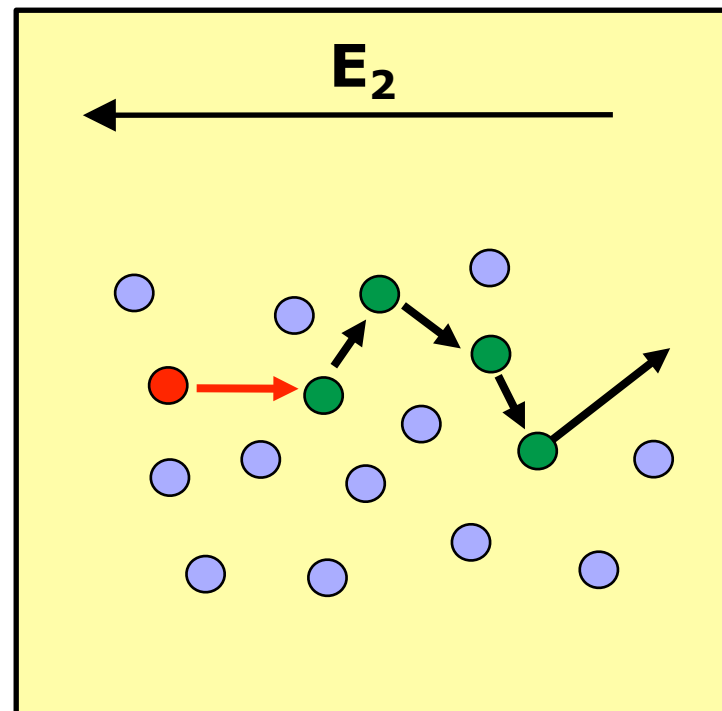
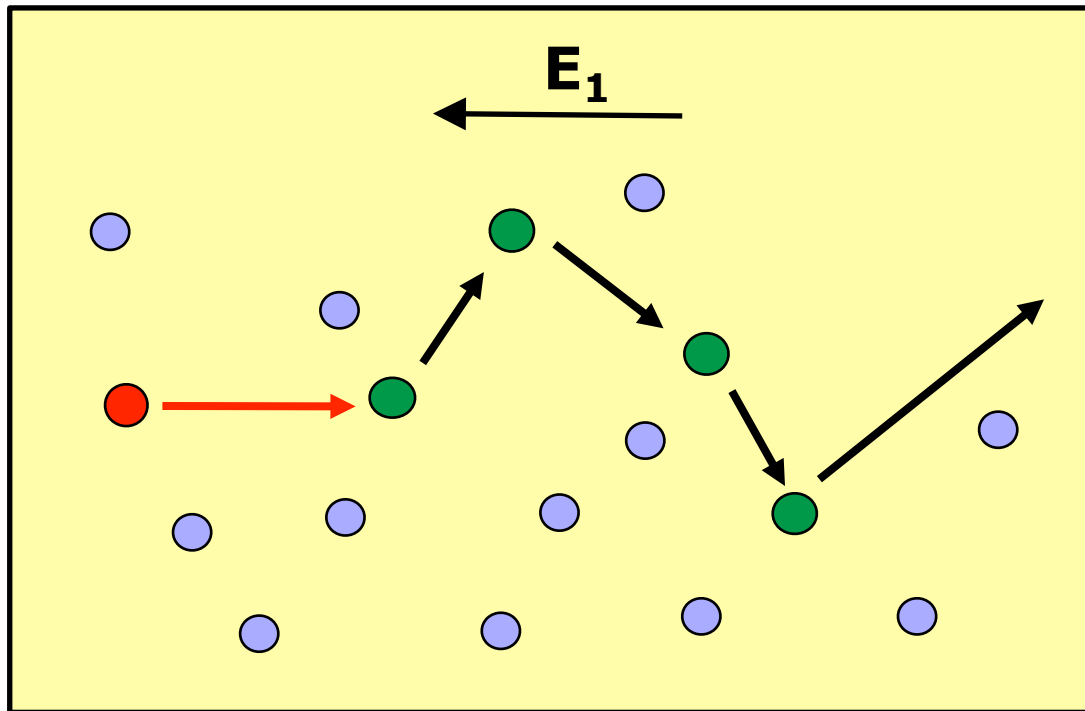
- homogén elektromos tér
- egyensúlyi transzport

# Egy fontos hasonlósági tétel

ISMÉTLÉS

▶ Energianyereség két ütközés között:  $\Delta\varepsilon = \lambda E q = \frac{1}{n\sigma} E q = \left(\frac{E}{n}\right) \frac{1}{\sigma} q$

▶ Hossz skálázás:  $\lambda_1 = \frac{1}{n_1\sigma}$   $\lambda_2 = \frac{1}{n_2\sigma} \implies n\lambda = \text{const.}$



Ha  $\frac{E_1}{n_1} = \frac{E_2}{n_2}$ , akkor  
a mozgás **HASONLÓ**

$E/n$  egysége :  
 1 Td =  $10^{-17}$  V cm<sup>2</sup>  
 1 Td :  $E/p = 0.32$  V /  
 (cm Torr) @ 300 K

**Ha  $n_1 L_1 = n_2 L_2$ , akkor ugyanannyi ütközés játszódik le a két különböző méretű térrészben**

**Megj. : gyakran  $p_1 L_1 = p_2 L_2$  alakban adják meg, de ez csak ugyanakkora hőmérséklet mellett igaz.**

$$p = nk_B T \quad (T = \text{const.})$$

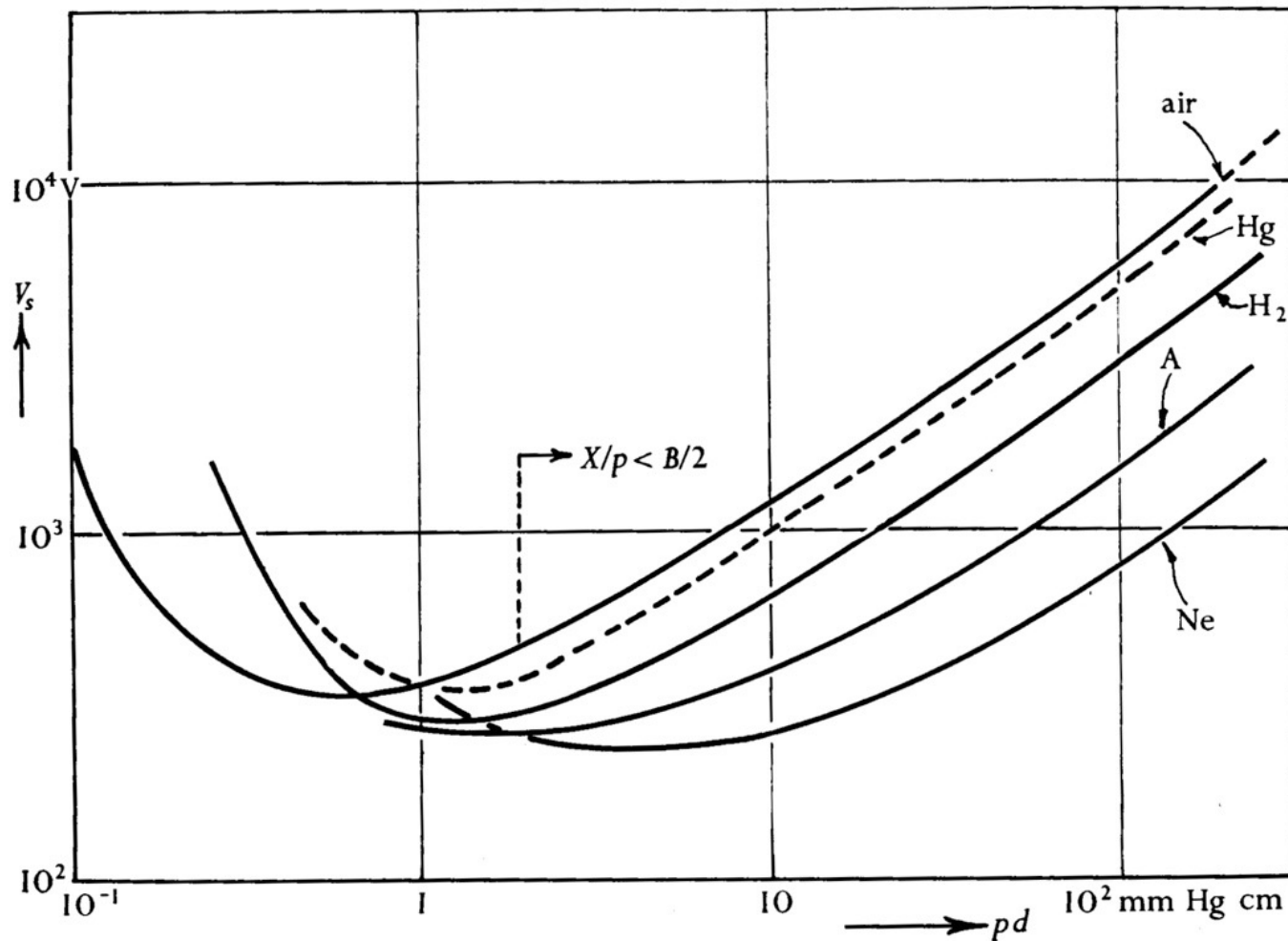
**Paschen- görbe:**  $V_1 = V_2 \rightarrow E_1 L_1 = E_2 L_2$

$$n_1 L_1 = n_2 L_2 \rightarrow \frac{E_2}{n_2} = \frac{E_1}{n_1} \quad \text{a mozgás HASONLÓ}$$



# A gáz átütése

## ÁTÜTÉS

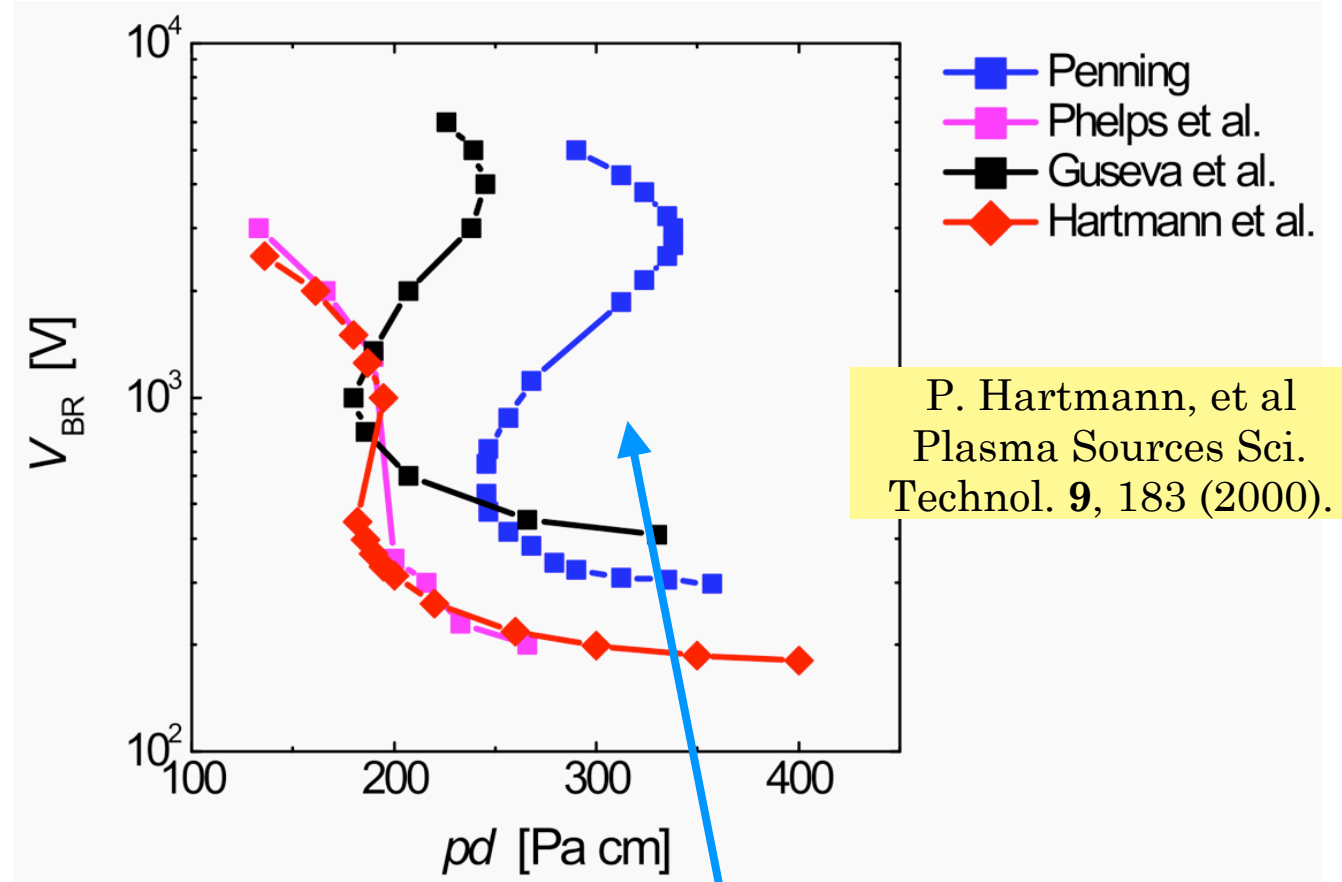
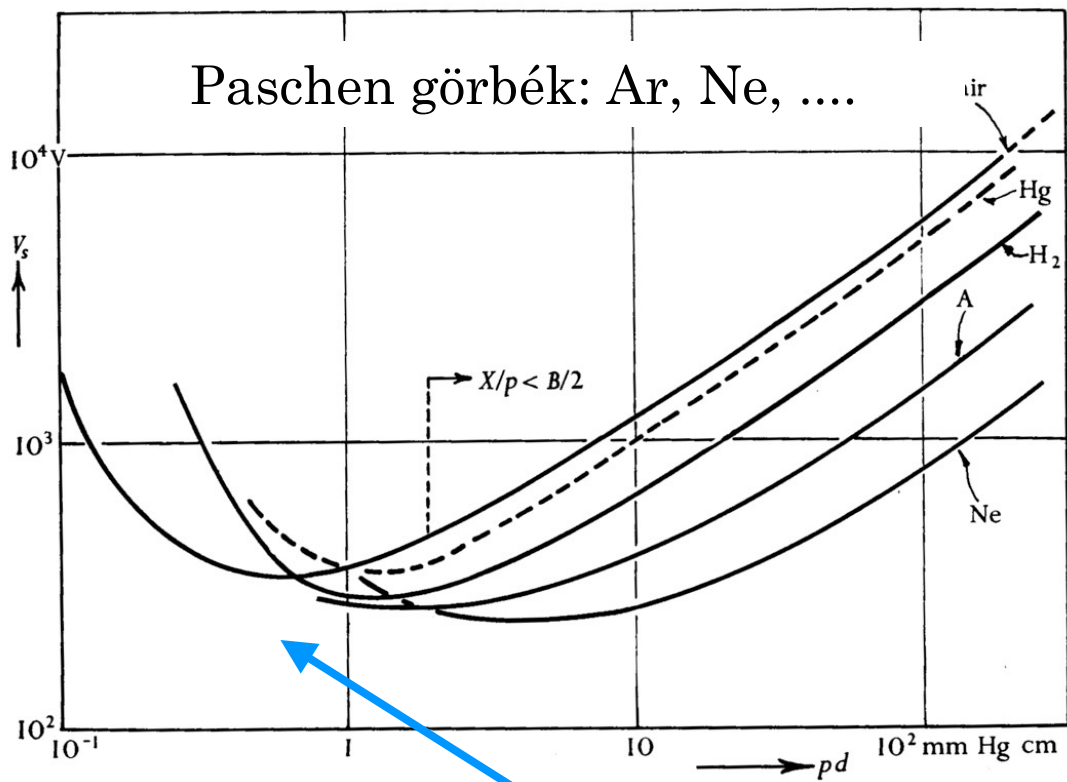


A. von Engel, Ionized gases (Oxford Univ. Press)

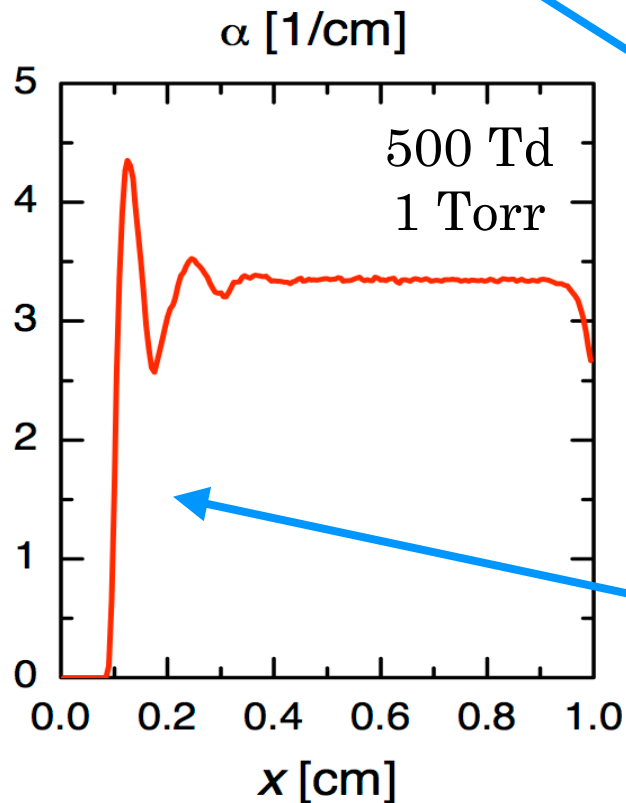
- ▶ minimum átütési feszültség: néhány 100 V
- ▶  $pd$ , ahol a minimum van  $\approx$  Torr cm

- ▶ Hogy kezdődik?
- ▶ A feszültség magában nem elég
- ▶ Kell egy “trigger” (UV foton, radioaktív bomlásból, vagy kozmikus sugárzásból származó részecske)
- ▶ Hogyan észleljük?
- ▶ Áram exponenciális növekedése
- ▶ Fénykibocsátás
- ▶ Hogyan mérjük?
- ▶ Feszültség / nyomás lassú növelése
- ▶ Állandósult állapotú kisülés feszültsége nulla áram limitben (Phelps & Petrovic)

# A gáz átütése: a Paschen törvény korlátai



P. Hartmann, et al  
Plasma Sources Sci.  
Technol. **9**, 183 (2000).



A Paschen görbe bal oldalán a transzport erősen nemegyensúlyi → kinetikus leírás

Relaxációs hossz ! → kinetikus leírás  

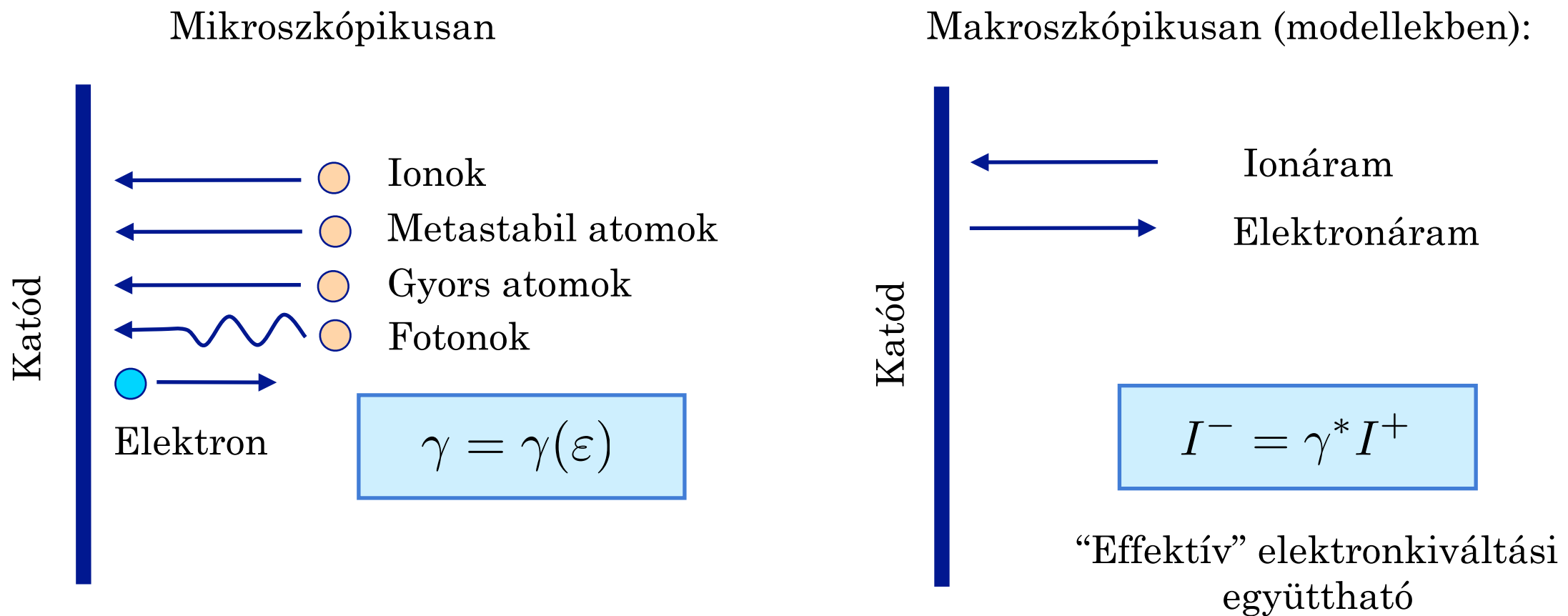
$$\exp(\alpha L) \neq \exp\left(\int_0^L \alpha(x) dx\right)$$

“S” alakú Paschen görbe bizonyos gázokban → “egzotikusabb” folyamatok

Mikrokisülések esetén a katódnál téremisszió

Elektronok reabszorpciója a katódon

# A katódi elektronkiváltási együttható



*Mechanizmusok gázkisülésekben:*

- Potenciális
- Kinetikus
- Fotoemisszió
- Téremisszió

*Hatásfokot befolyásolják:*

- Szennyeződések
- Gáz, ill. oxidréteg a felületen
- A katód “története”

**Melyik mechanizmus domináns?  
Vannak  $\gamma(\varepsilon)$  adatok ?**

A. V. Phelps & Z. Lj. Petrovic, *Plasma Sources Sci. Technol.* 8, R1-R24 (1999)

→ Argon

Springer Tracts in Modern Physics Vol. 123

# A katódi elektronkiváltási együttható

Plasma Sources Sci. Technol. 8 (1999) R21–R44. Printed in the UK

PII: S0963-0252(99)02255-0

## REVIEW ARTICLE

# Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons

A V Phelps<sup>†</sup> and Z Lj Petrović<sup>†‡</sup>

<sup>†</sup> JILA, University of Colorado and National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80309-0440, USA

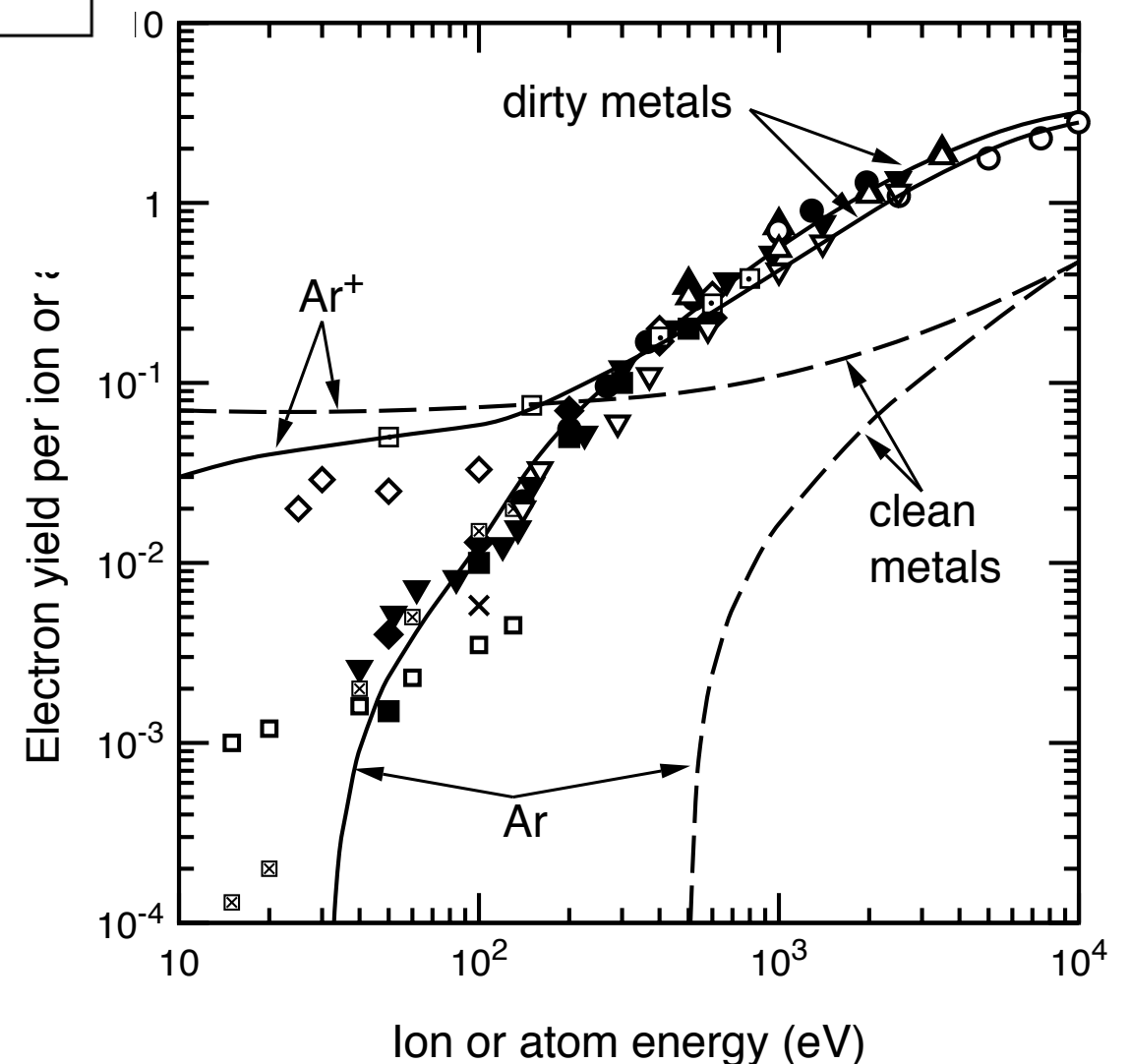
<sup>‡</sup> Institute of Physics, PO Box 57, Belgrade, Yugoslavia

## Terminológia:

- ▶ “Tiszta” felület: nagyvákuum, felületfizika
- ▶ “Laboratóriumi” / “Piszkos” felület: gázkisülésfizikai kísérletek mellett tipikus állapot

Katódi elektronemisszió  
homogén elektromos tér mellett

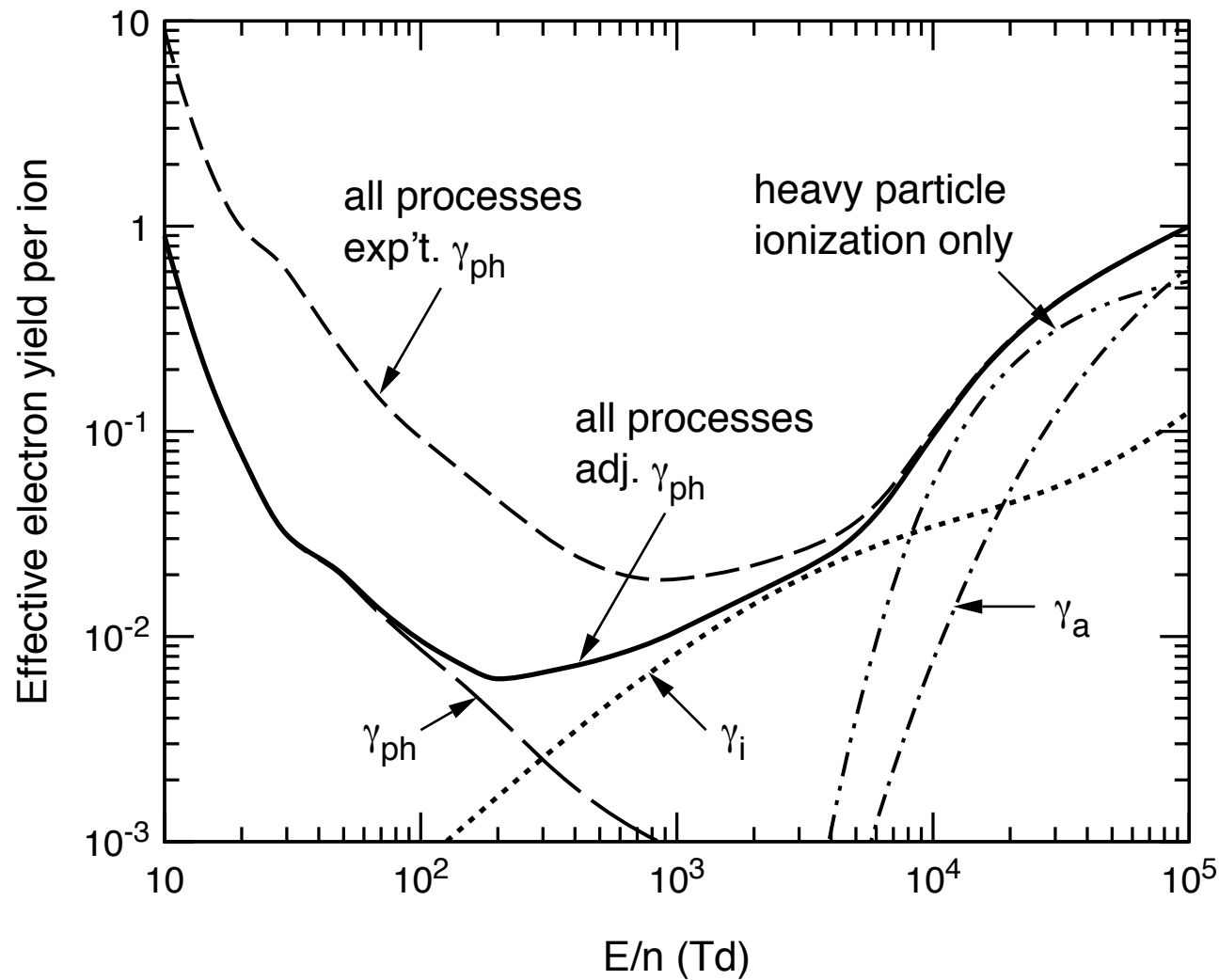
“Tiszta” / “piszkos” felület



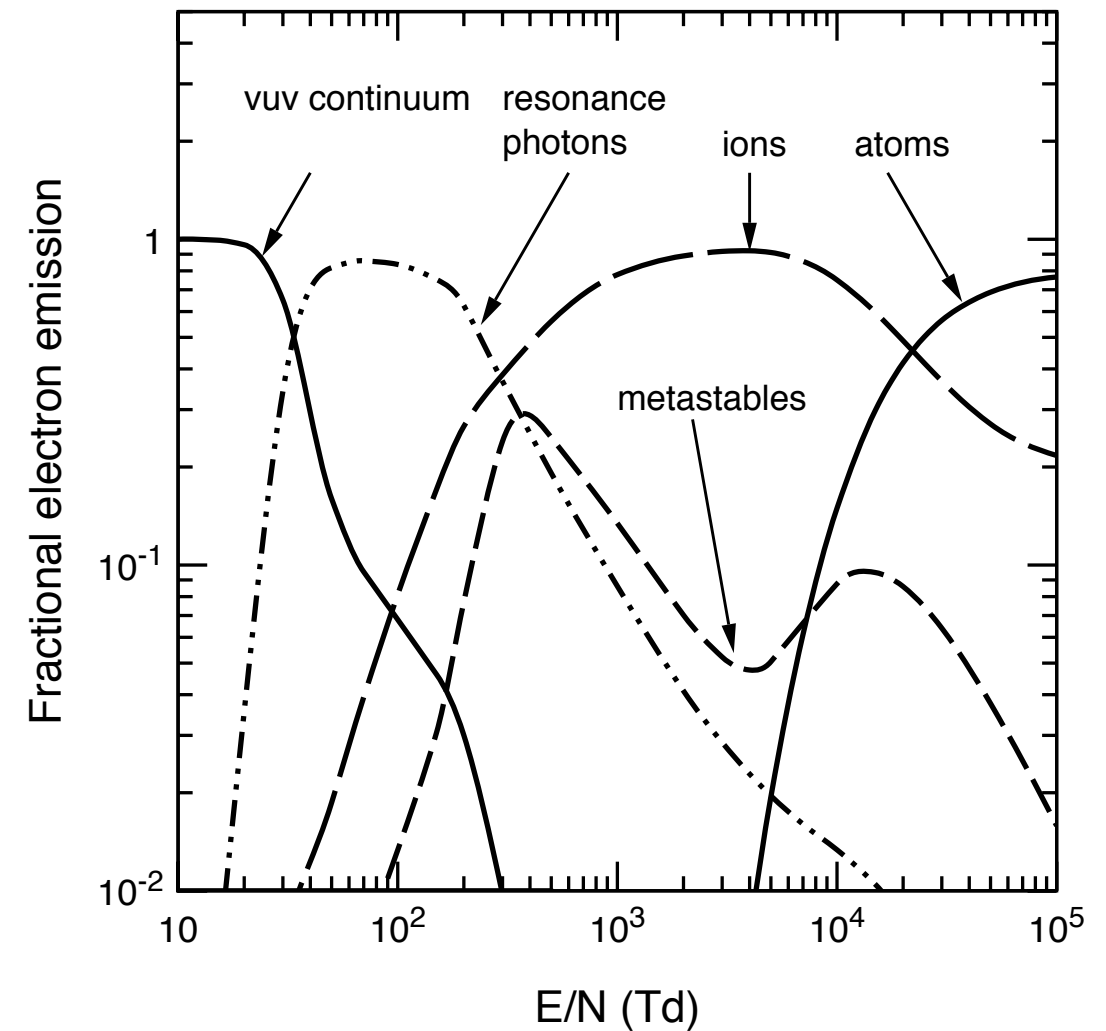
# A katódi elektronkiváltási együttható

Katódi elektronemisszió homogén elektromos tér mellett

## Effektív elektronkiváltási együttható $E/n$ függvényében



## Az egyes részecskék hozzájárulása az elektronok kibocsátásához



A. V. Phelps & Z. Lj. Petrovic, PSST 8, R1-R24 (1999)

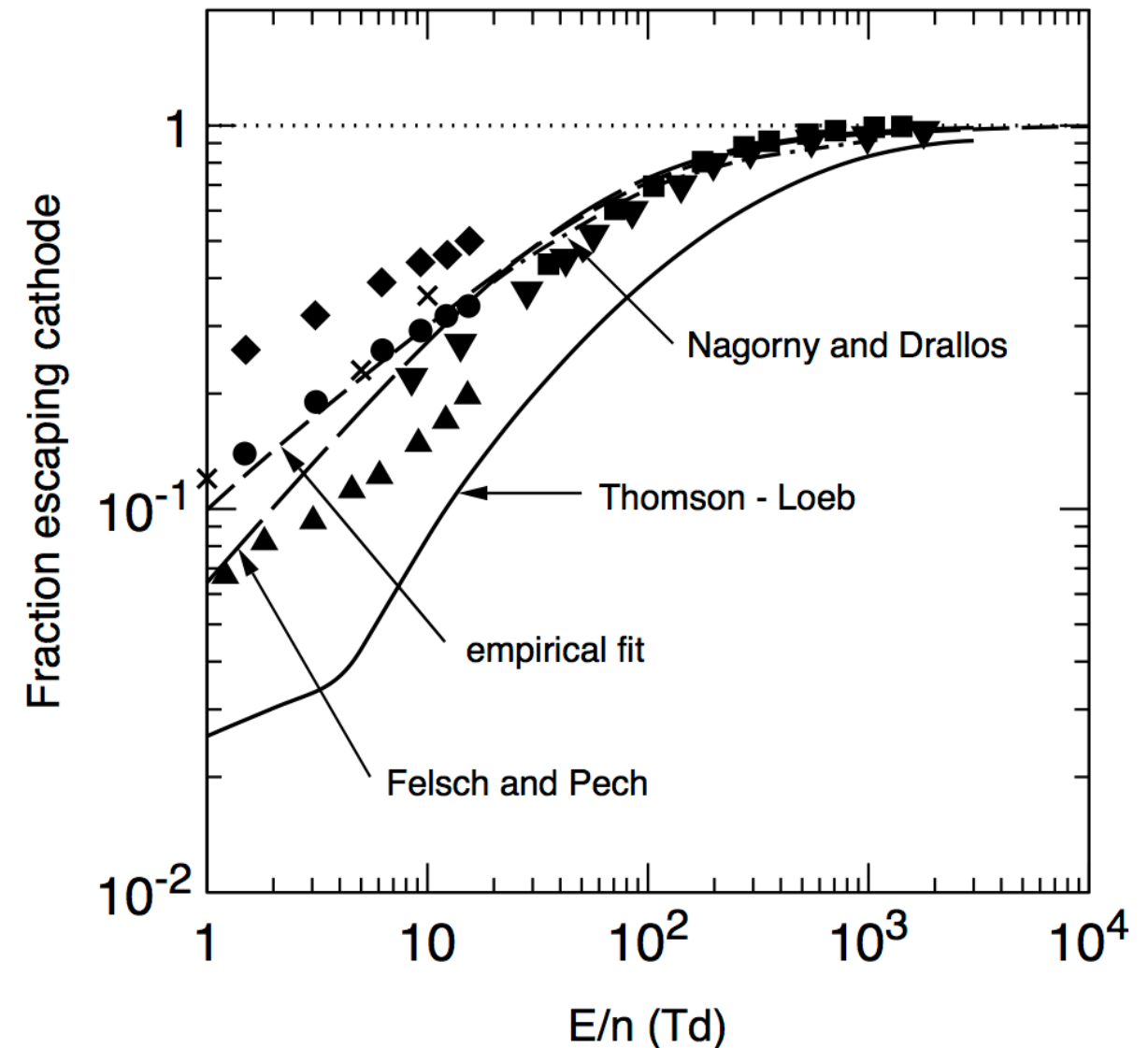
# Elektronok reabszorpciója a katódra

A katódról kilépő elektronok rugalmas ütközések után visszaszóródhatnak a katódra. Ott visszaverődhetnek, vagy elnyelődhetnek. Az elnyelt elektronok csökkentik az effektív elektronkiváltási együtthatót.

Rugalmatlan ütközés után az elektronok már nem juthatnak vissza a katódra.

A folyamat kis  $E/n$  mellett jelentős.

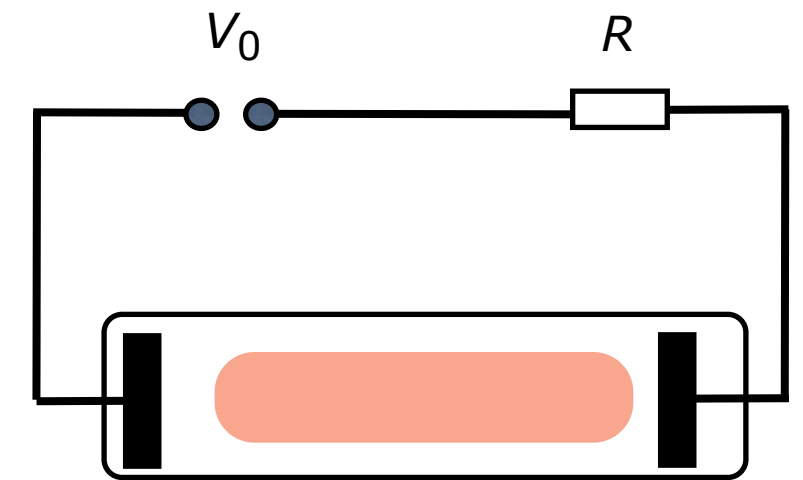
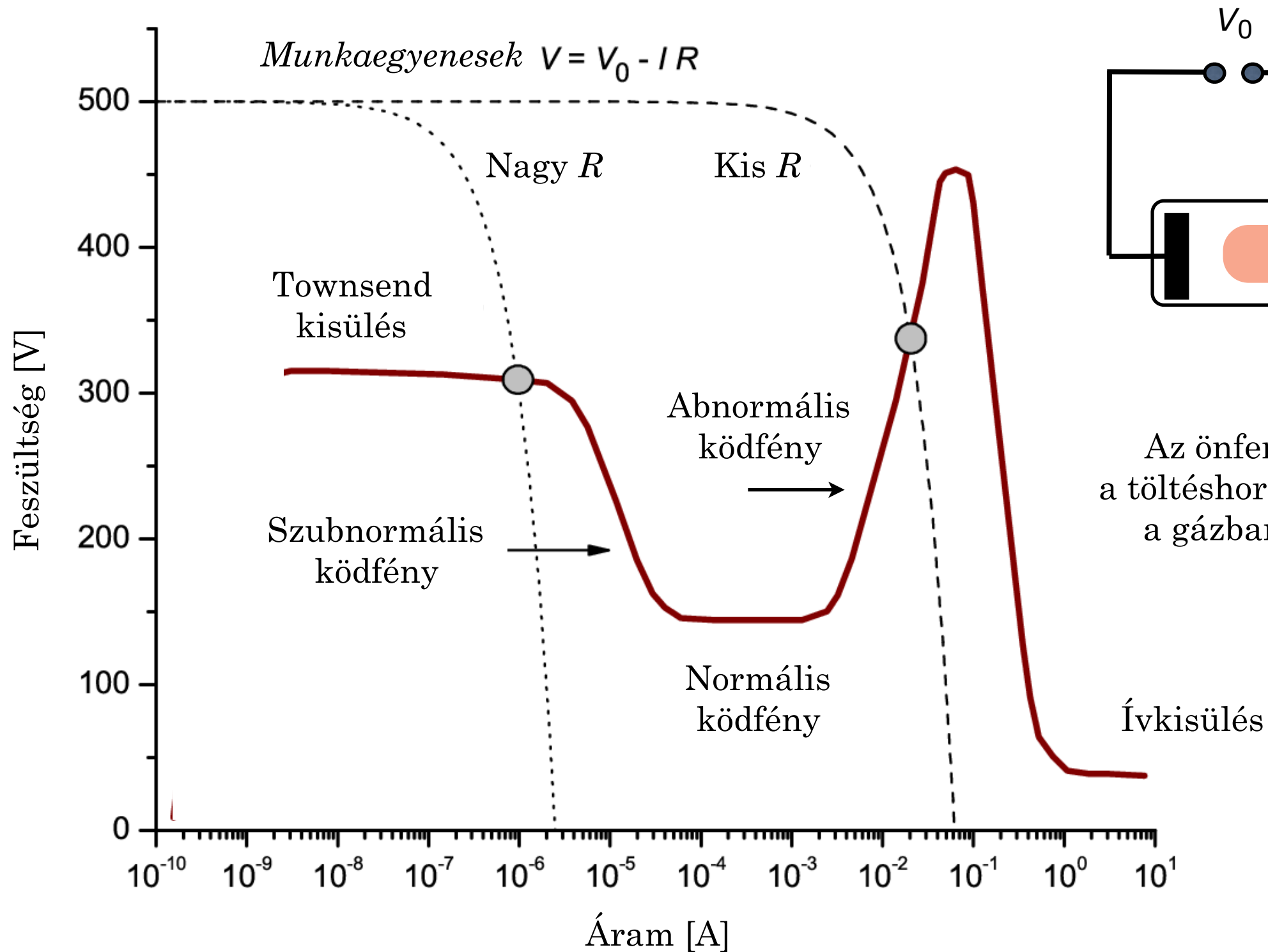
**Figure A1.** Fraction of electrons escaping the cathode versus  $E/n$ . The symbols, electron mean energies and references are:  $\blacklozenge$ , 0.2 eV, [122];  $\bullet$ , 0.6 eV, [122];  $\blacktriangledown$ , 0.9 eV, [100];  $\blacktriangle$ , 1.4 eV, [147];  $\blacksquare$ , 3? eV, [95]; and  $\times$ , 1 eV, [148]. The solid, long-dashed and dot-dashed curves give the theoretical predictions of the modes of Thomson and Loeb [31], Felsch and Pech [100] and Nagorny and Drallos [150], respectively. Each of these models is evaluated for an average electron injection energy of 0.6 eV. The short-dashed curve shows our empirical fit to experiment for an average electron injection energy of 0.6 eV.



A. V. Phelps & Z. Lj. Petrovic, PSST 8, R1-R24 (1999)



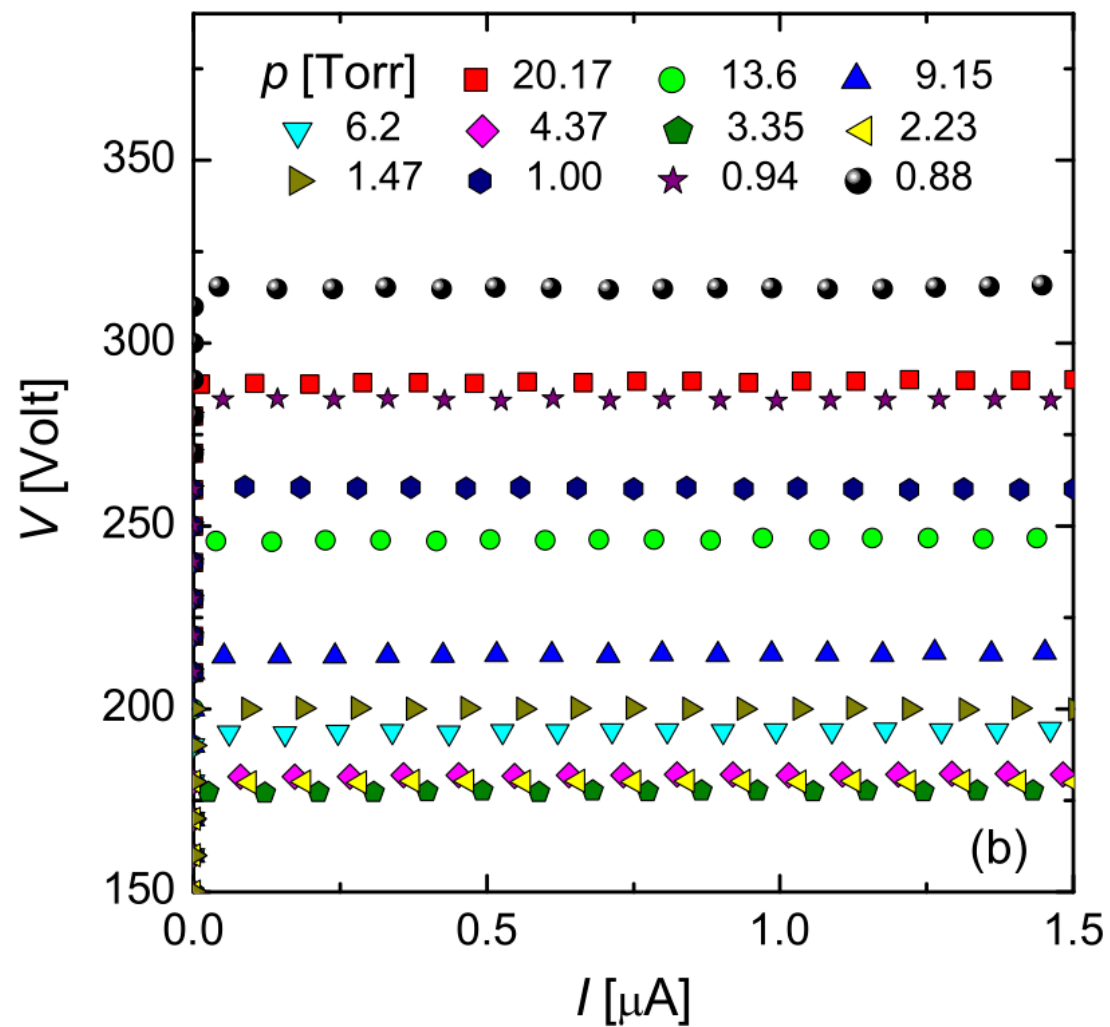
# Átütés után: egyenfeszültségű gázkisülések



Az önfenntartás feltétele a töltéshordozók reprodukciója a gázban és a felületeken

# Townsend kisülések

## Feszültség-áram karakterisztika: (pl. Hélium)



- ▶ Kis áramok mellett a tértöltések elhanyagolhatóak
- ▶ Az elektromos teret a töltött részecskék nem befolyásolják
- ▶ “Lapos” karakterisztika

Korolov & Donkó (2012)



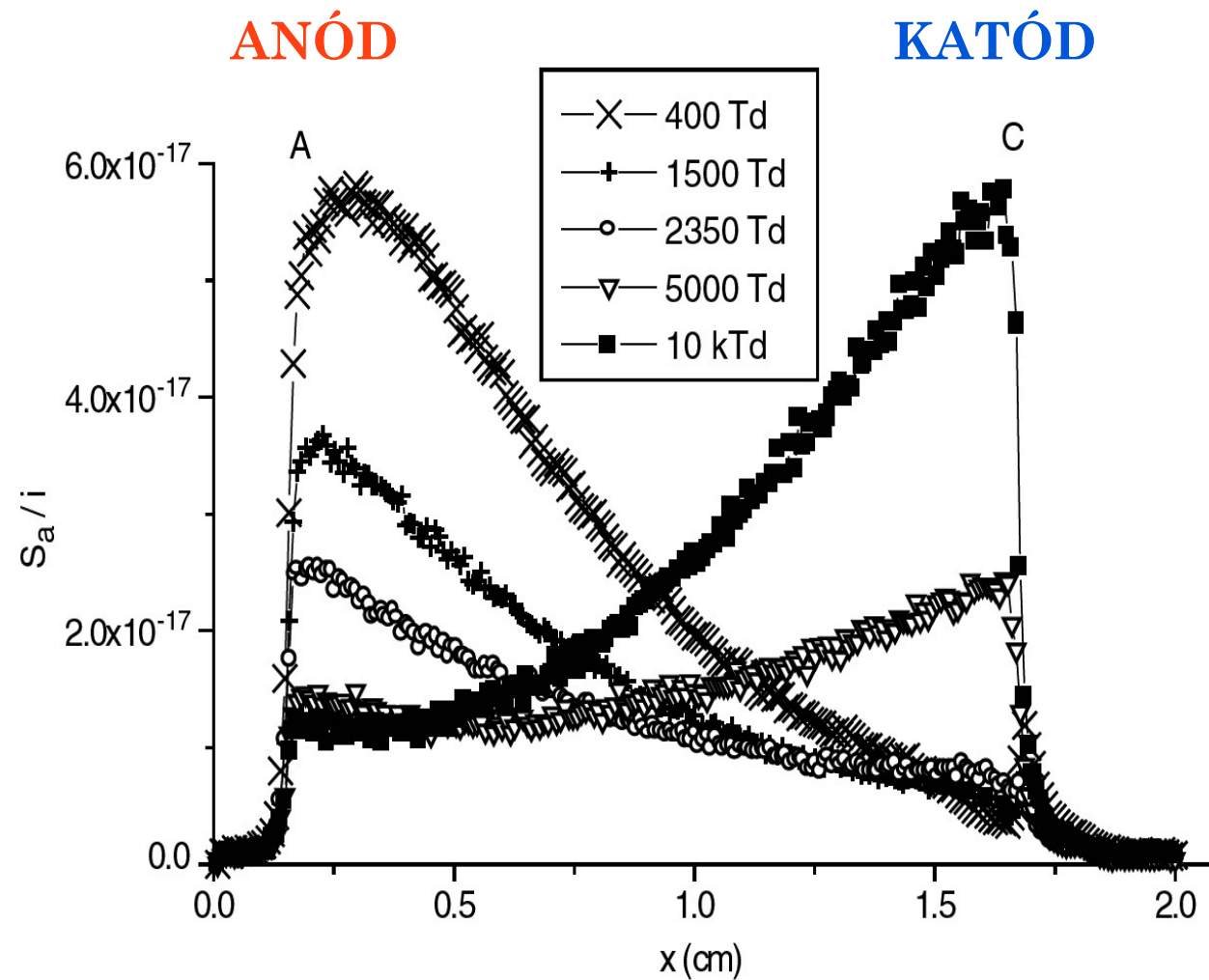
# Townsend kisülések

## Fénykibocsátás:

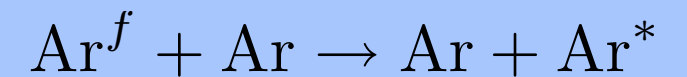
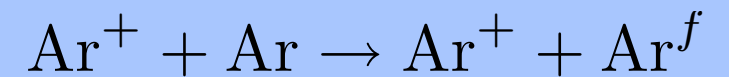
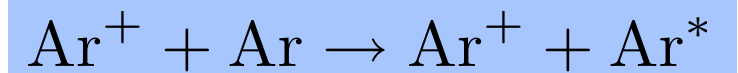
### Elektronütközéses gerjesztés:

- exponenciálisan növekszik az anód irányába

$$\Gamma_e(x) = \Gamma_e(0) \exp(\alpha x)$$



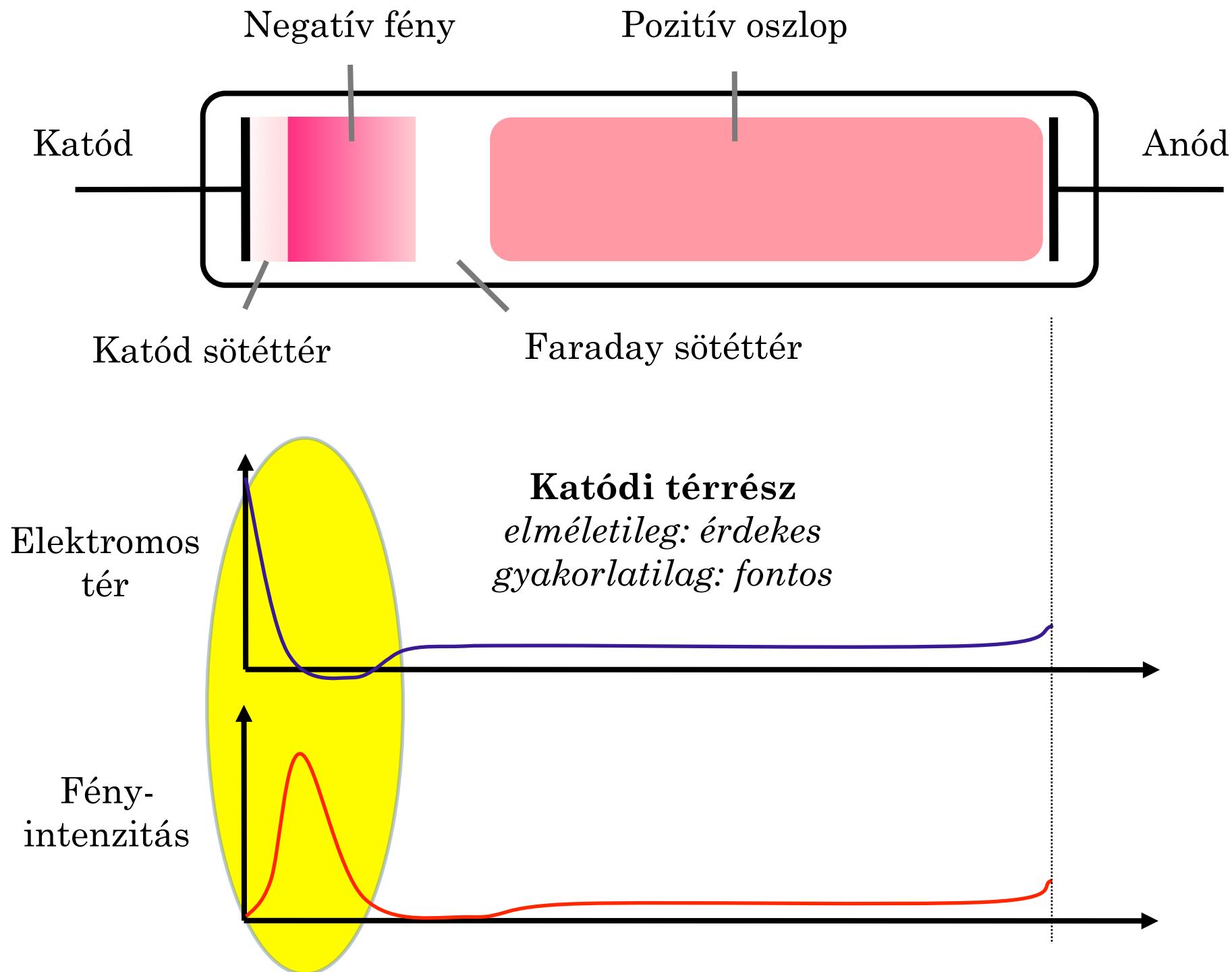
Nehéz részecskék keltette gerjesztés:  
 - a katód környékén megfigyelhető  
 - nagy  $E/n$  szükséges



Gyors atomok keletkezése: ion-atom ütközésekben

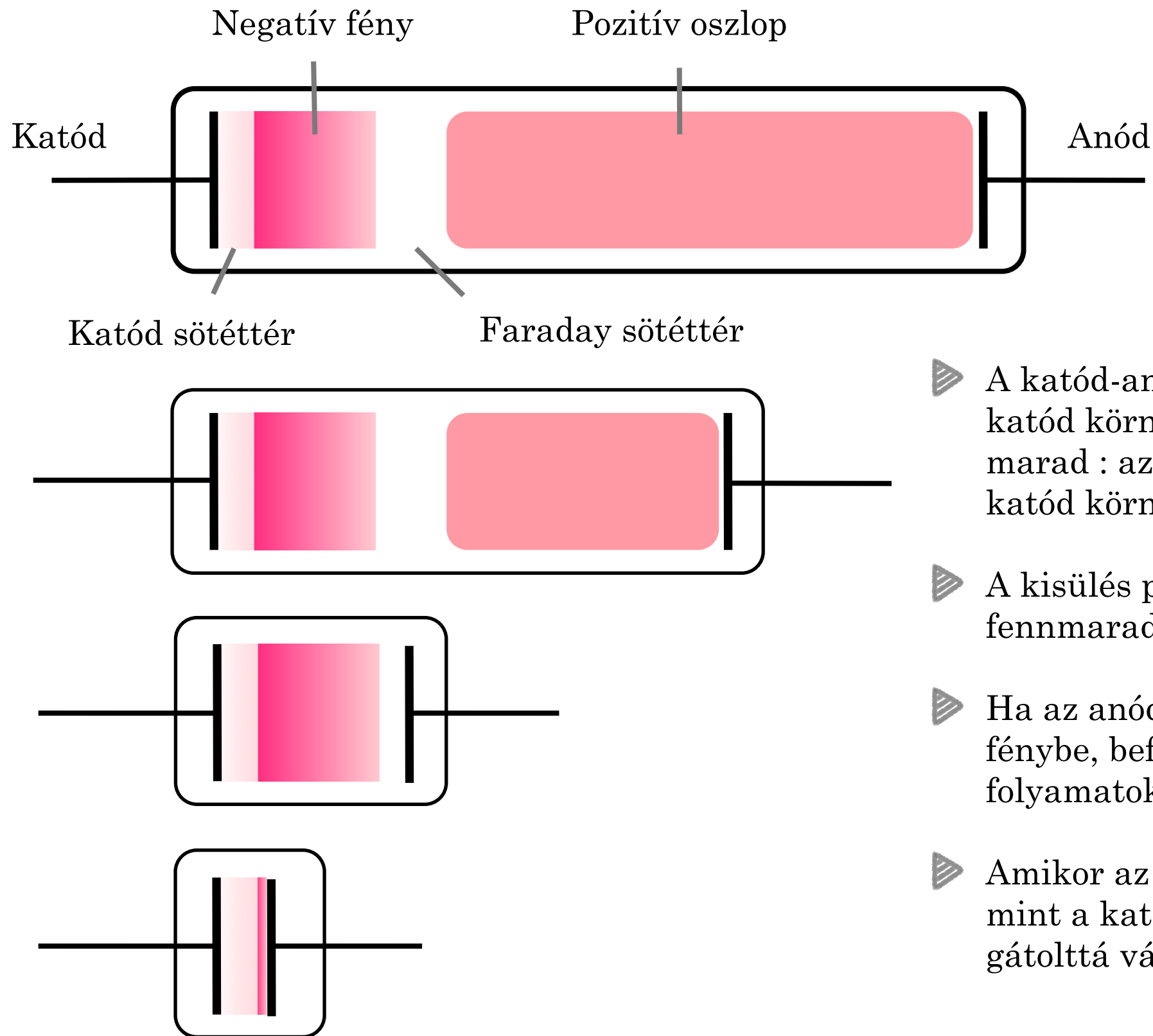
G Malović, A Strinić, S Živanov, D Marić and Z Lj Petrović,  
 Plasma Sources Sci. Technol. 12, S1 (2003).

# Egyenfeszültségű gázkisülések



- **Katód sötéttér:** erős elektromos tér, a katódból kilépő elektronok gyorsulnak és sokszorozódnak
- **Negatív fény:** az elektronok leadják az energiájukat, intenzív ionizáció és gerjesztés
- **Faraday sötéttér:** kis elektronenergia, nincs ionizáció és gerjesztés
- **Pozitív oszlop:** kvázisemleges plazma, kis elektromos tér, az ionizáció és a falon történő veszteség egyensúlyban vannak

# Egyenfeszültségű gázkisülések



- ▶ A katód-anód távolság változtatásakor a katód környéki térrész változatlan marad : az önfenntartási folyamatok a katód környékén játszódnak le
- ▶ A kisülés pozitív oszlop nélkül is fennmarad
- ▶ Ha az anód már "belóg" a negatív fénybe, befolyásolni kezdi az ionizációs folyamatokat
- ▶ Amikor az elektródatávolság kisebb, mint a katód sötéttér hossza, a kisülés gátoltta válik és végül kialszik

# A pozitív oszlop lehetséges hosszának kérdése

## Gaseous Electronics

Volume I

Electrical Discharges

Edited by

Merle N. Hirsh

H. J. Oskam

Chapter 1

### A Short History of Gaseous Electronics

*SANBORN C. BROWN*

RESEARCH LABORATORY OF ELECTRONICS  
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS

Hittorf was trying to determine if there was an ultimate length to the positive column. Week after week his discharge tube grew as he added meter after meter, sealing it off, pumping it down, and testing it as he pushed his Ruhmkorff induction coil to higher and higher voltage. His tube went all the way across the room, turned and curved back, turned again until his whole laboratory seemed full of thin glass tubing. It was summer, and as he sweated away with his Toepler pump, he opened the window to make it bearable. Suddenly, from outside came the howl of a pack of dogs in full pursuit, and flying through the open window came a terrified cat, to land, feet spread for the impact, in the middle of the weeks and weeks of labor. "Until an unfortunate accident terminated my experiment," Hittorf wrote, "the positive column appeared to extend without limit."



# Folyadékegyenletek

## Kiindulás:

Részecskeszám: 
$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma} = S - L$$

Impulzus: 
$$mn \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = nq\mathbf{E} - \nabla p - m\mathbf{u}(S - L) + mn \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)_c$$

## Folytonossági egyenlet

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma} = S - L$$

$S$ : forrás (pl. ionizáció)

$L$ : veszteség (pl. rekombináció)



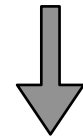
**Elektronok és ionok,  
1 dimenzióban:**

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} = S_e$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_i}{\partial x} = S_i$$

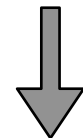


$$mn \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = nq\mathbf{E} - \nabla p - m\mathbf{u}(S - L) + mn \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)_c \quad \text{impulzusmérleg-egyenlet}$$



stacionárius rendszer, elhanyagoljuk a források és veszteségek hatását

$$nq\mathbf{E} - \nabla p - mn\nu_m \mathbf{u} = 0$$



izotermikus rendszer

$$\mathbf{u} = \frac{q}{m\nu_m} \mathbf{E} - \frac{k_B T}{m\nu_m} \frac{\nabla n}{n}$$

Einstein-összefüggés:

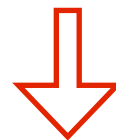
$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{|q|}$$



mozgékonyosság



diffúziós együttható



$$\Gamma = \pm \mu n \mathbf{E} - D \nabla n$$

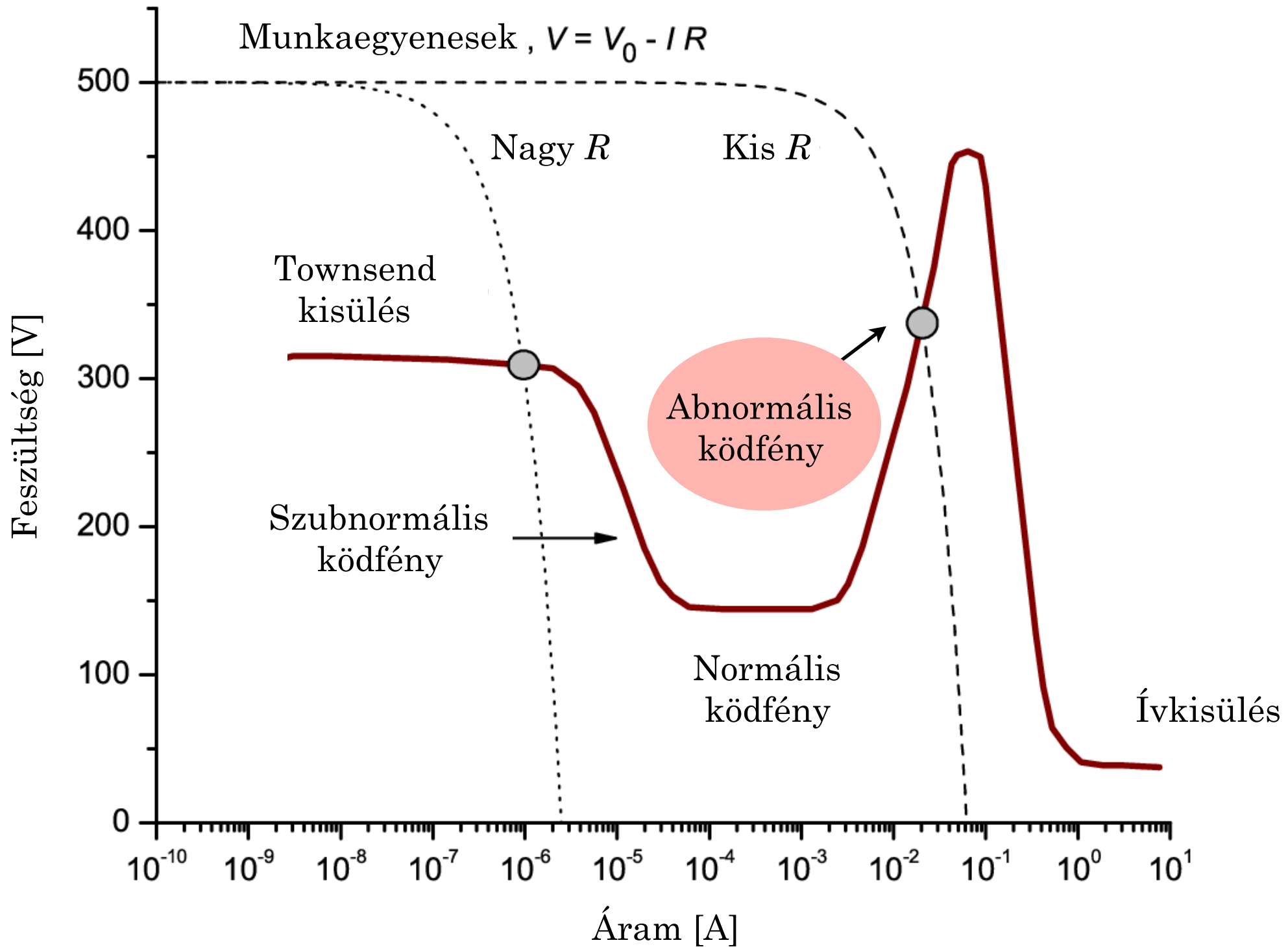
Részecskefluxus drift-diffúziós alakja

Elektronok és ionok,  
1 dimenzióban:

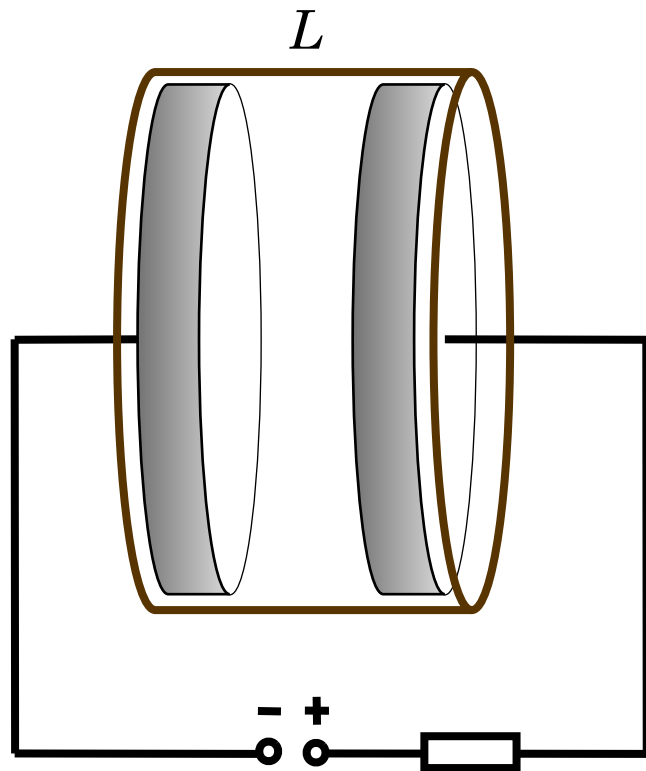
$$\Gamma_e = n_e v_e = -n_e \mu_e E - \frac{\partial(n_e D_e)}{\partial x}$$

$$\Gamma_i = n_i v_i = n_i \mu_i E - \frac{\partial(n_i D_i)}{\partial x}$$

# Egyenfeszültségű gázkisülések



# Egy egyszerű folyadékmodell



- **Abnormális ködfény**
- 1 dimenzió,  $D \gg L$ , nincsenek radiális veszteségek
- “rövid” rendszer: csak a katód körüli térrész (katód:  $x = 0$ )
- Folyamatok:
  - Drift
  - Diffúzió
  - Ionizáció

## Folytonossági egyenletek

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} = S_e$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_i}{\partial x} = S_i$$

## Forrásfüggvények

$$S_i(x) = S_e(x) = \Gamma_e \alpha [E(x)/n]$$

$$\alpha/n = f(E/n)$$

“lokális tér közelítés”

## Impulzusmérleg

$$\Gamma_e = -n_e \mu_e E - \frac{\partial (n_e D_e)}{\partial x}$$

$$\Gamma_i = n_i \mu_i E - \frac{\partial (n_i D_i)}{\partial x}$$

## Határfeltételek

$$V(0) = 0, V(L) = V_0$$

$$\left. \frac{\partial n_i}{\partial x} \right|_0 = 0 \quad n_i(L) = 0$$

$$n_e(L) = 0$$

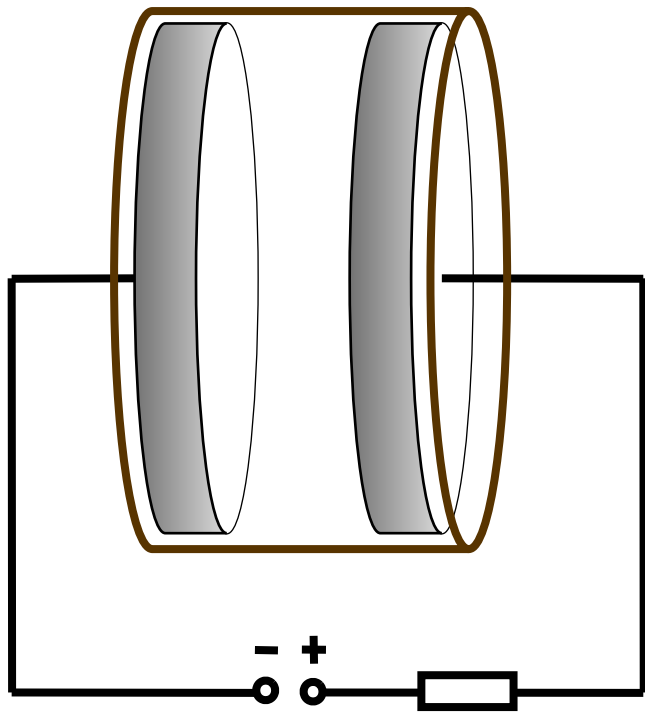
$$\Gamma_e(0) = -\gamma \Gamma_i(0)$$

## Poisson-egyenlet

$$\Delta \phi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e)$$



# Egy egyszerű folyadékmodell



- **Abnormális ködfény**
- 1 dimenzió,  $D \gg L$ , nincsenek radiális veszteségek
- “rövid” rendszer: csak a katód körüli térrész
- Folyamatok:
  - Drift
  - Diffúzió
  - Ionizáció

$$\Gamma_i = n_i \mu_i E - \frac{\partial(n_i D_i)}{\partial x}$$



$$\Gamma_e = -n_e \mu_e E - \frac{\partial(n_e D_e)}{\partial x}$$



Transzport paraméterek megadása szükséges

$$\mu_i = \mu_i(E/n) \quad \text{Irodalomból / kísérletileg jól ismert ☺}$$

$$D_i/\mu_i = k_B T_i/e = k_B T_g/e \quad \text{Ionok gyakran ütköznek a háttérgáz atomjaival ☺}$$

$$\mu_e = \text{const.}$$

Ismert lenne  $E/n$  függvényében, de ez numerikus instabilitást okoz az egyenletek megoldásánál ☹

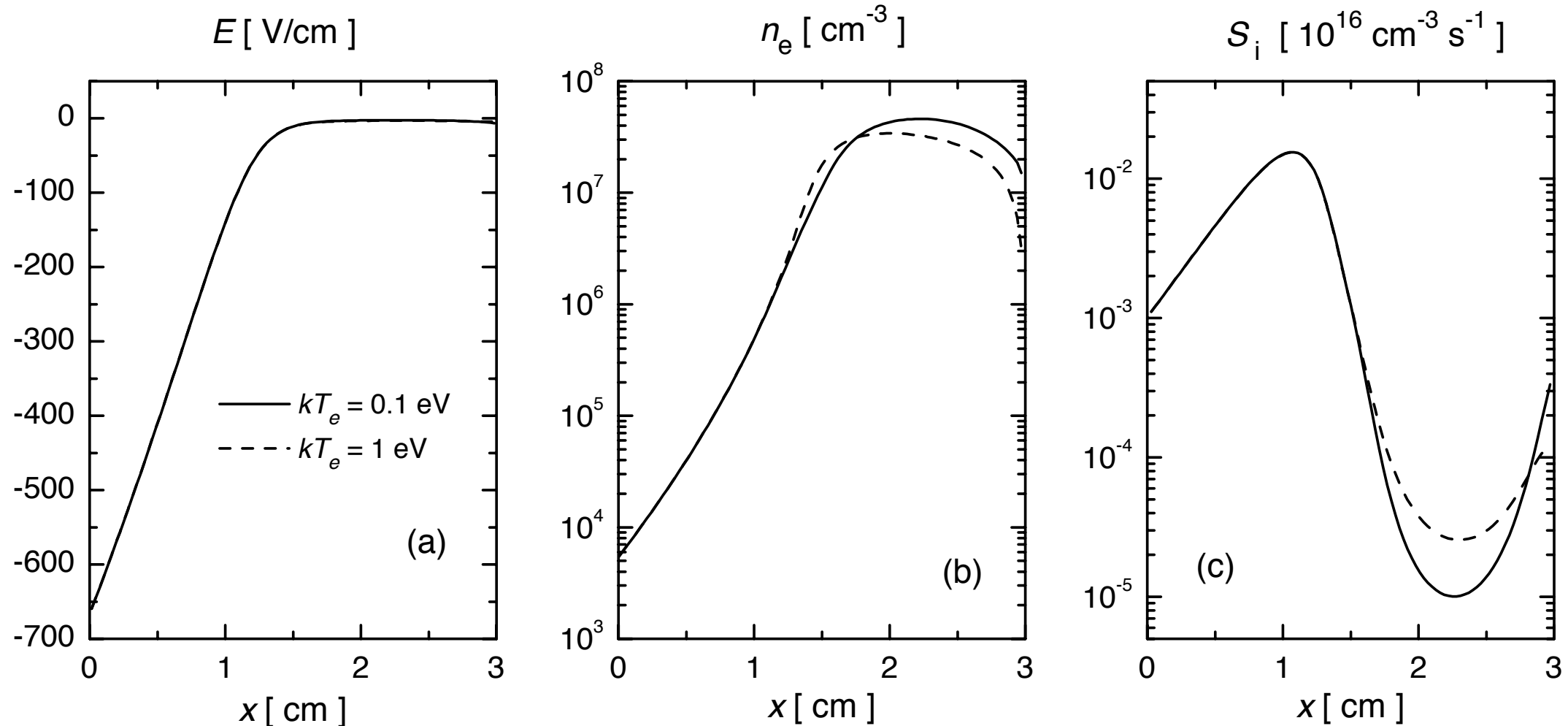
$$D_e/\mu_e = k_B T_e/e$$

Bemenő paraméter. u.i. nincs rá egyenletünk az egyszerű folyadékmodellben ☹

“Minősége”:  $2 \times ☺ + 2 \times ☹ = ???$

# Az egyszerű folyadékmodell eredményei

$$p = 40 \text{ Pa (Ar)}, V = 441 \text{ V}, T_g = 300 \text{ K}, L = 3 \text{ cm}, \gamma = 0.033$$

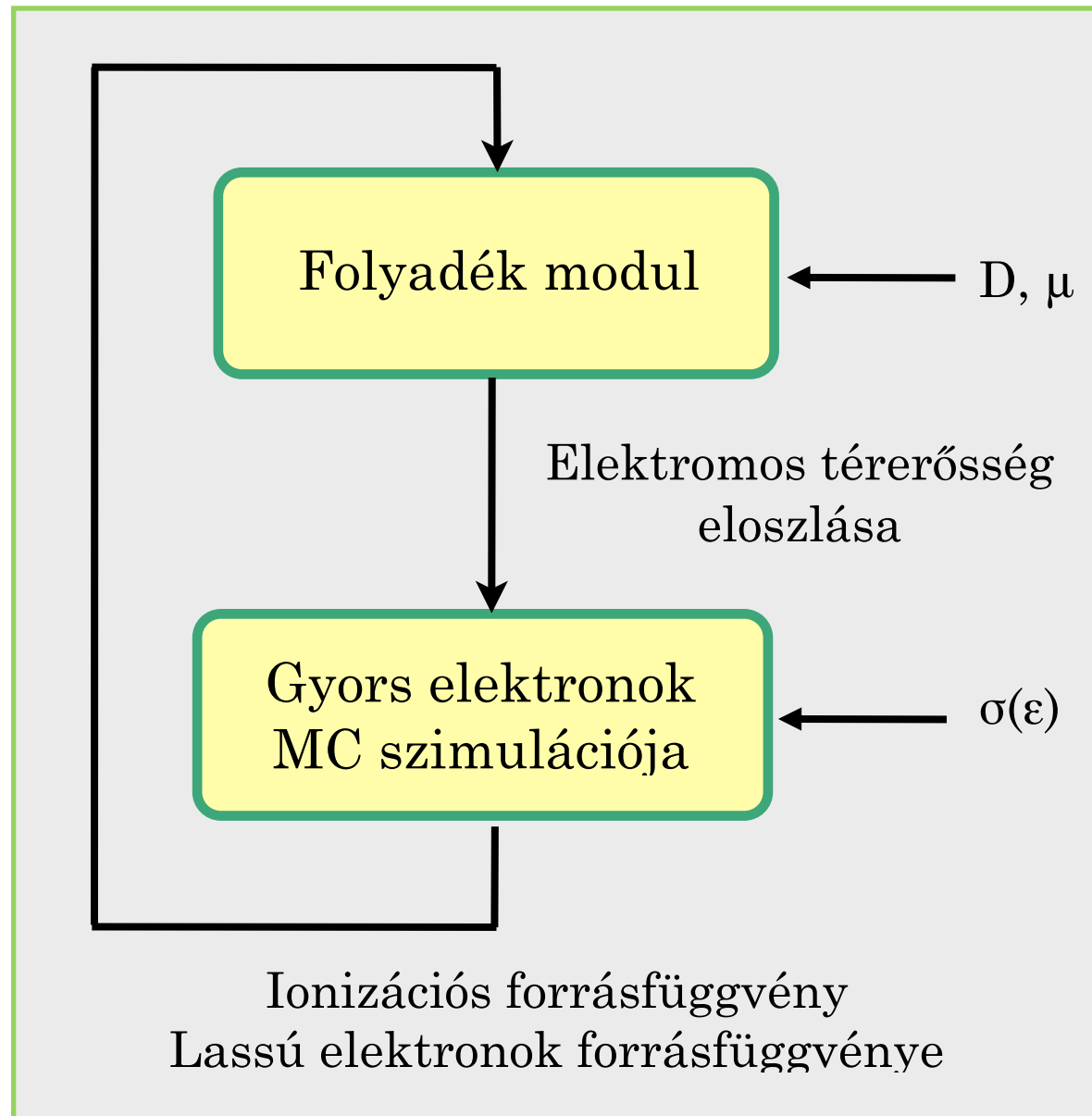


A katód sötéttér + negatív fény struktúra előáll - erre nem tettünk semmilyen előzetes feltételezést!! 😊

Elektronsűrűség jóval kisebb a tipikus mért értékeknél 😞 Negatív fény emissziója? 😞

$$S_i(x) = S_e(x) = \Gamma_e \alpha [E(x)/n] \quad \text{“lokális tér közelítés” problémás ???}$$

# Hibrid modellek



**Az ötlet:**

**Számítsuk az ionizációs forrásfüggvényt a gyors elektronok kinetikus (MC) szimulációjából !!**

A Monte Carlo szimuláció nem hatékony a lassú elektronokra, ezeket hagyjuk meg “folyadék szinten”

M. Surendra, D. B. Graves, and G. M. Jellum, Phys. Rev. A **41**, 1112 (1990).

J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, IEEE Trans. Plasma Sci. **19**, 286 (1991).

A. Fiala, L. C. Pitchford, and J. P. Boeuf, Phys. Rev. E **49**, 5607 (1994).

A. Bogaerts, R. Gijbels, and W. J. Goedheer, J. Appl. Phys. **78**, 2233 (1995).

$$S_{i,e}(x) = \frac{j}{e(1 + 1/\gamma)\Delta x} \frac{N_{i,e}(x)}{N_0^{\text{MC}}}$$



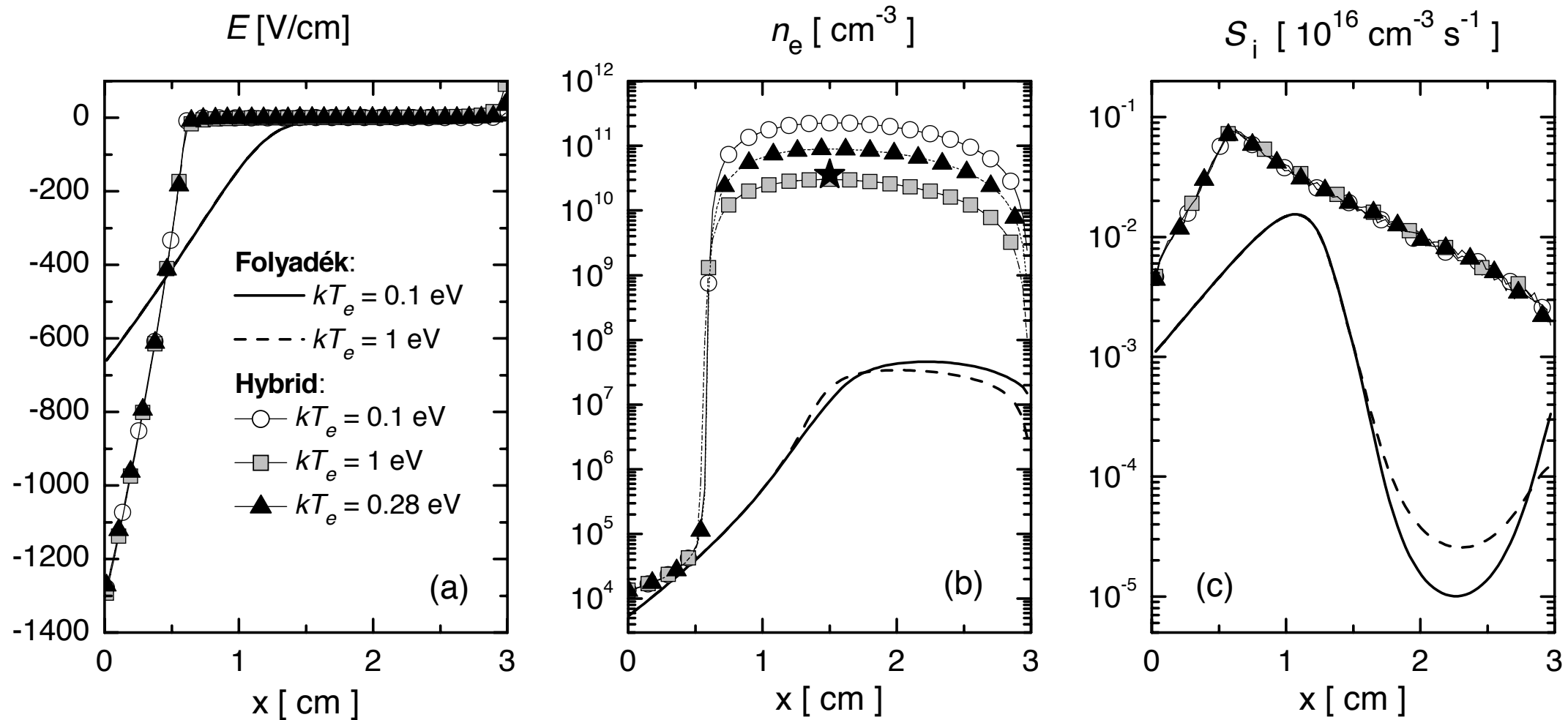
$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} = S_e$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_i}{\partial x} = S_i$$

$$S_e \neq S_i$$

# A hibrid modell eredményei

$$p = 40 \text{ Pa (Ar)}, V = 441 \text{ V}, T_g = 300 \text{ K}, L = 3 \text{ cm}, \gamma = 0.033$$

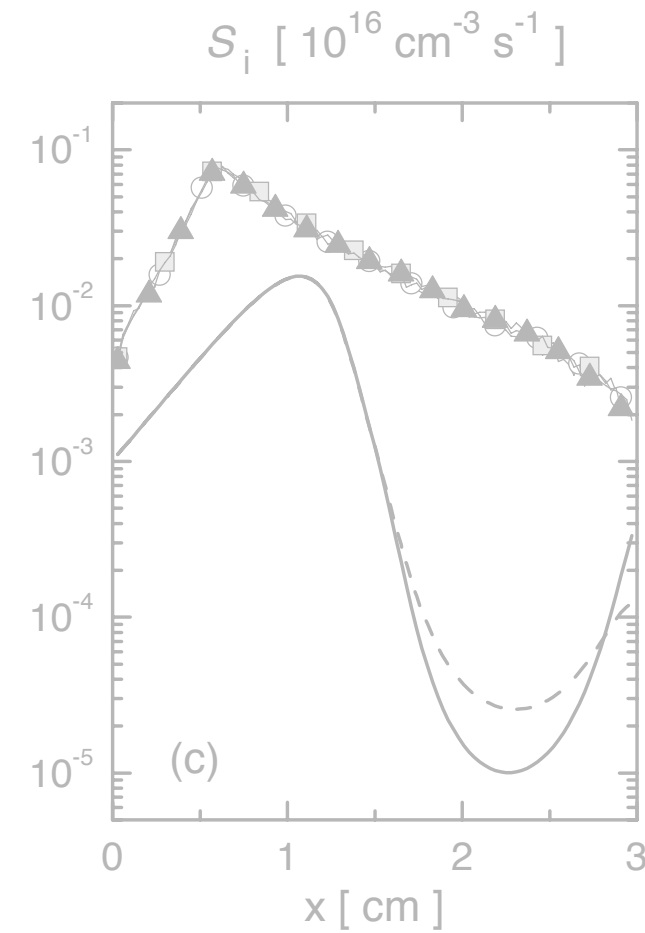
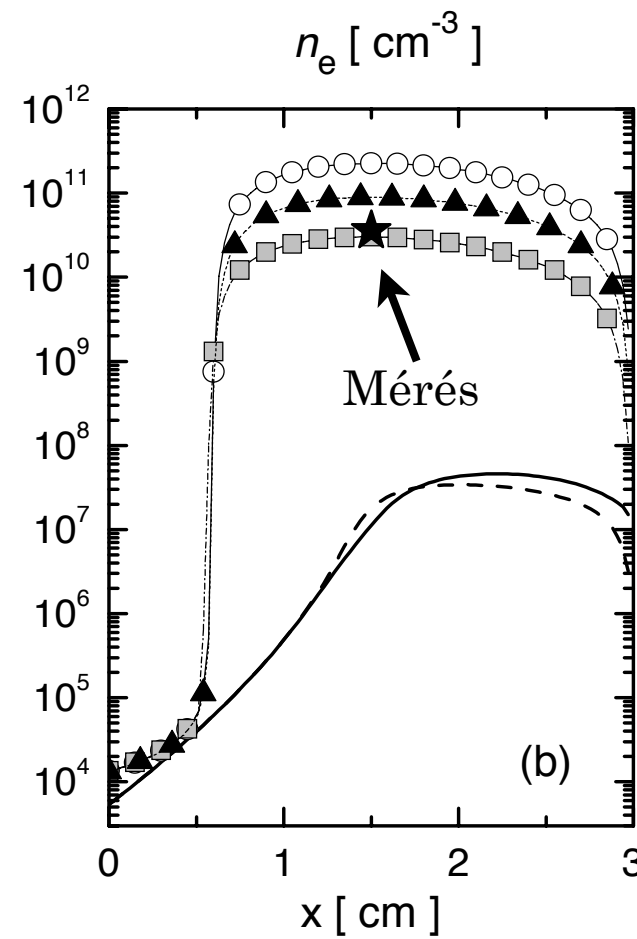
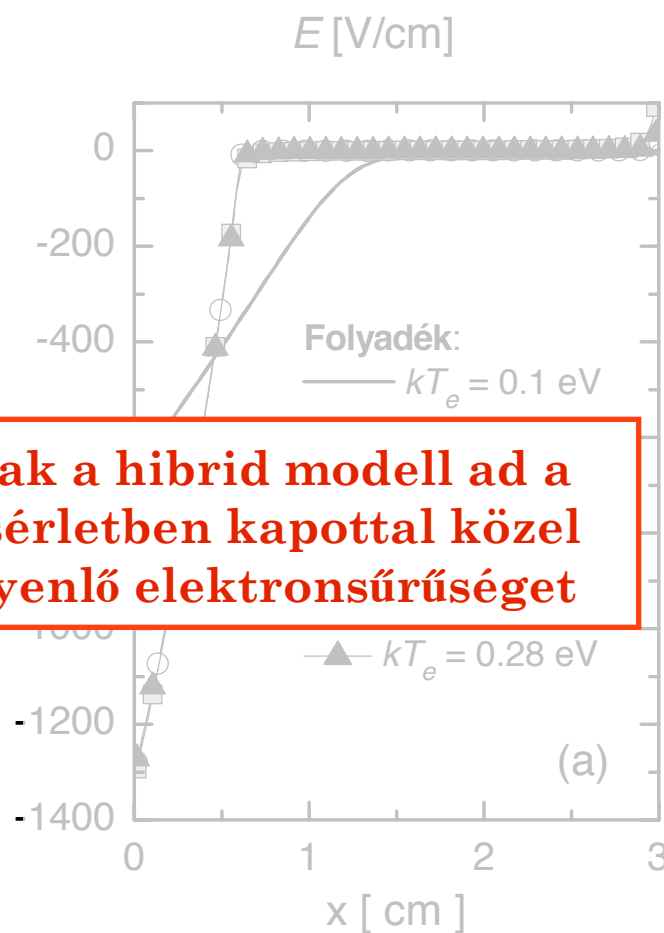


Jelentős különbségek a különböző modellek eredményei között,  
pl. több nagyságrend az elektronsűrűségben....

“On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges”

A. Derzsi, P. Hartmann, I. Korolov, J. Karácsony, G. Bánó, and Z. Donkó, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 225204 (2009)

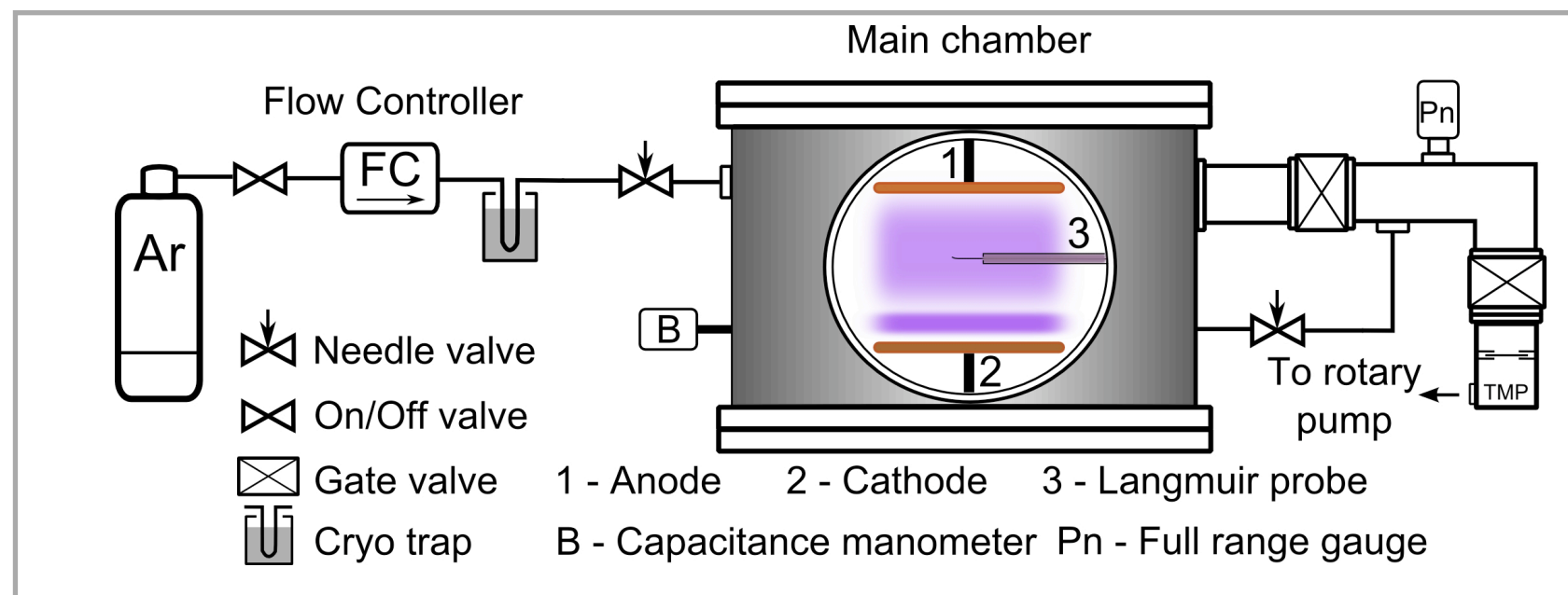
# Hibrid modell : konzisztencia (1)



$p = 40 \text{ Pa (Ar)}$ ,  
 $V = 441 \text{ V}$ ,  
 $T_g = 300 \text{ K}$ ,  
 $L = 3 \text{ cm}$ ,  
 $\gamma = 0.033$

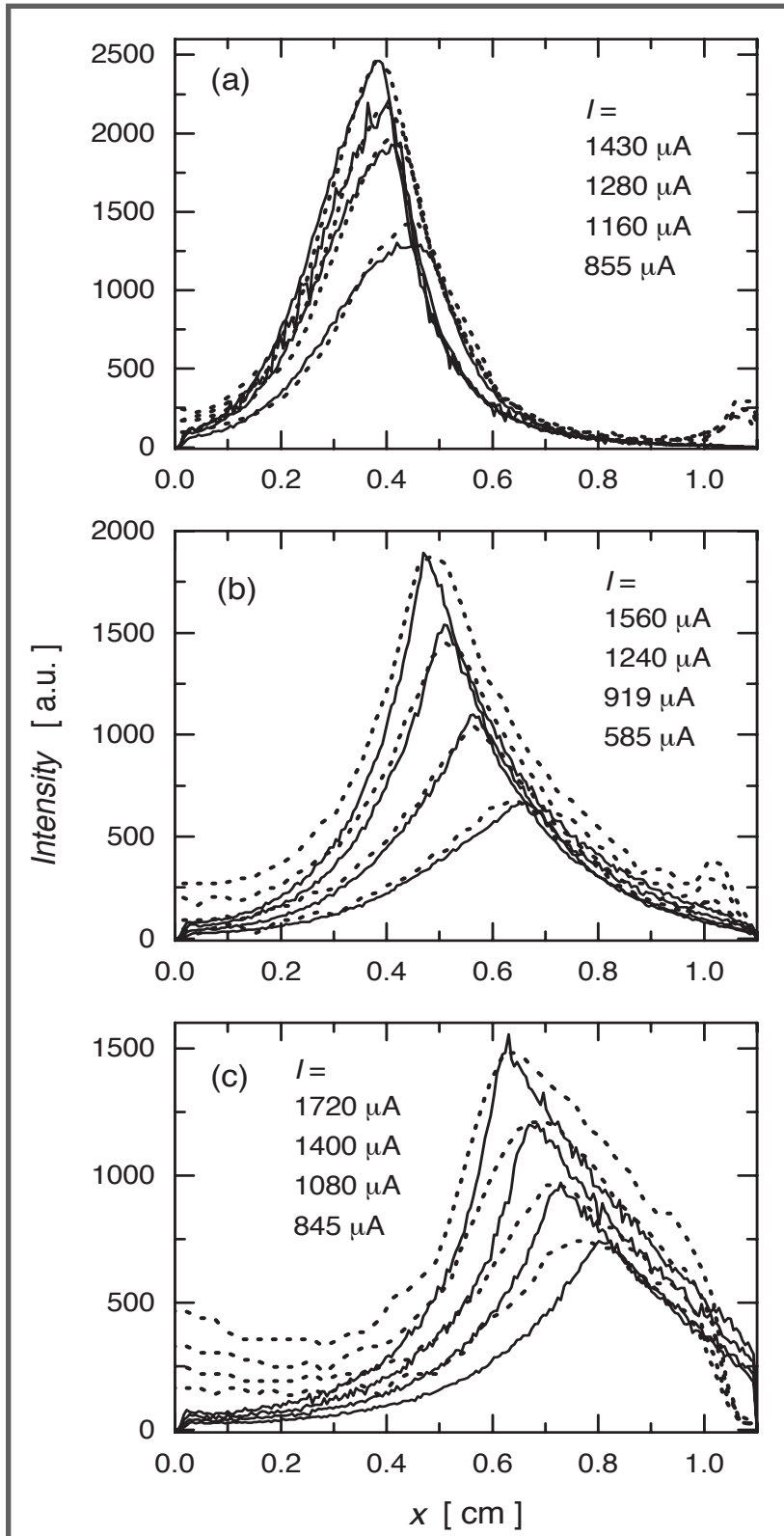
Langmuir-szonda

A. Derzsi, P. Hartmann, I. Korolov,  
 J. Karácsony, G. Bánó, and Z. Donkó,  
 J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 225204 (2009)

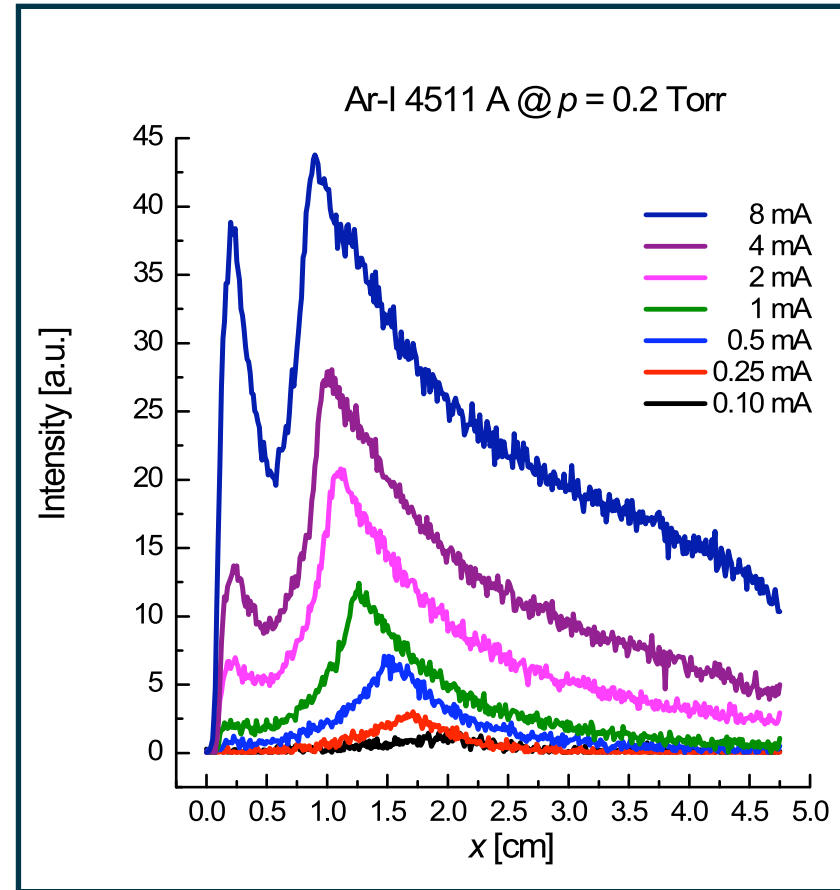


# Hibrid modell : konzisztencia (2)

## Kísérlet & Modell



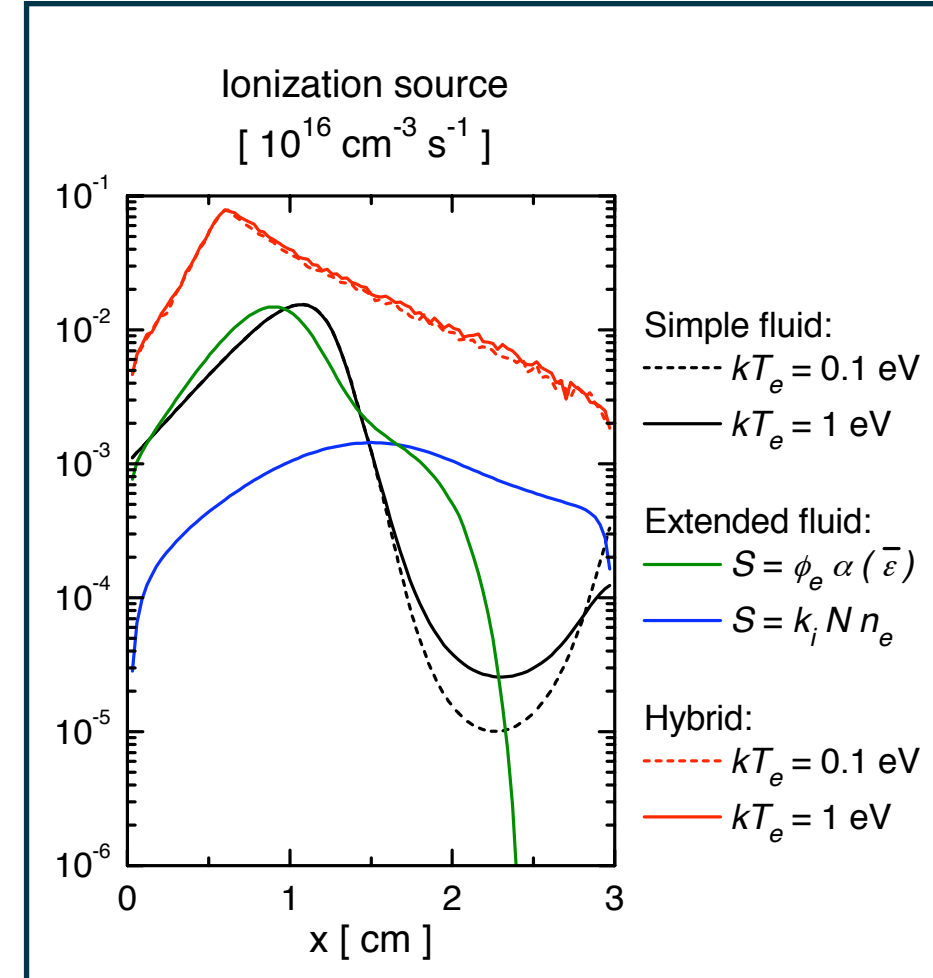
## Kísérlet



K. Rózsa, A. Gallagher and Z. Donkó:  
"Excitation of Ar lines in the cathode  
region of a DC discharge",  
Physical Review E **52**, 913-918 (1995)

D. Marić, K. Kutasi, G. Malović, Z. Donkó and Z. Lj. Petrović:  
"Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in  
abnormal glow discharges in argon", Eur. Phys. J D **21**, 73 (2002)

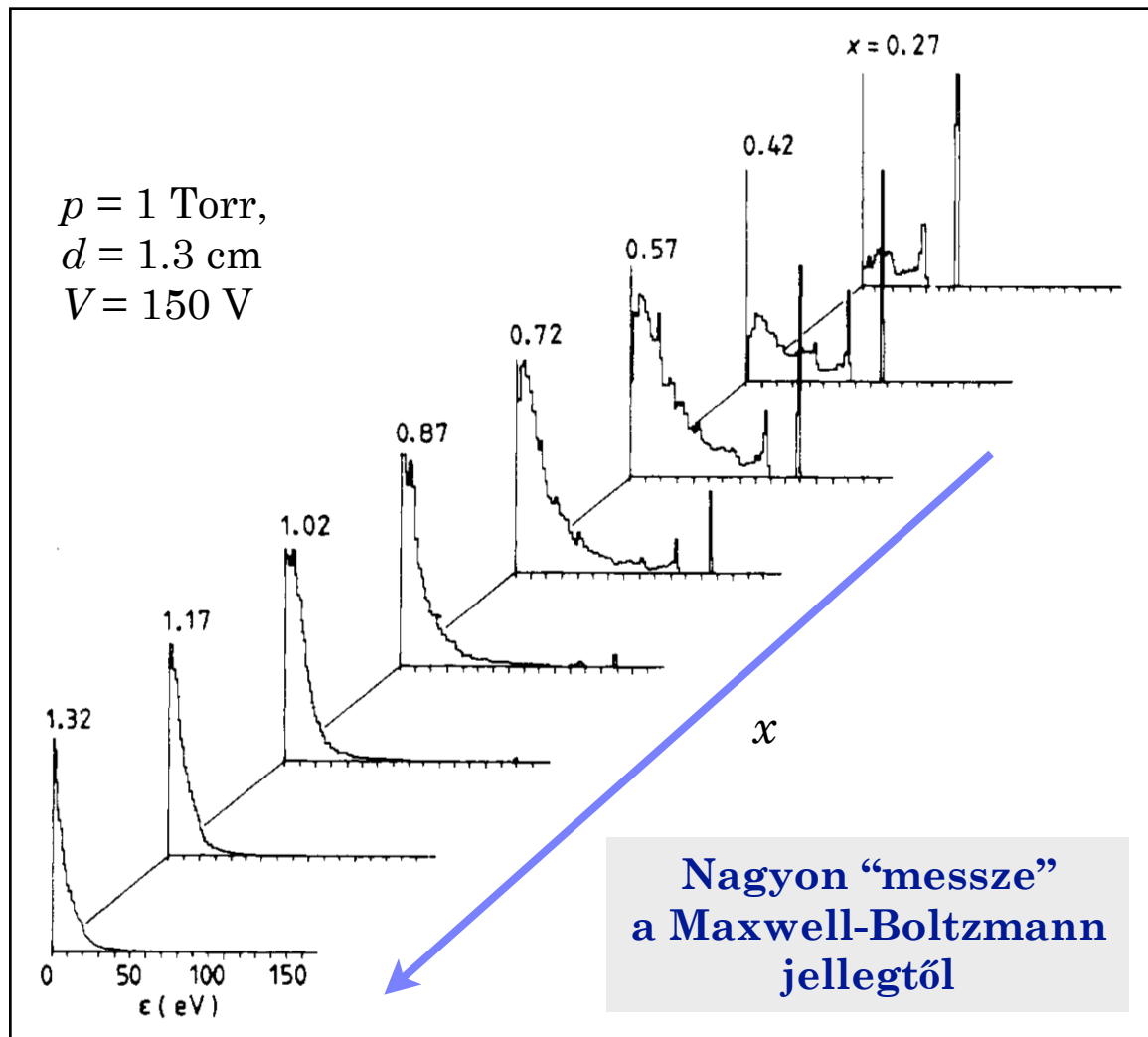
## Modell



**Csak a hibrid modell ad a katód  
sötéttér - negatív fény határ után  
exponenciálisan csökkenő  
forrásfüggvényt**

# Az elektronok sebességeloszlás függvénye a katód sötéttérben

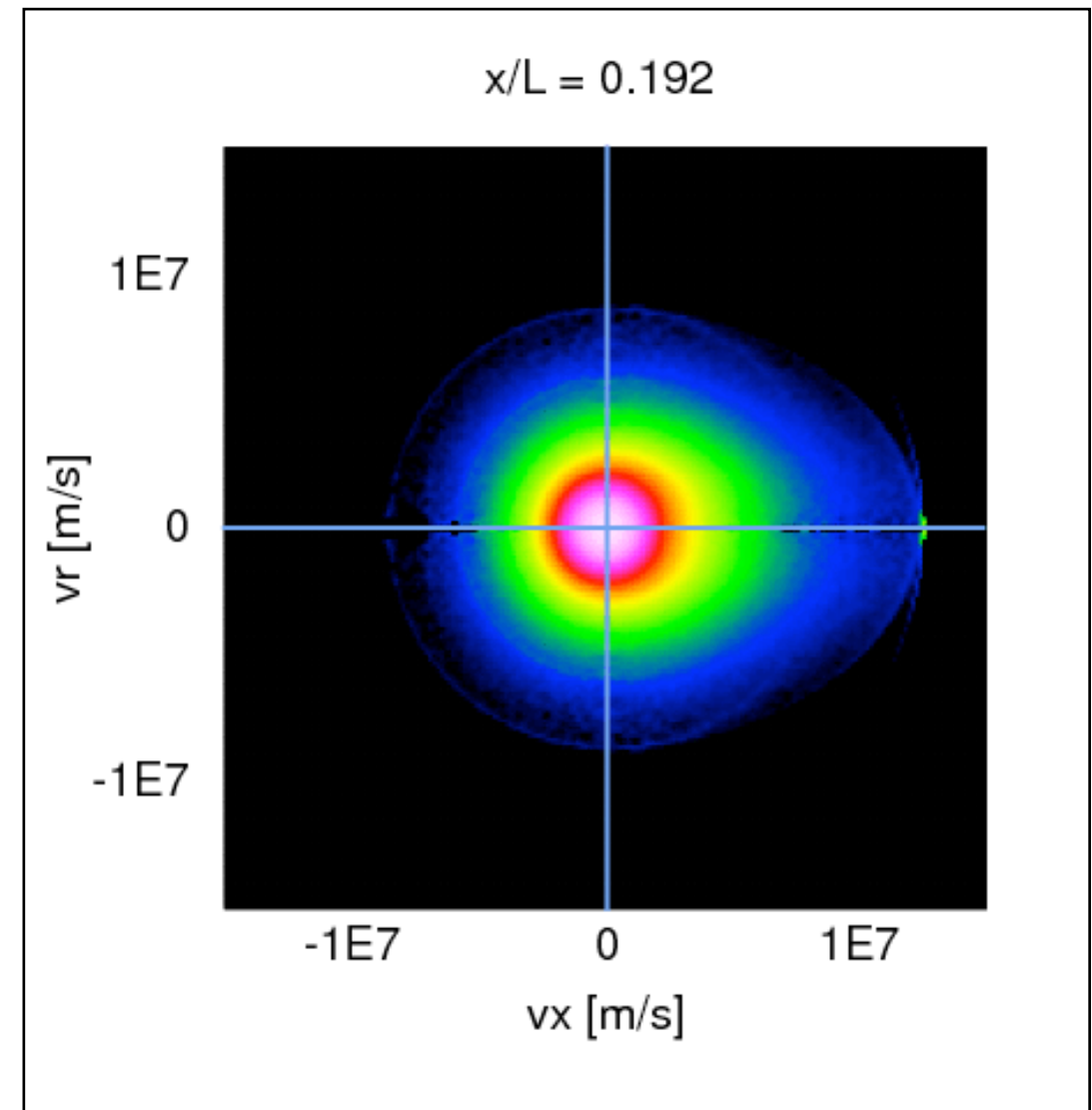
Az elektronok energiaeloszlás függvényének változása a katód sötéttérben



J. P. Boeuf and E. Marode J. Phys. D **15** 2169 (1982)  
 "A Monte Carlo analysis of an electron swarm in nonuniform field: the cathode region of a glow discharge in helium"

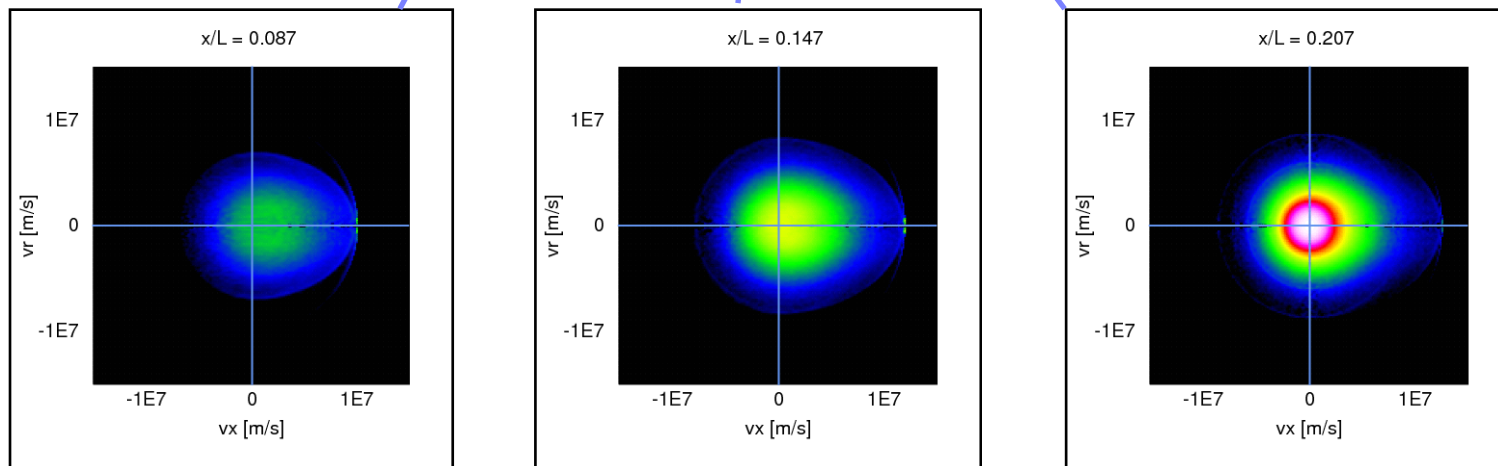
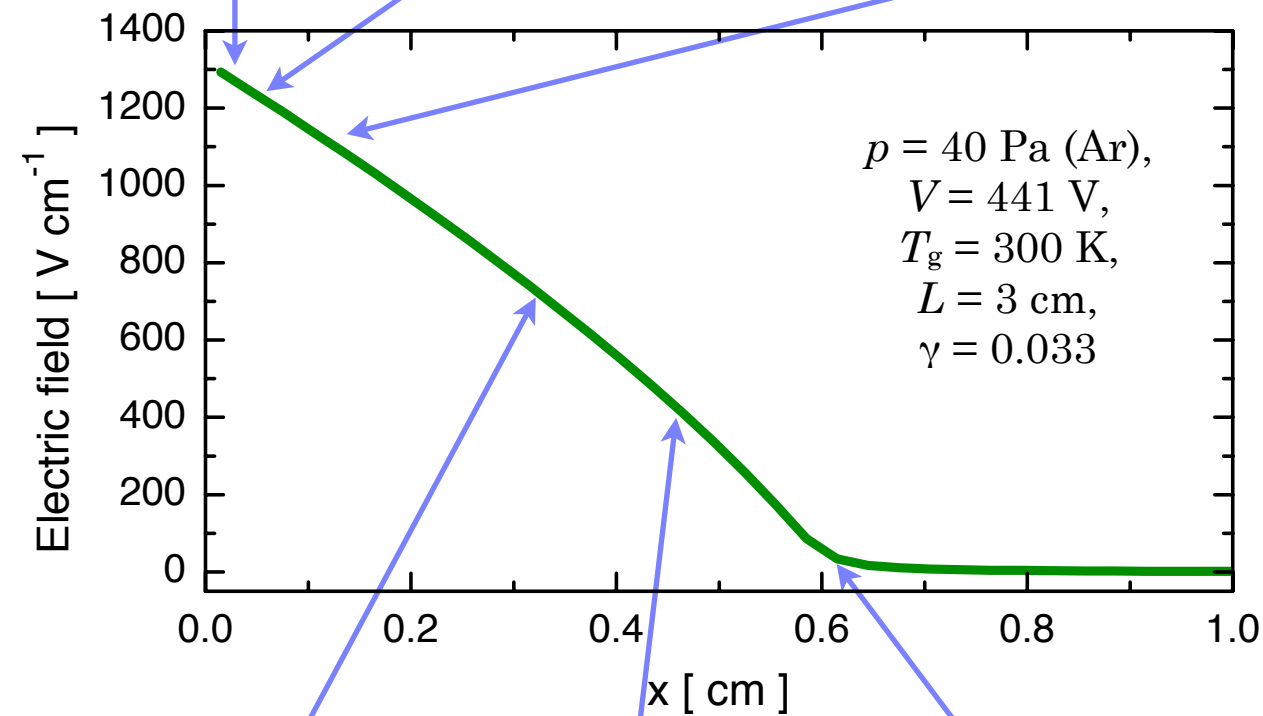
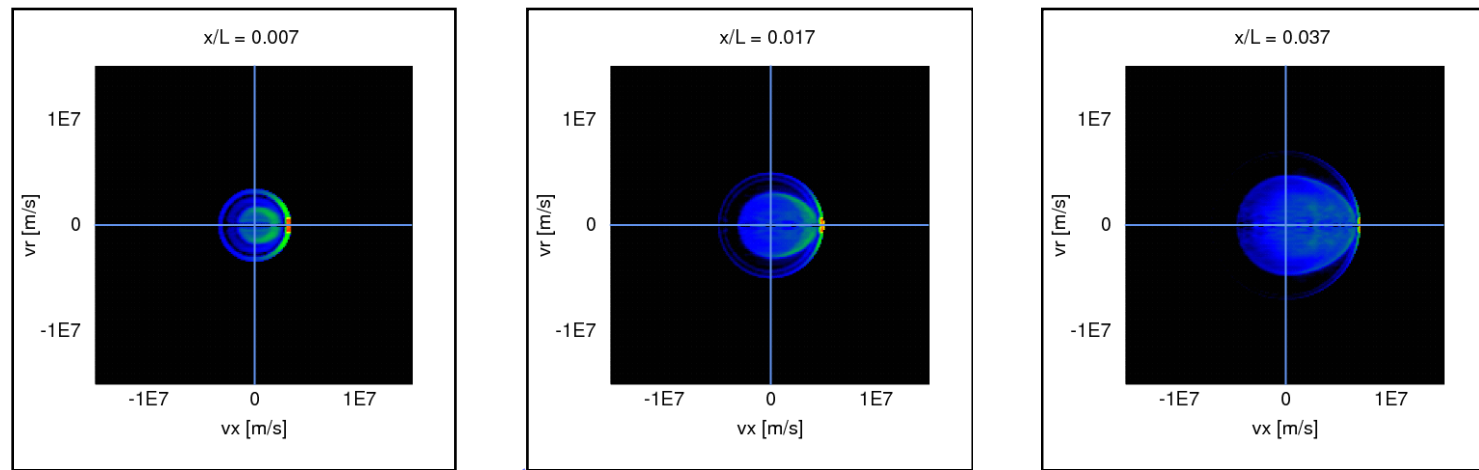
$$f(x, v_x, v_r)$$

$p = 40 \text{ Pa (Ar)}$ ,  $V = 441 \text{ V}$ ,  $T_g = 300 \text{ K}$ ,  
 $L = 3 \text{ cm}$ ,  $\gamma = 0.033$

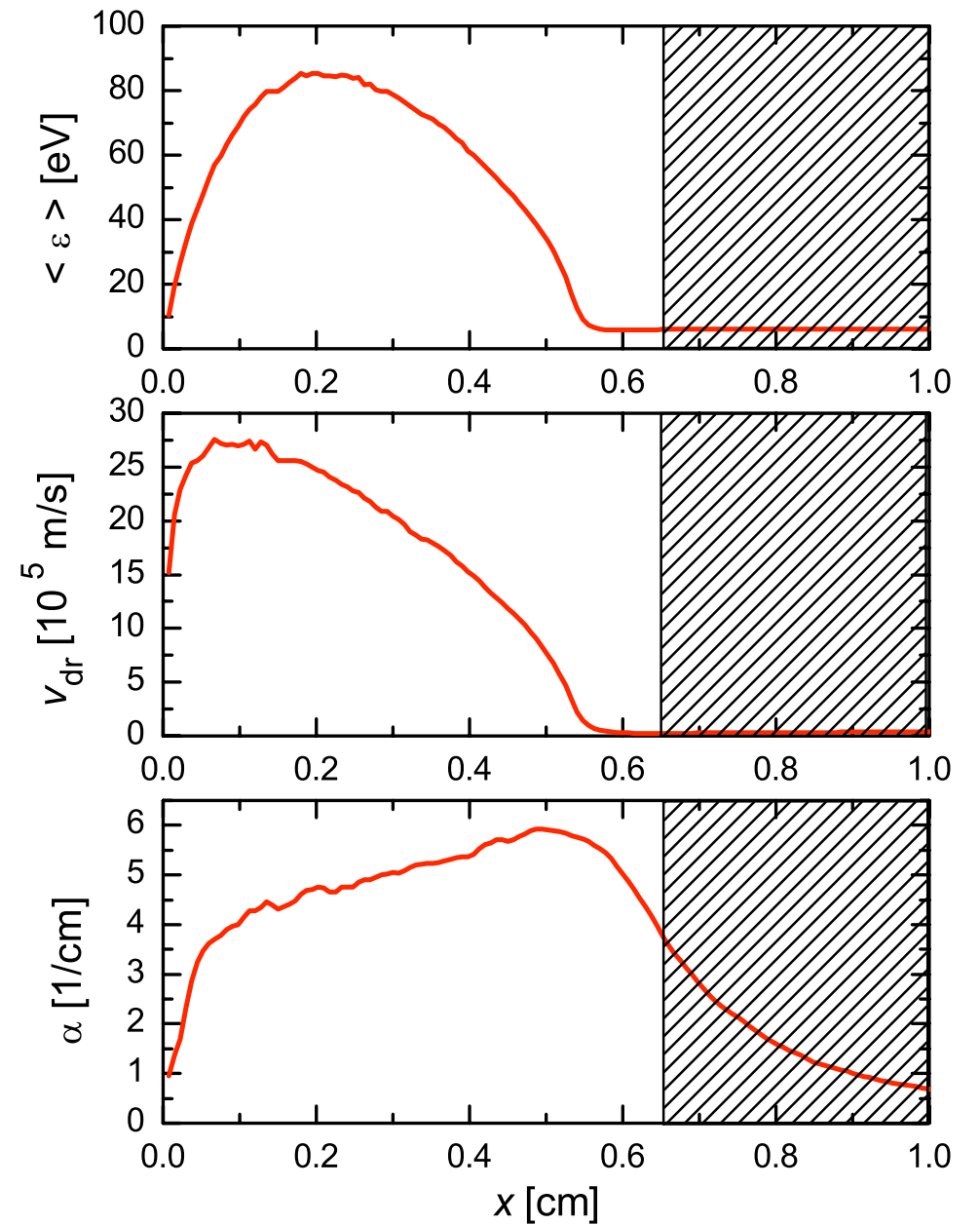




# Az elektronok sebességeloszlás függvénye a katód sötéttérben



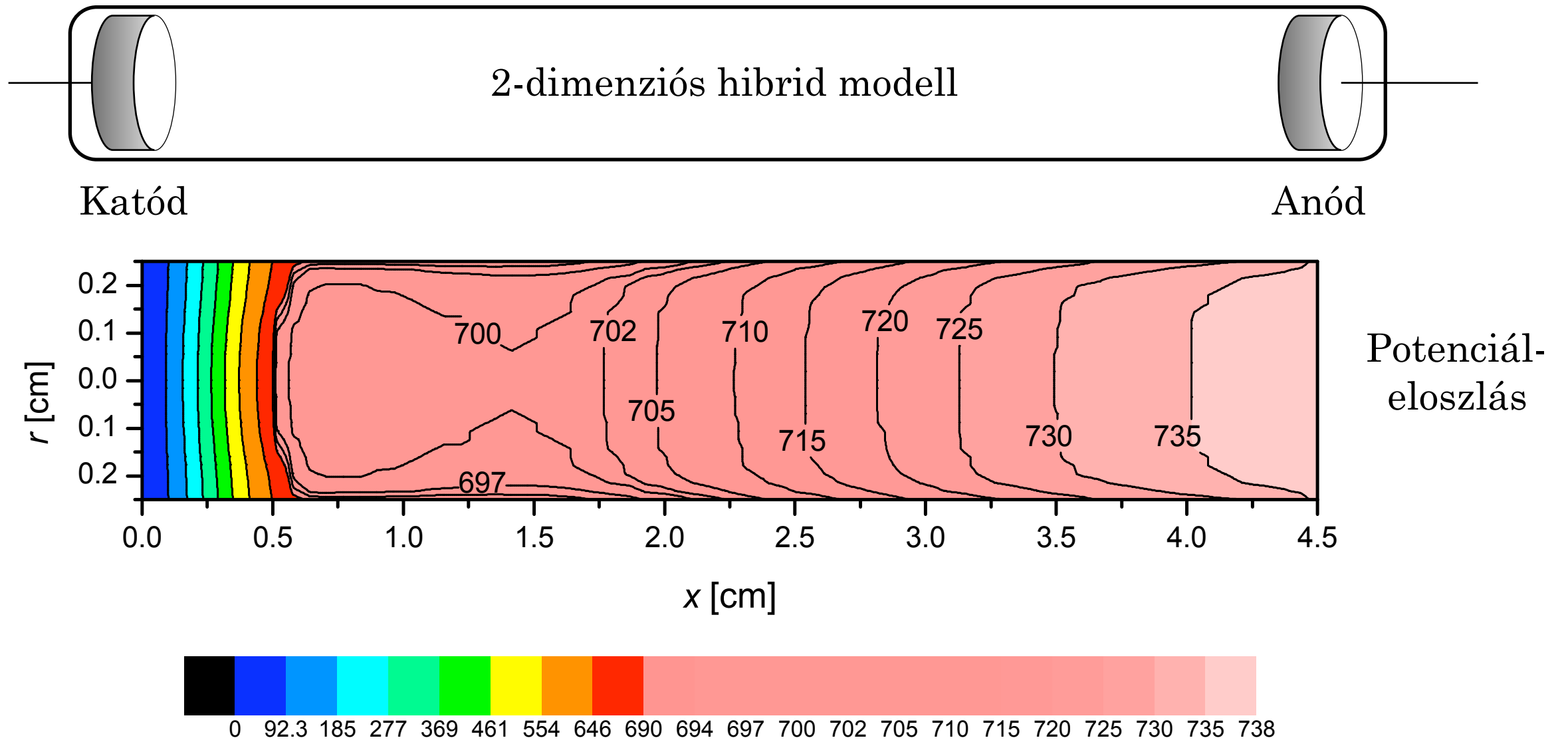
Katód sötéttér      Negatív fény



**Csak a kinetikus szimuláció írja le jól a jelenségeket!**

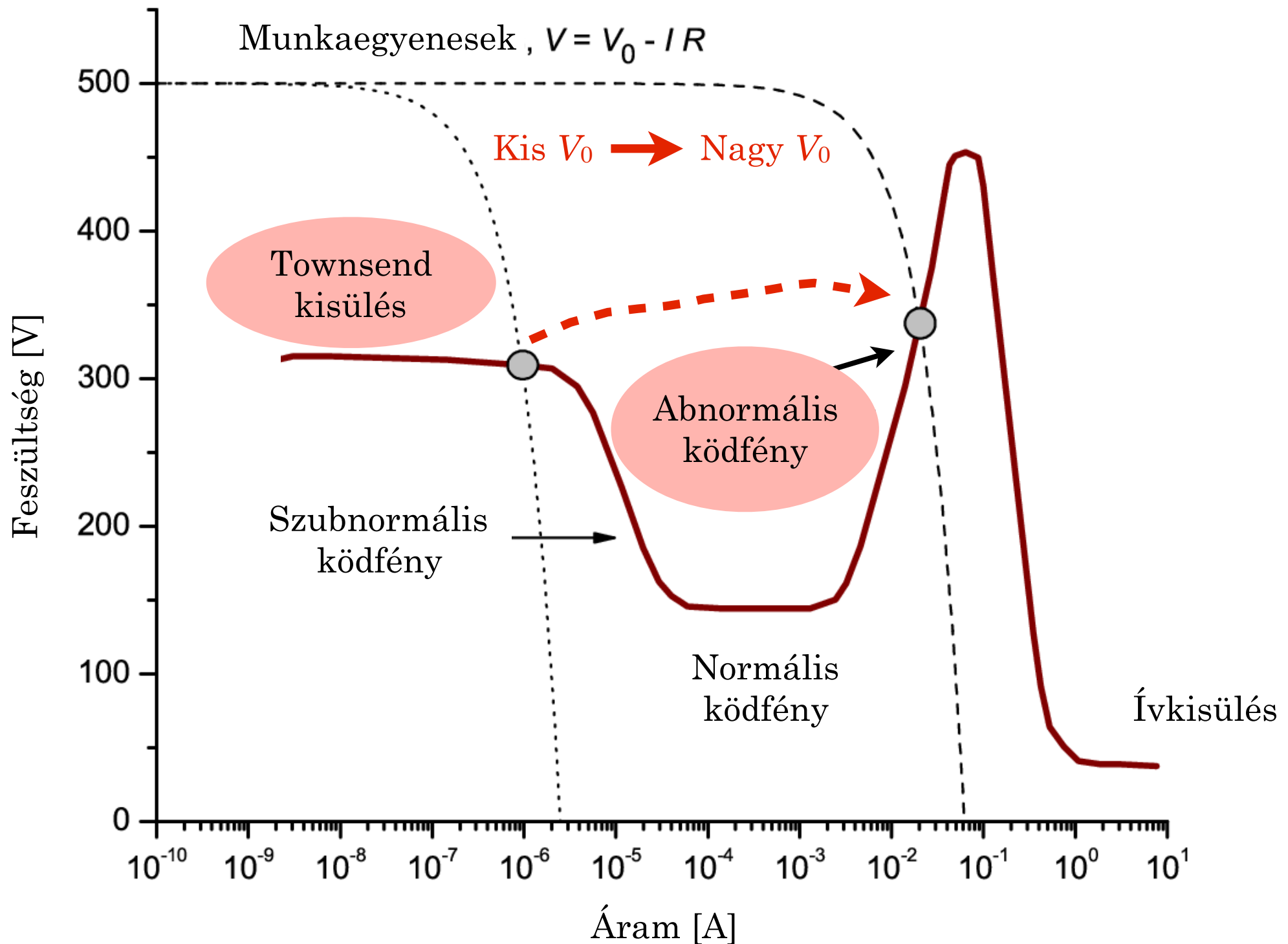


# “Hosszú” gázkisülési cső szimulációja



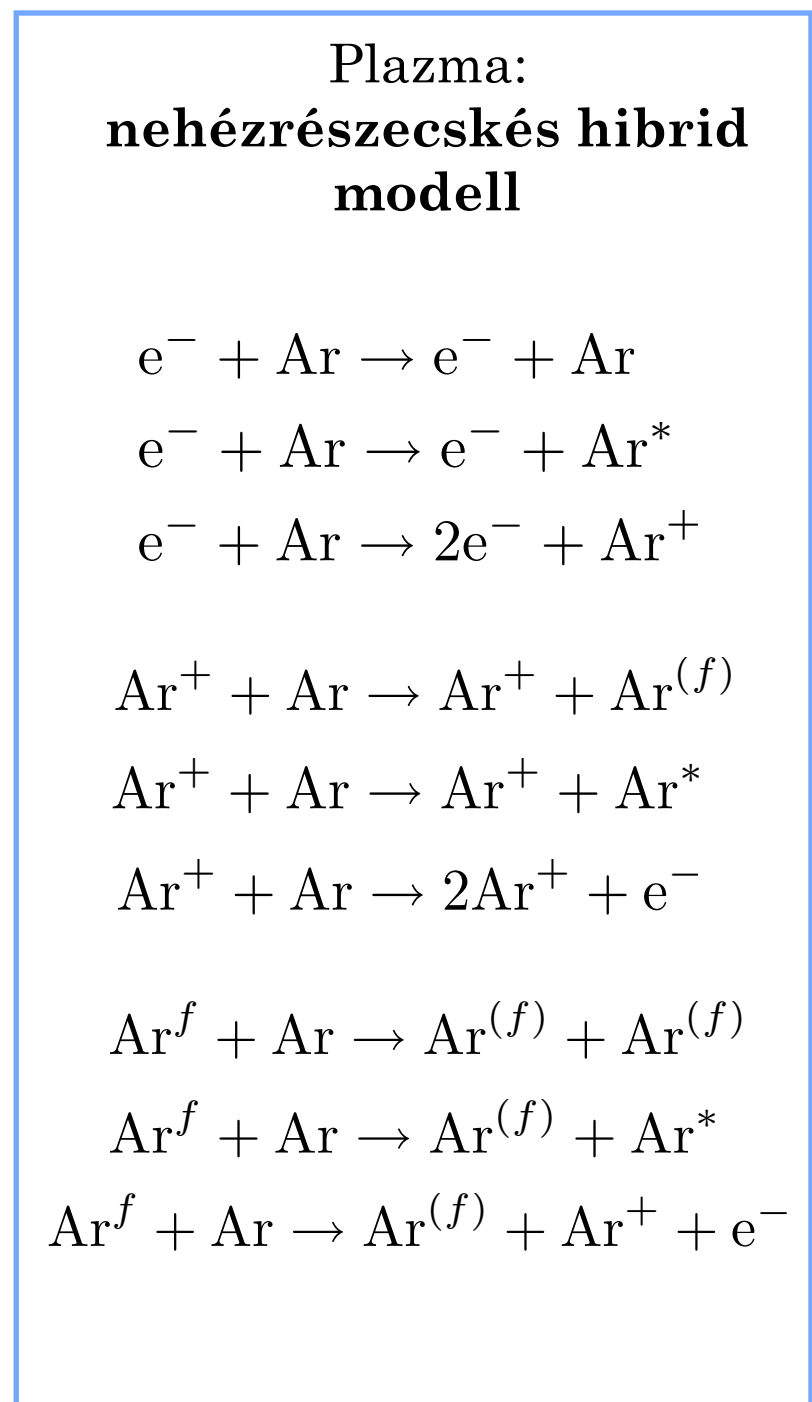
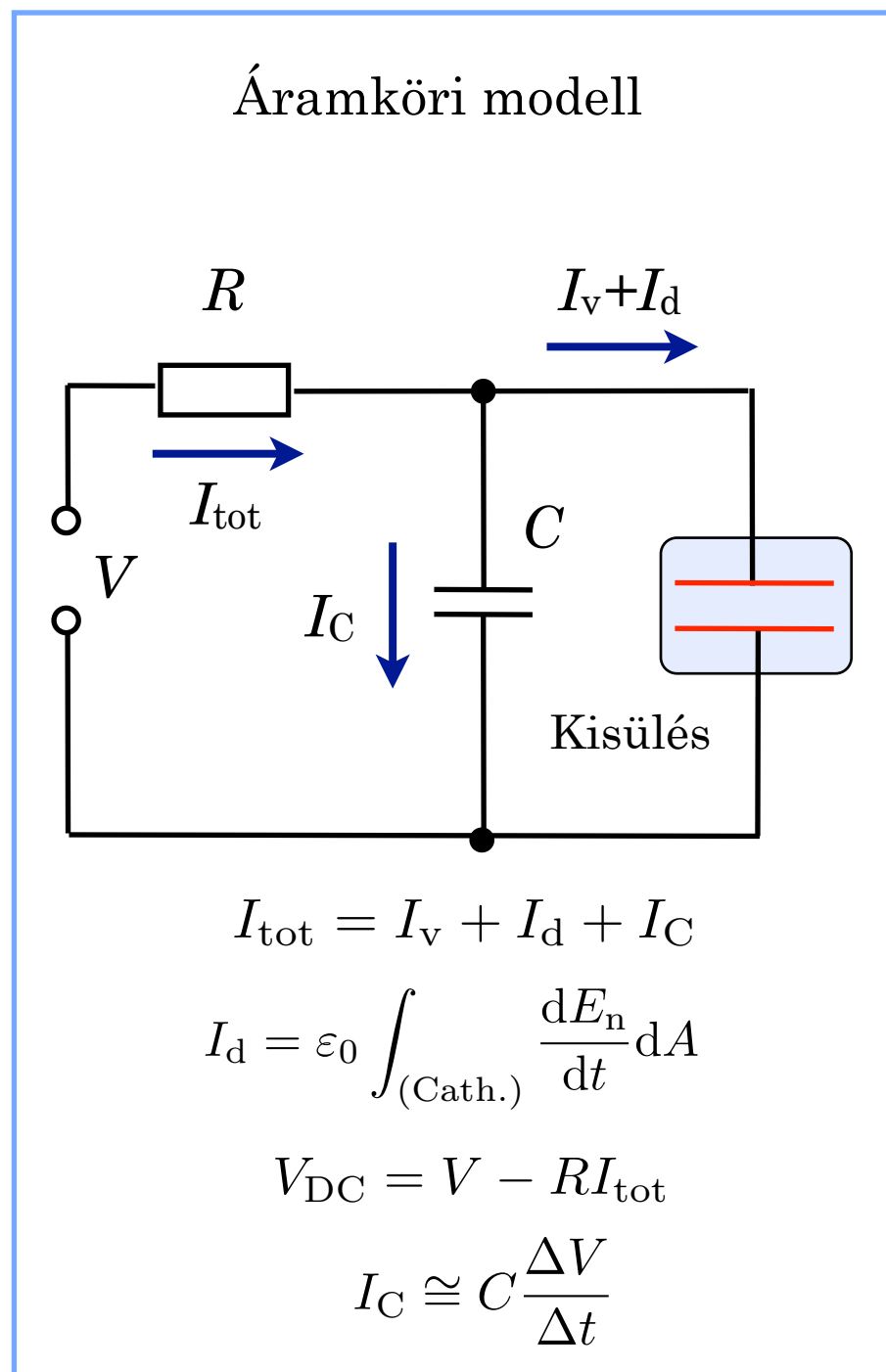
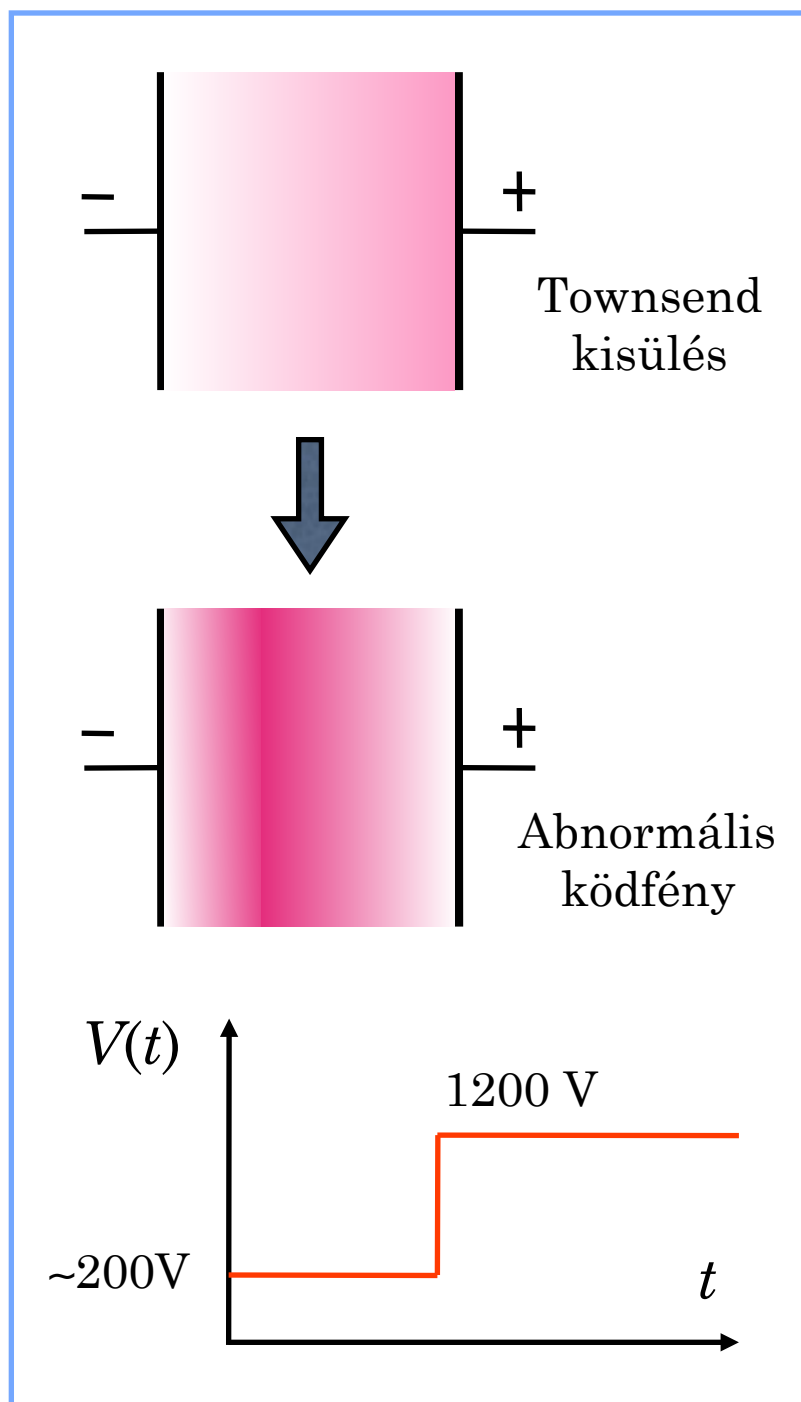
A modell minden karakterisztikus térrészt reprodukál

# Townsend kisülés – abnormális ködfény átmenet



# Townsend kisülés – abnormális ködfény átmenet

Kísérlet: B. M. Jelenković and A. V. Phelps, J. Appl. Phys. **85**, 7089 (1999)

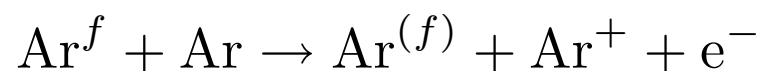
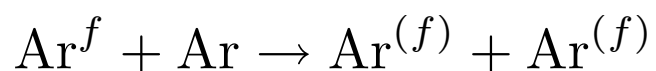
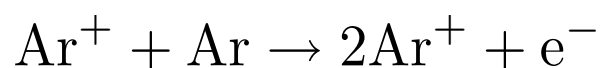
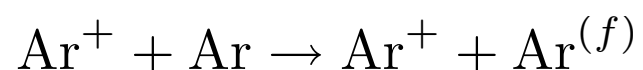
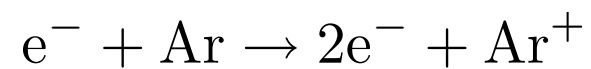


# Townsend kisülés – abnormális ködfény átmenet

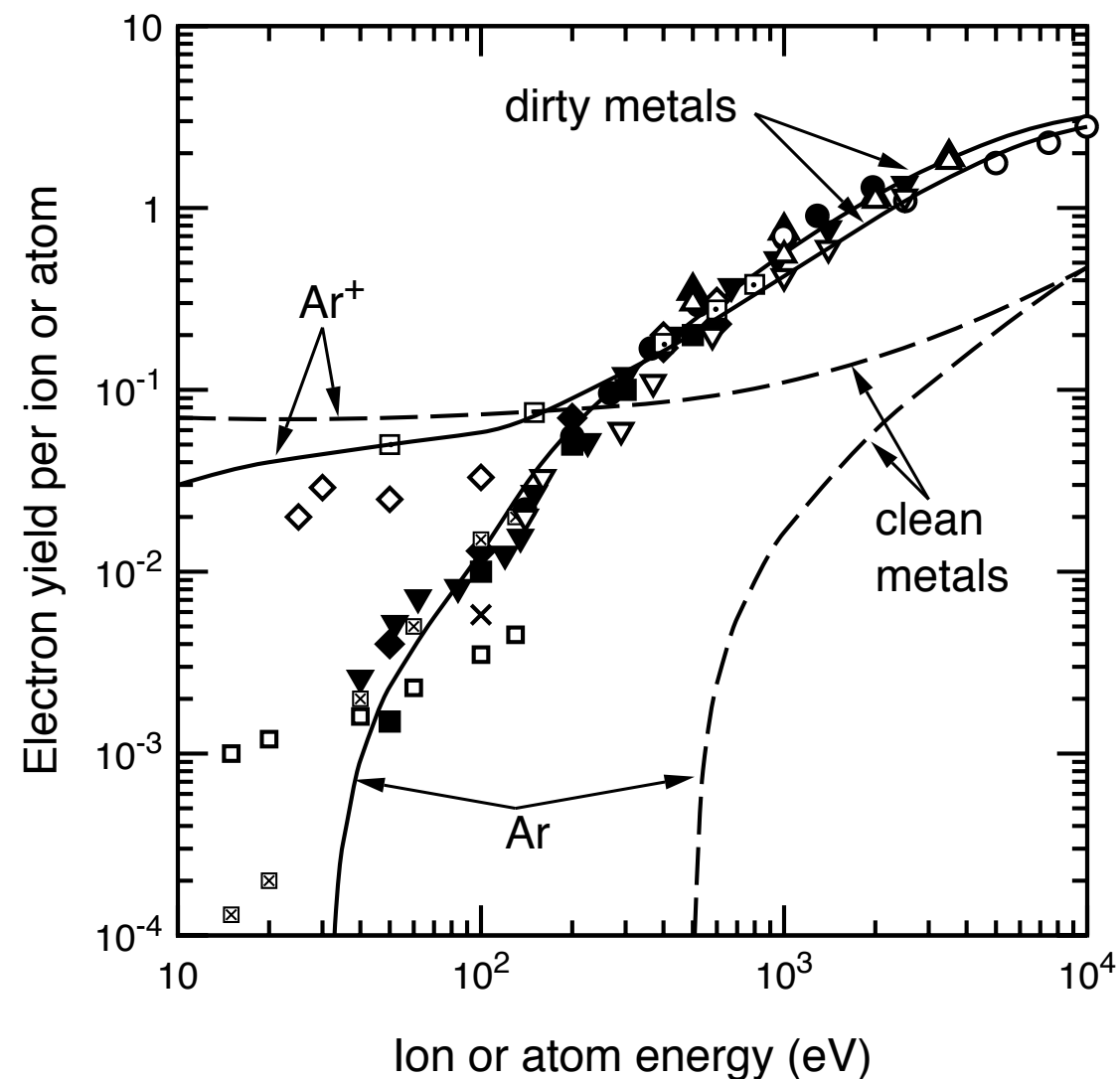
Kísérlet: B. M. Jelenković and A. V. Phelps, J. Appl. Phys. **85**, 7089 (1999)

Felület:

energiafüggő elektronkiváltási együtthatók:

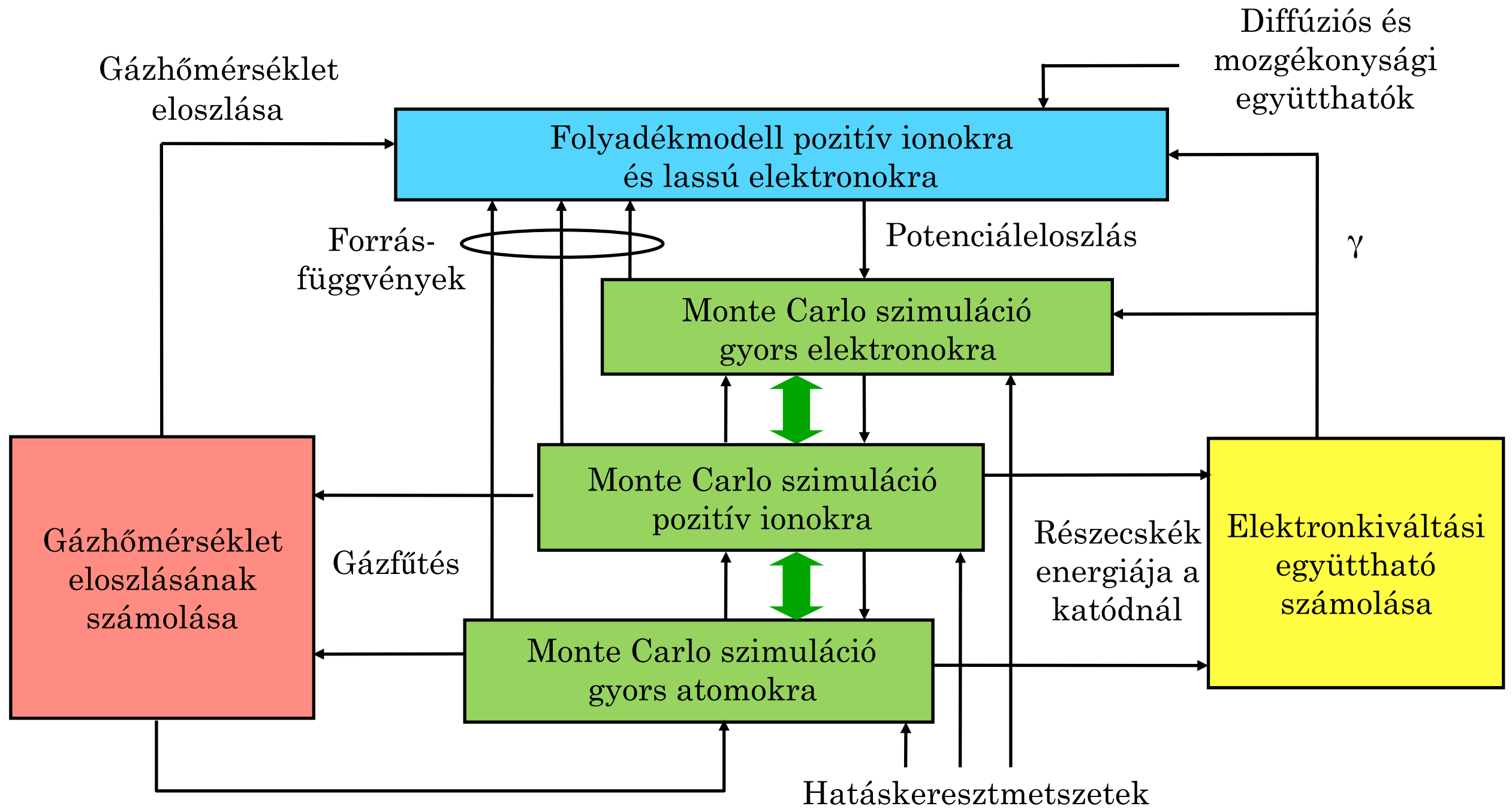



$$\gamma_i(\varepsilon) , \gamma_f(\varepsilon)$$



A. V. Phelps & Z. Lj. Petrovic, PSST 8, R1-R24 (1999)

# Nehézrészecskés hibrid modell

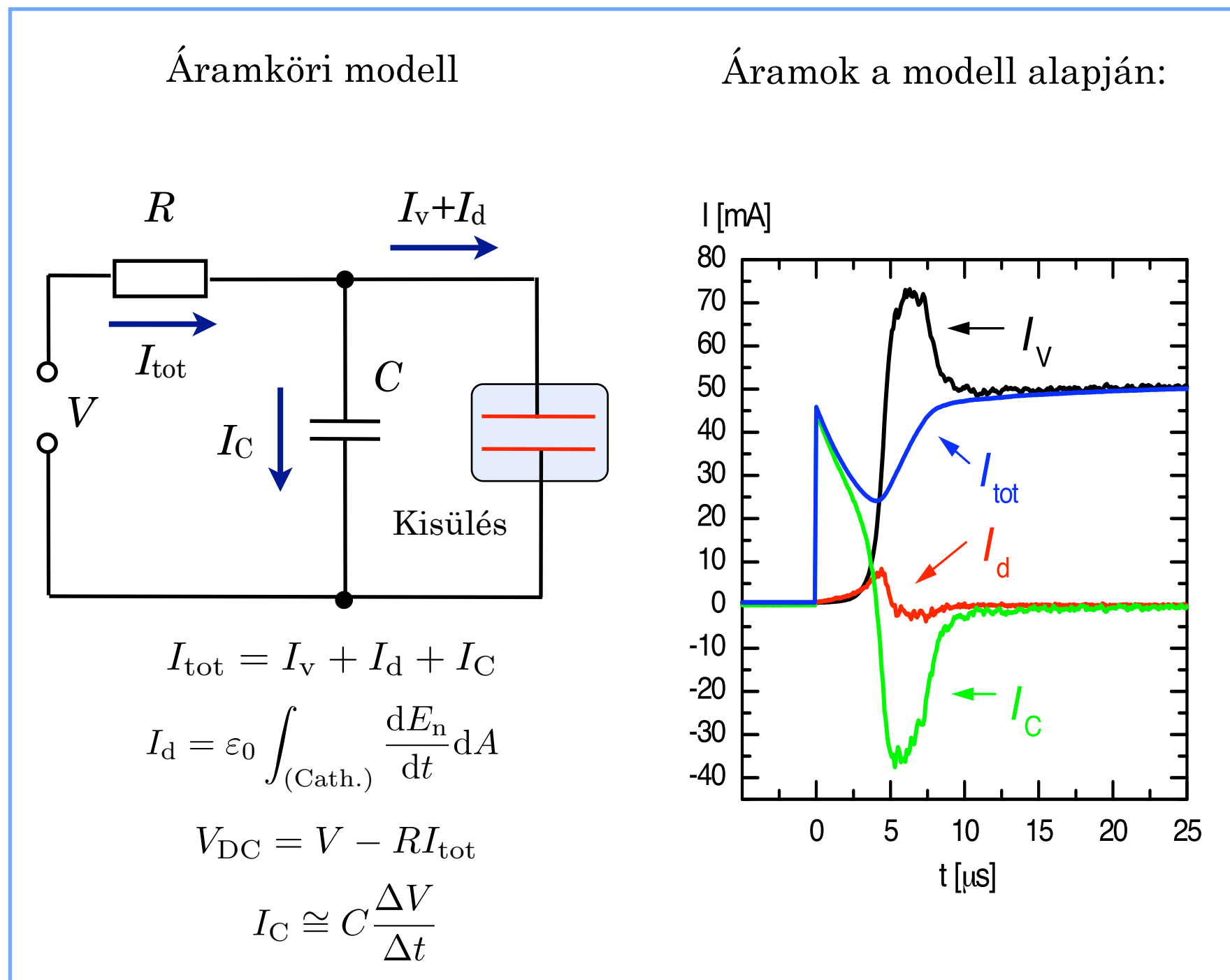
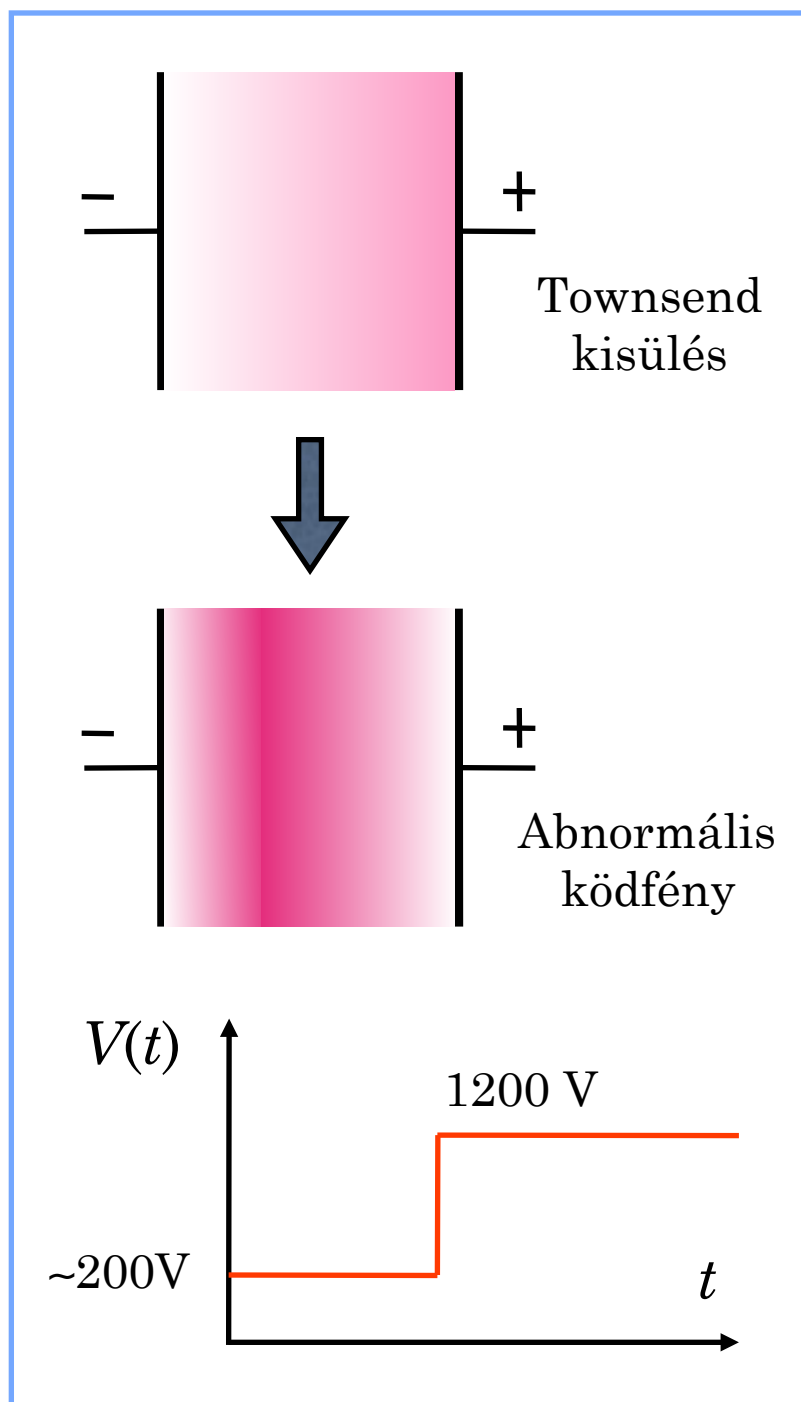


 : új részecskék

Z. Donkó, Phys. Rev. E **64**, 026401 (2001).

# Townsend kisülés – abnormális ködfény átmenet

Kíséret: B. M. Jelenković and A. V. Phelps, J. Appl. Phys. **85**, 7089 (1999)

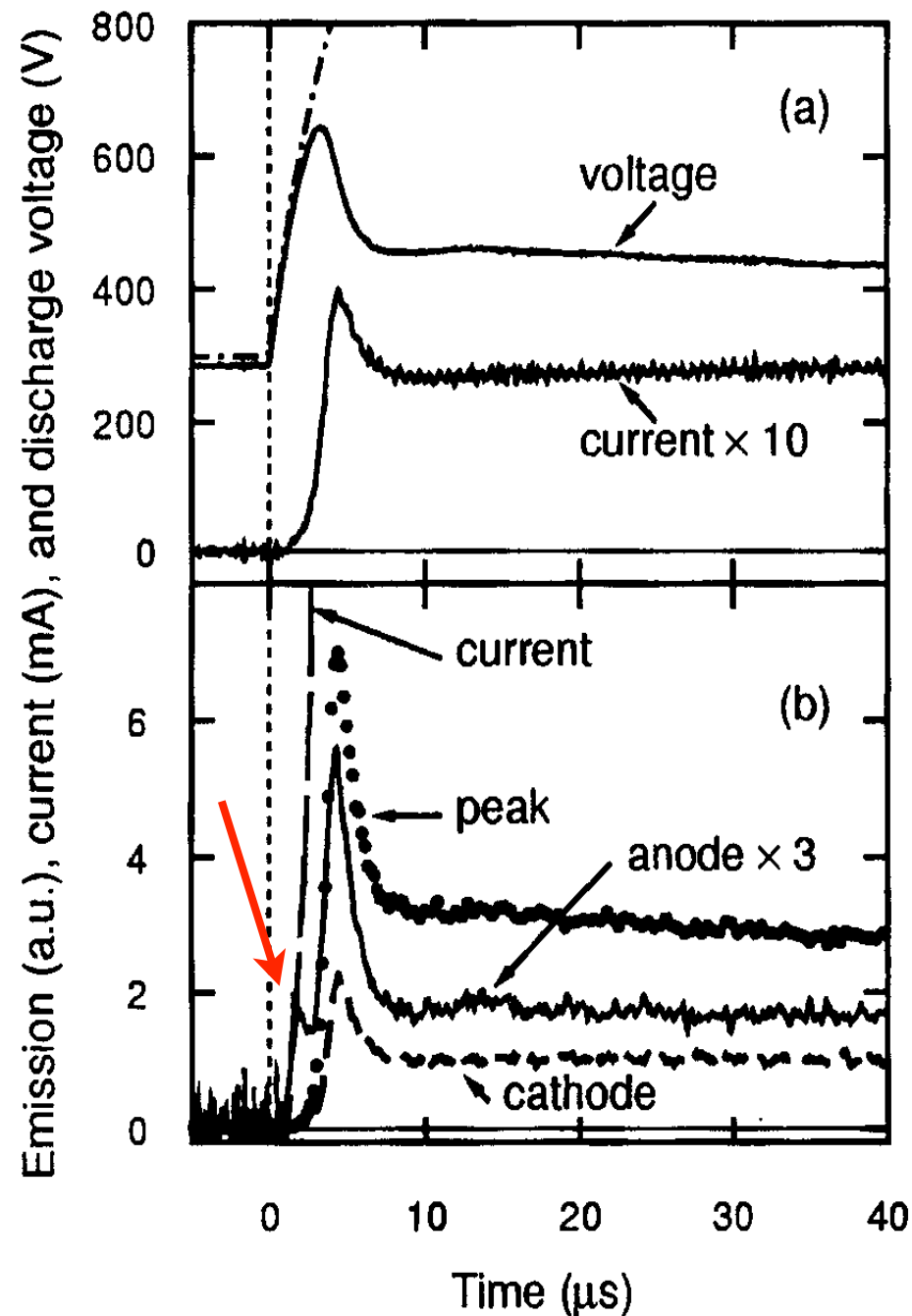
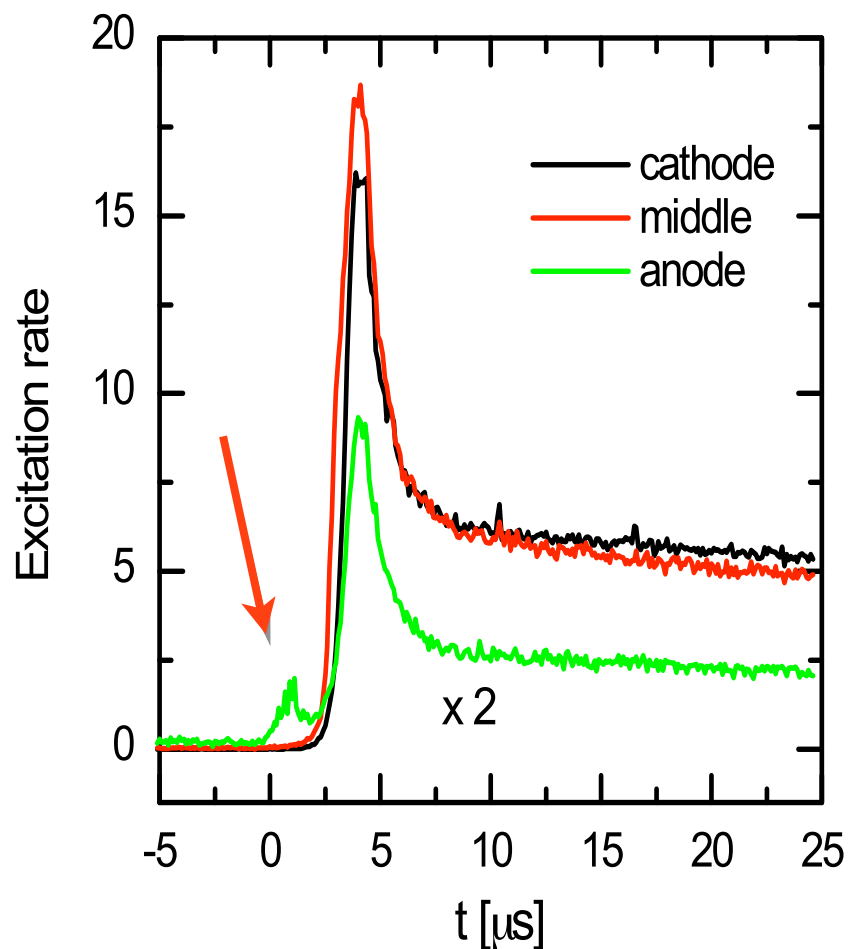


# Townsend kisülés – abnormális ködfény átmenet

## Fényintenzitás hely- és időfüggése

Szimuláció

Mérés



*In Memoriam*  
Art V. Phelps  
(JILA, U Colorado)



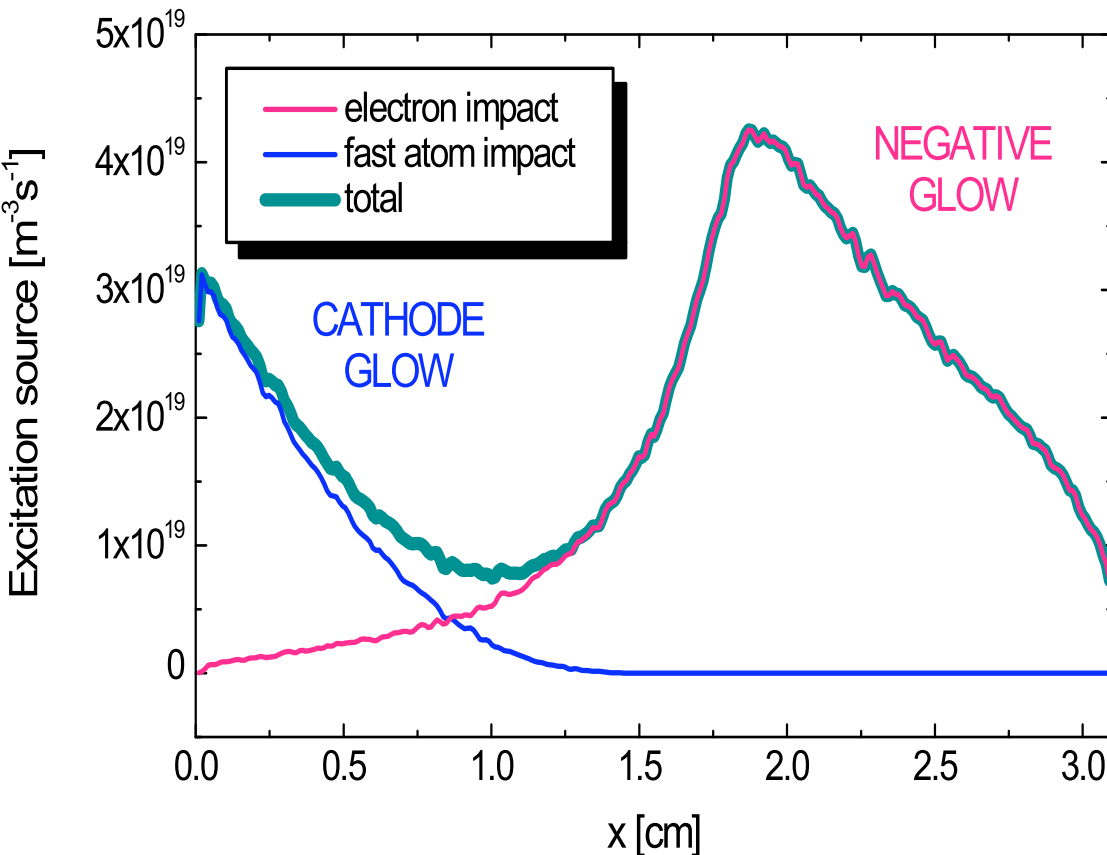
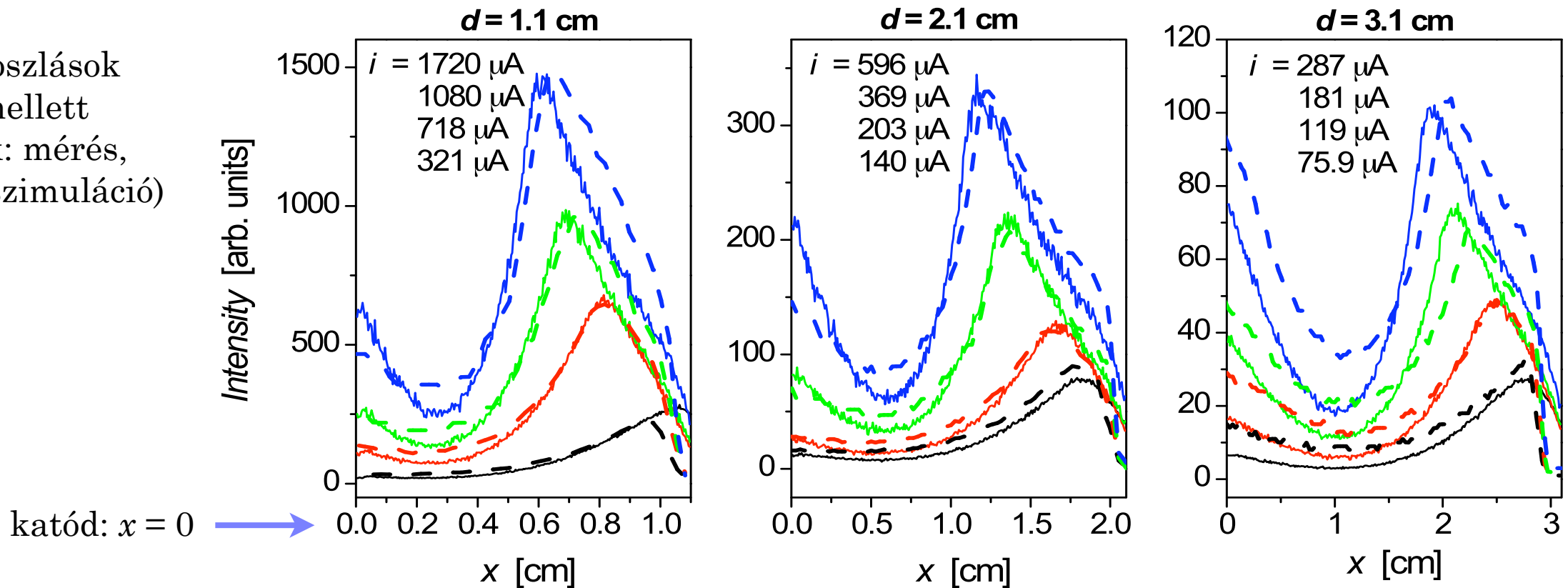
Z. Donkó, J. Appl. Phys. 88, 2226 (2000)

B. M. Jelenković and A. V. Phelps, J. Appl. Phys. 85, 7089 (1999)



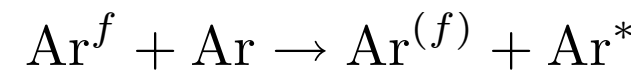
# Nehézrészecskés gerjesztés a katód környékén

Fényintenzitás-eloszlások  
 $pd = 45 \text{ Pa cm}$  mellett  
 (Folytonos vonalak: mérés,  
 szaggatott vonalak: szimuláció)



A fénykibocsátás forrása egyszerűen szétválasztható a szimulációban

**NEGATÍV FÉNY: elektronütközéses gerjesztés**  
**KATÓDFÉNY: gyors atom + Ar ütközések**



D. Marić, P. Hartmann, G. Malović, Z. Donkó, Z. Lj. Petrović,  
 J. Phys. D **36**, 2639 (2003).



# Számonkérés pontjai

- Gázok átütési folyamata, Paschen-törvény származtatása
- Önfenntartó gázkisülések: elektromos karakterisztika és működési módok
- Egyenfeszültségű gázkisülések önkonzisztens numerikus leírása
  - Folyadékmodell (felépítés és tipikus eredmények)
  - Hibrid modell (felépítés és tipikus eredmények)