

Donkó Zoltán

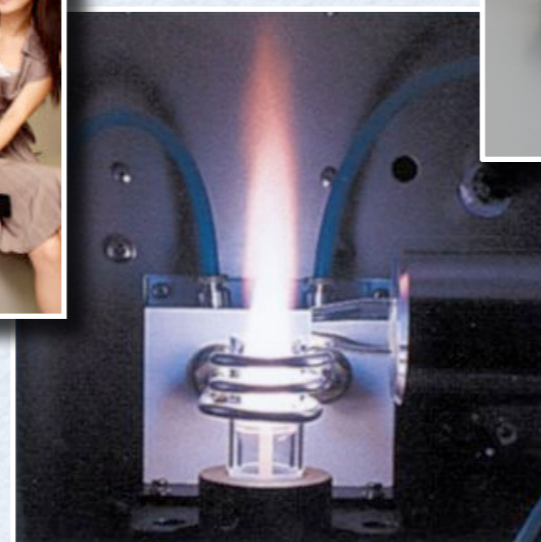
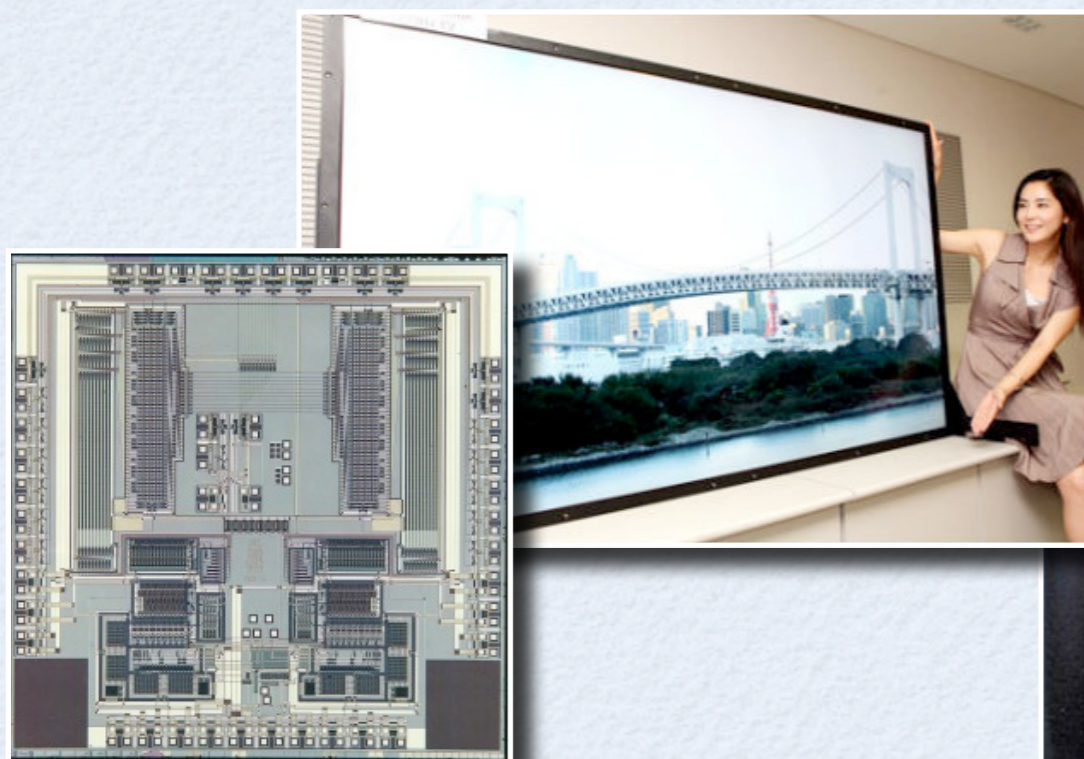
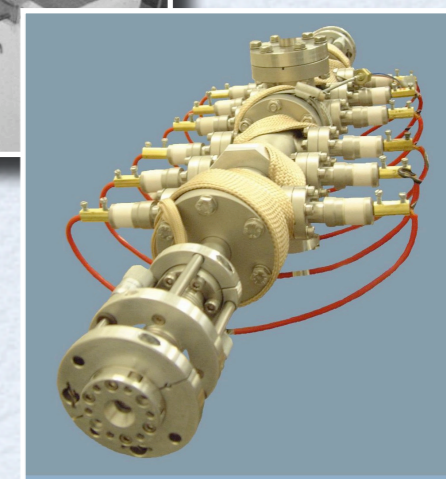
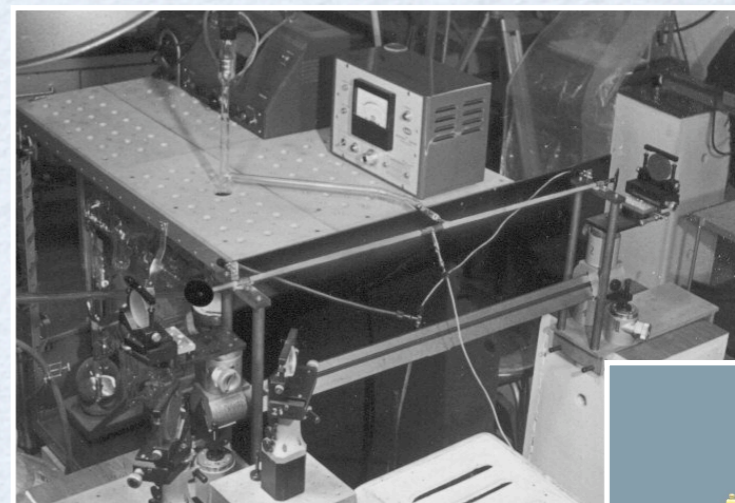
Rádiófrekvenciás plazmák szimulációja: Hogyan dolgoztassuk az ionokat?

Magyar Tudományos Akadémia
Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Együttműködésben a Bochumi Ruhr Egyetem (RUB) Plazma- és Atomfizikai Intézetével

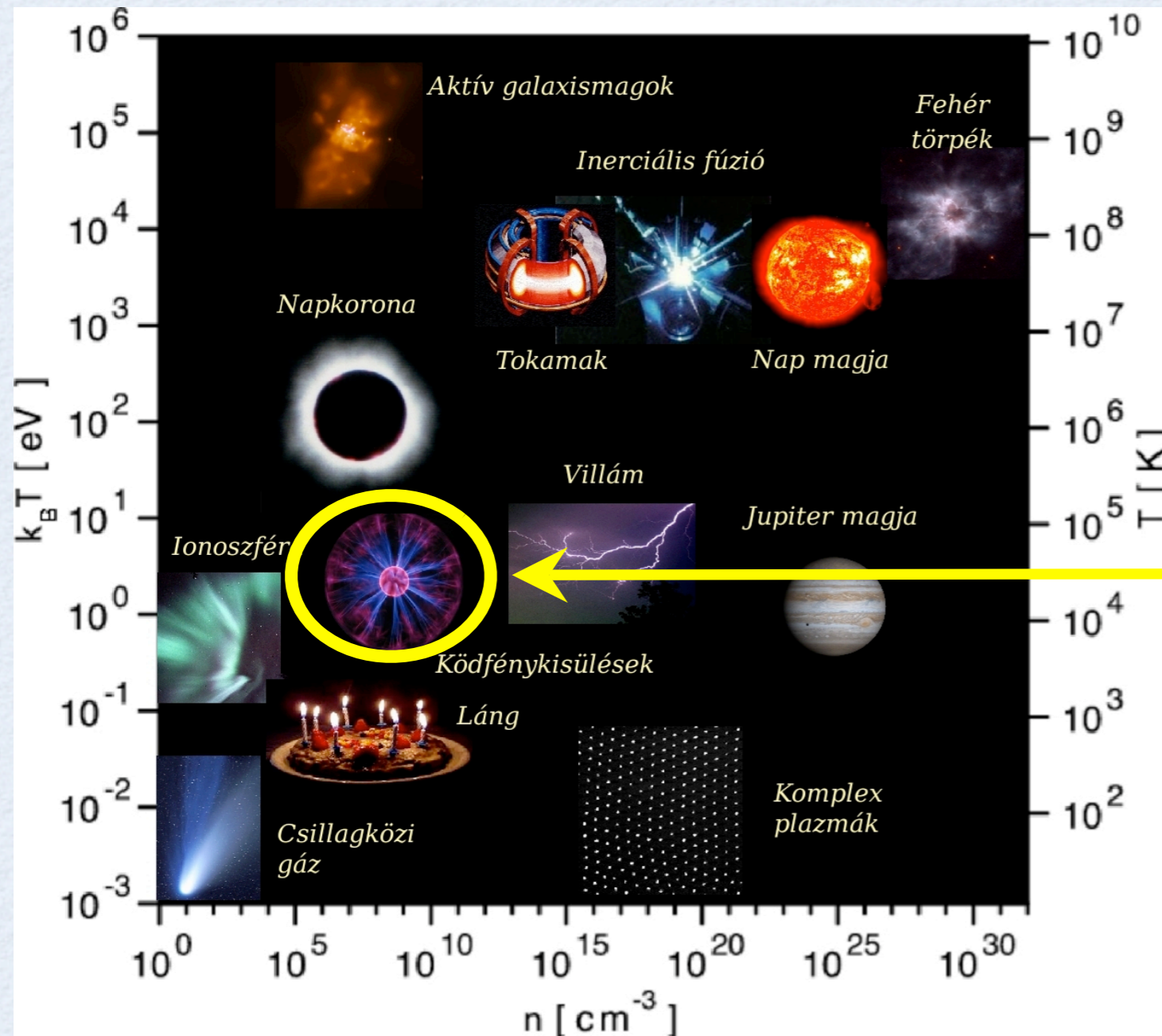
Rádiófrekvenciás plazmák szimulációja: Hogyan dolgoztassuk az ionokat?

- * Elektromos gázkisülések és alkalmazásaik
- * Gáz átütése
- * Plazma-felület kölcsönhatás
- * Egyenáramú / Rádiófrekvenciás gázkisülések
- * Modellelés - szimuláció módszerei
- * Ionfluxus / Ionenergia szabályozása



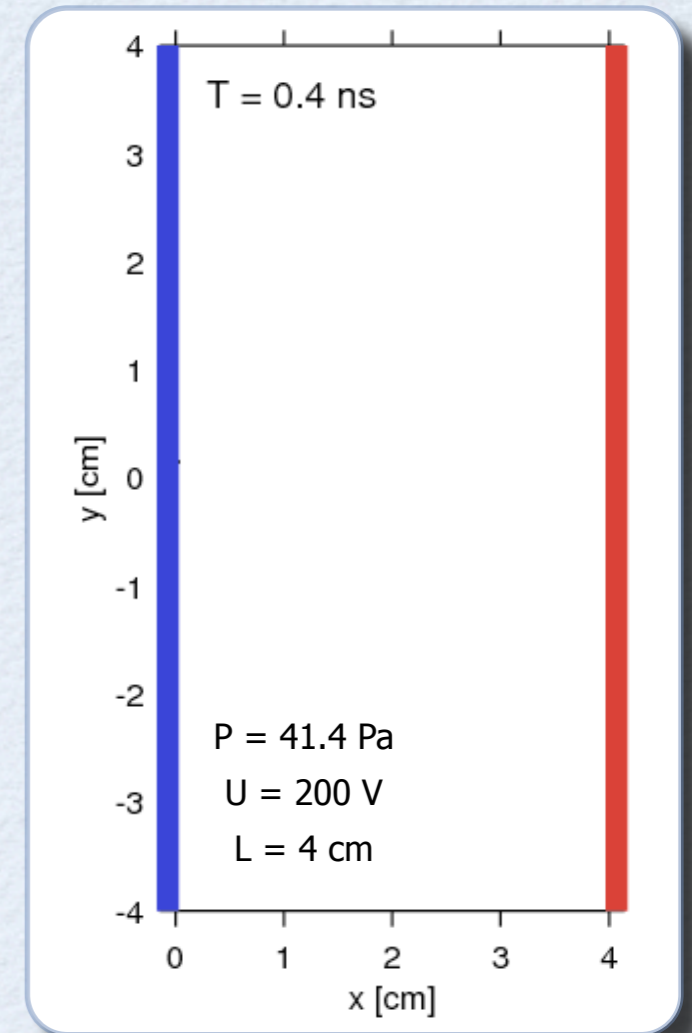
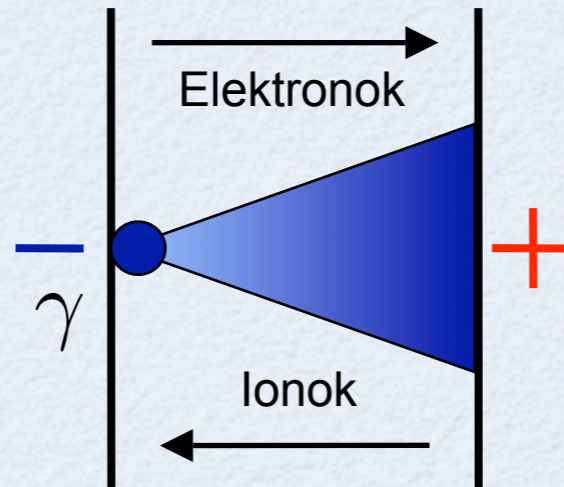
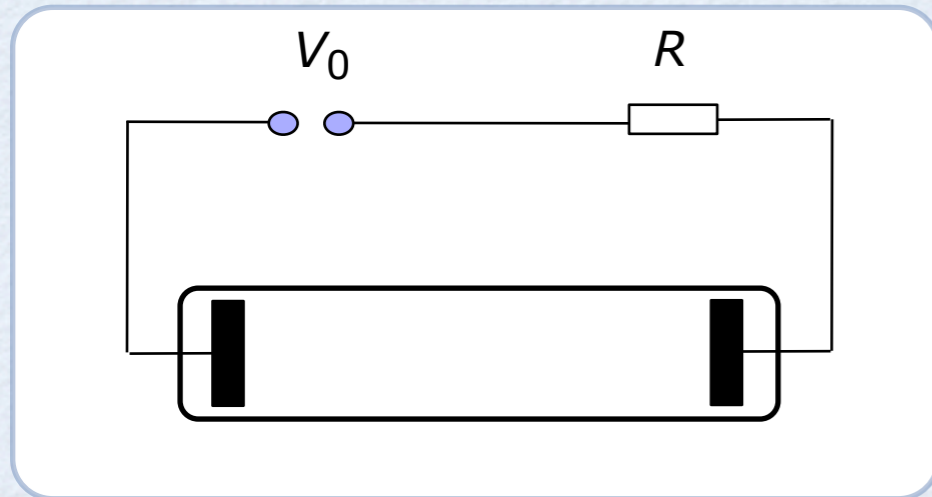
Ködfénykisülések jellemzői:

- * $T_g < 1000$ K
- * Alacsony ionizáltsági fok
- * Elektronütközéses ionizáció
- * Plazma elektronjai: 1 -10 eV
- * Plazma ionjai: $kT_g - 0.1$ eV
- * Ionok az elektródáknál : 10 – 1000 eV



Itt vagyunk!

A gáz átütése: hogyan lesz a szigetelőlőből vezető?



- * Szereposztás: (1) elektronok [tényleg az “elsők”], (2) ionok [akik most minket legjobban érdekelnek], ...
- * → Homogén elektromos tér (1D), elektródák L távolságra (egyszerű??)
- * Elektronok ütközési folyamatai: rugalmas, gerjesztés, ionizáció
- * Töltésreprodukció: gázfázis és felület
- * Elektronlavinák:
$$N^- = N_0^- \exp(\alpha x)$$

* Az elektronok száma az anódnál: $N^-(L) = N_0^- \exp(\alpha L)$

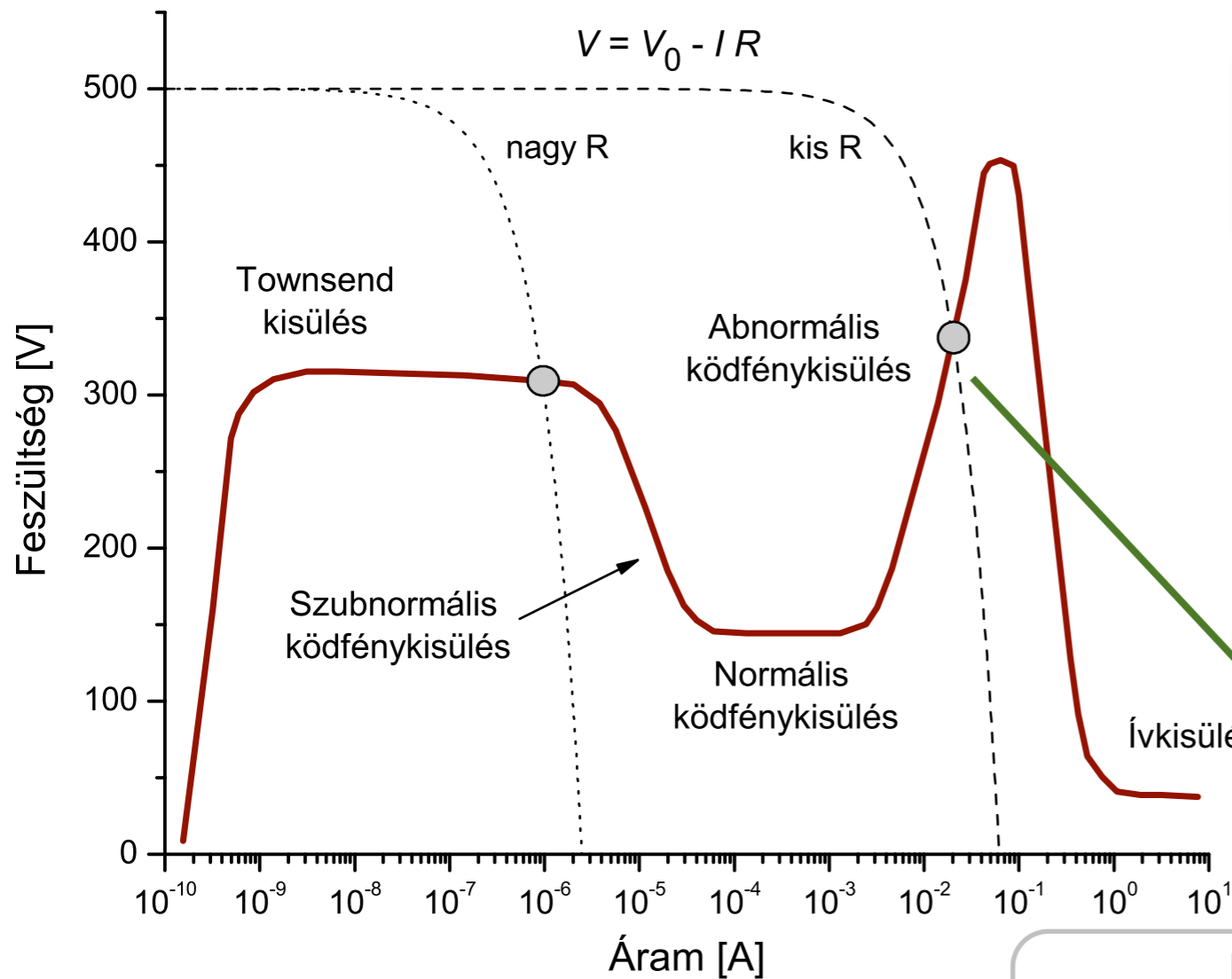
* A keltett ionok száma: $N^+ = N_0^- [\exp(\alpha L) - 1]$

* Átütés feltétele: $\gamma N^+ = N_0^- \rightarrow \gamma [\exp(\alpha L) - 1] = 1$

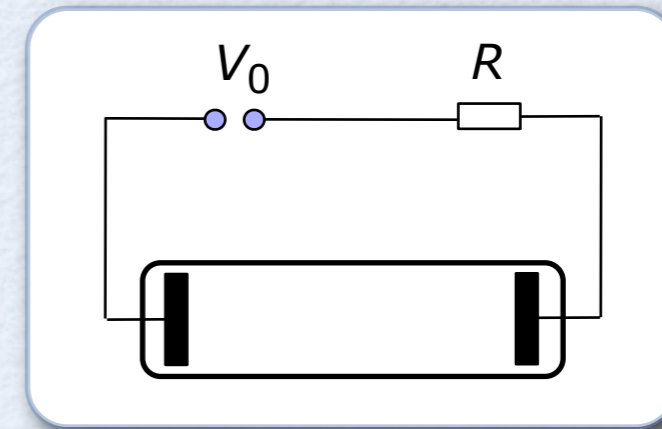
KÉT MEGHATROZÓ MECHANIZMUS:

IONIZÁCIÓ - α : Townsend-féle ionizációs együttható
 ELEKTRONKIVÁLTÁS - γ : elektronkiváltási együttható

Egyenáramú gázkisülések / külső áramkör

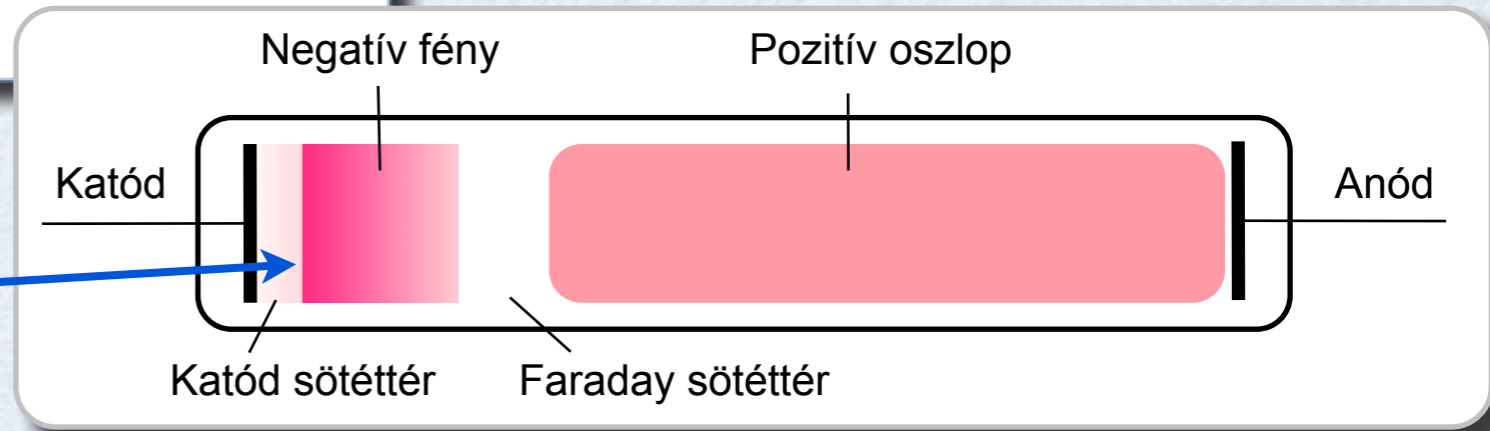


A kialakuló gázkisülés fajtája függ a külső áramkörtől



Ködfénykisülés

Az igazán izgalmas dolgok itt játszódnak le



Felületi (katódi) folyamatok

ITT DOLGOZNAK AZ IONOK

Elektronemisszió

Porlasztás

Katód

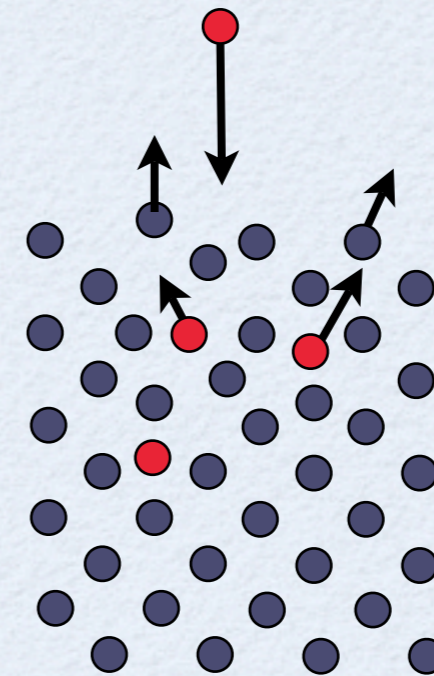


Ionok
Gyors atomok
Felülettel kémiaailag reagáló gyökök

$$P = \gamma(\varepsilon)$$

Folyamatok:

- potenciális kilökődés
- kinetikus kilökődés
- fotoemisszió
- téremisszió

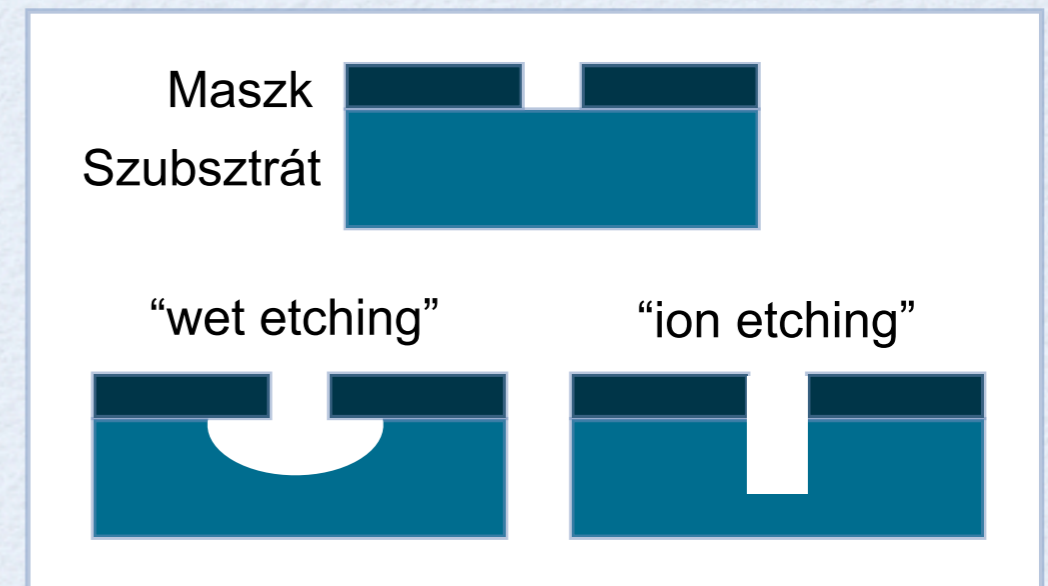


Fizikai porlasztás (sputtering)
Kémiai porlasztás (etching)

A feladat: olyan geometriát, gerjesztési módot, működési paramétereket találni, amelyek mellett az *ionok* úgy dolgoznak, ahogy *mi* szeretnénk....

Plazma alapú felületmódosítás - plazmakémia

- * Rétegleválasztás
 - * vékonyrétegek leválasztása (pl. gőzfázisú leválasztás, magnetronos porlasztás)
 - * multirétegek leválasztása
- * Felületmarás
 - * chipgyártás Si, SiO₂
- * Felületi kötések módosítása
 - * biokompatibilitás, hidrofil/hidrofób tulajdonság változtatása
- * Vezető / szigetelő minták, illetve elektródák → RF
- * RF gerjesztés:
 - * Szélesebb működési paramétertartomány
 - * Nagyon stabilitás nagy méretek mellett



Plazma-felület kölcsönhatás - mikroelektronika

* Mikroelektronikai forradalom

- * egy chipen lévő tranzisztorok száma 1.5-2 évente megduplázódik (1959 óta)
- * egymilliószoros árcsökkenés azonos teljesítményre
- * a technológiai lépések jelentős része plazma alapú !!



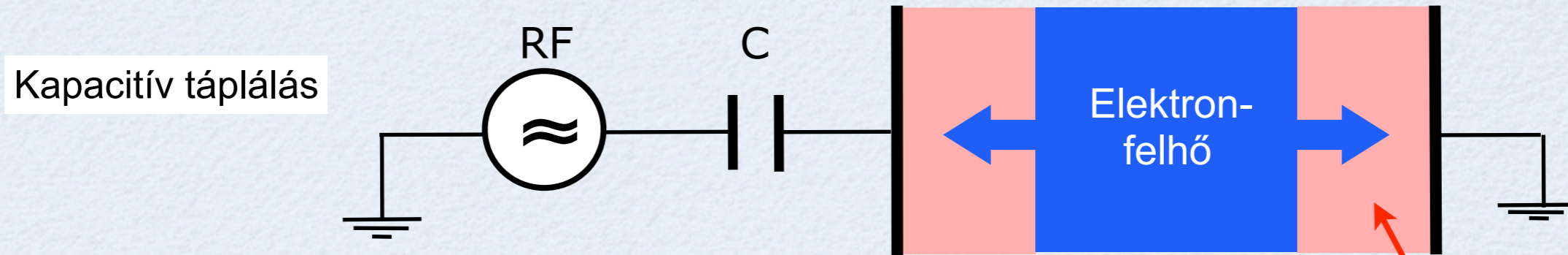
$$$$$ = \frac{1}{(R_{SV})^\alpha}$$



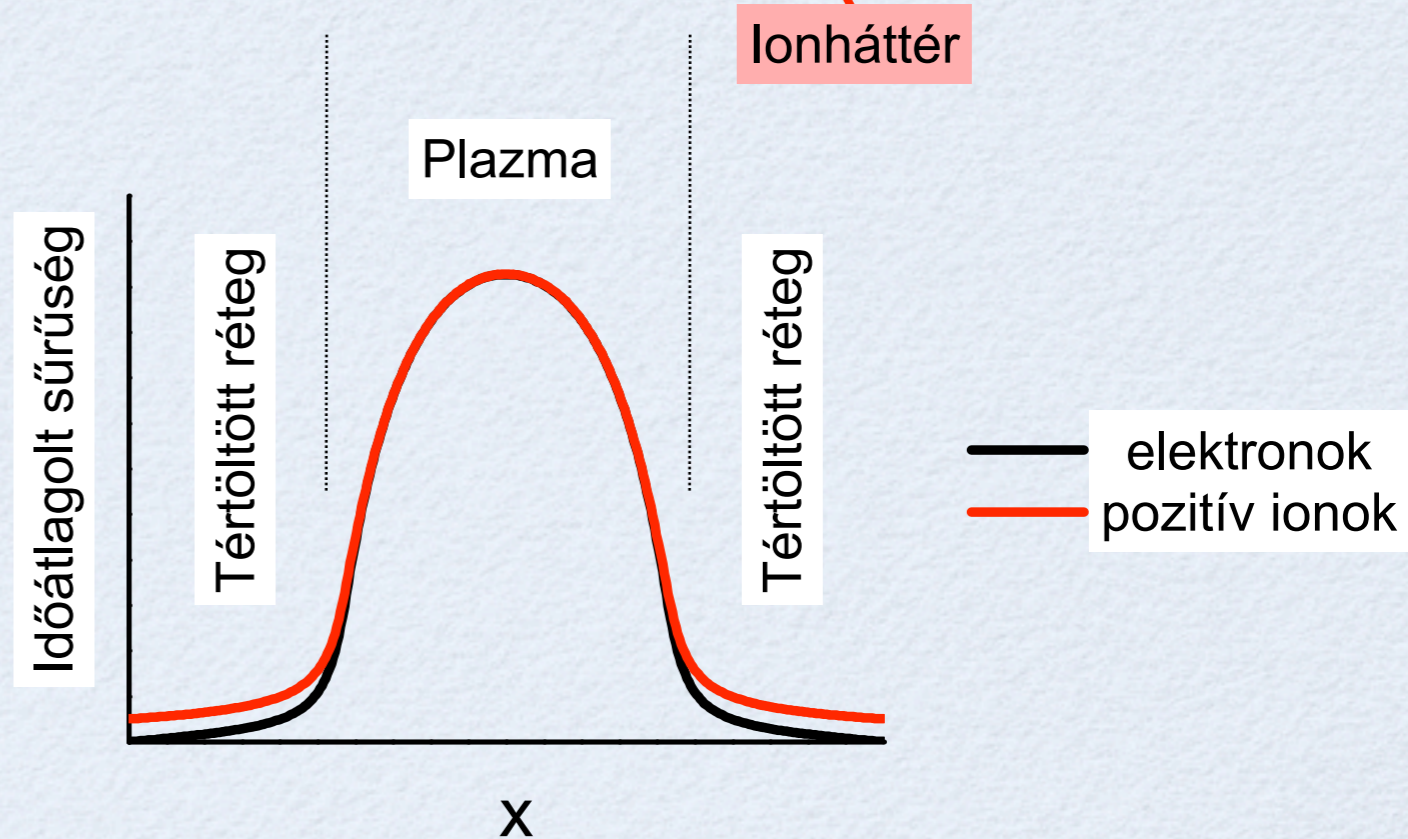
* Autóipari analógia

- * 60 millió mérföld/óra
- * 20 millió mérföld/gallon
- * olcsóbb lenne kidobni, mint parkolást fizetni
- * az autó 3 mm hosszú és 1 mm széles lenne
- * naponta 3-szor robbanna le

Rádiófrekvenciás (gerjesztésű) gázkisülések



- * A mozgékony elektronok követik az elektromos tér változását, oszcillálnak a két elektróda között és eközben energiát nyernek → ionizáció
- * Az ionok az elektromos térerősség időátlagát “érik”
- * Az elektródák közelében tértöltött tartományok jelennek meg
- * A kisülés “közepét” kvázisemleges plazma tölti ki
- * Szimmetrikus / aszimmetrikus konfigurációk



Rádiófrekvenciás kisülés kizárólag α mechanizmussal is fenntartható - nem feltétlenül szükséges elektronemisszió az elektródákról

Az ionok a tértöltött rétegen való áthaladáskor nyernek energiát, ezért a réteg vastagsága és az áthaladás időtartama kulcsfontosságú

Rádiófrekvenciás gázkisülések leírása

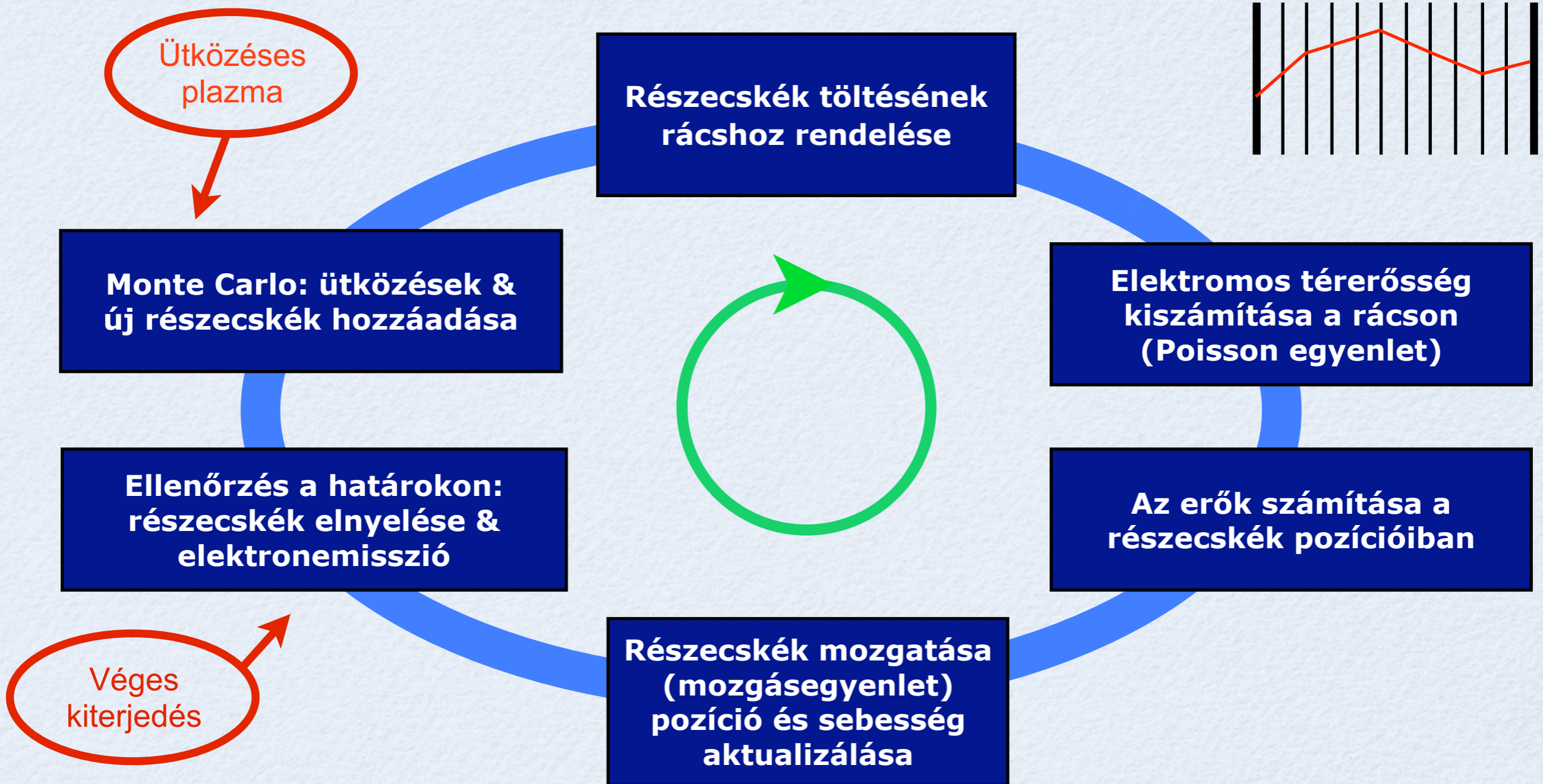
- * Folyadék leírás:
 - * kontinuum
 - * elektron- és ionfolyadék
 - * egyensúlyi (lokális transzport)

- * Hibrid modellek:
 - * folyadék leírás + Monte Carlo szimuláció (pl. gyors elektronokra)

- * Particle-in-Cell modell:
 - * részecskékkel dolgozik
 - * teljesen kinetikus leírás
 - * ötlet #1: a nagy számú részecske követése lehetetlen, használjunk “szuperrészecskéket”, amelyek nagyszámú valódi részecskét reprezentálnak!
 - * ötlet #2: mivel a szuperrészecskék páronkénti kölcsönhatásának figyelembevétele is reménytelen, írjuk le a kölcsönhatásukat egy rácson számolt potenciálon keresztül!

Míg az ipari folyamatoknál reaktív gázokat (Cl_2 , CF_4 , ...) használnak, itt nemesgázokra mutatjuk be a jelenségeket.

“Particle in Cell & Monte Carlo” (PIC/MCC) szimuláció

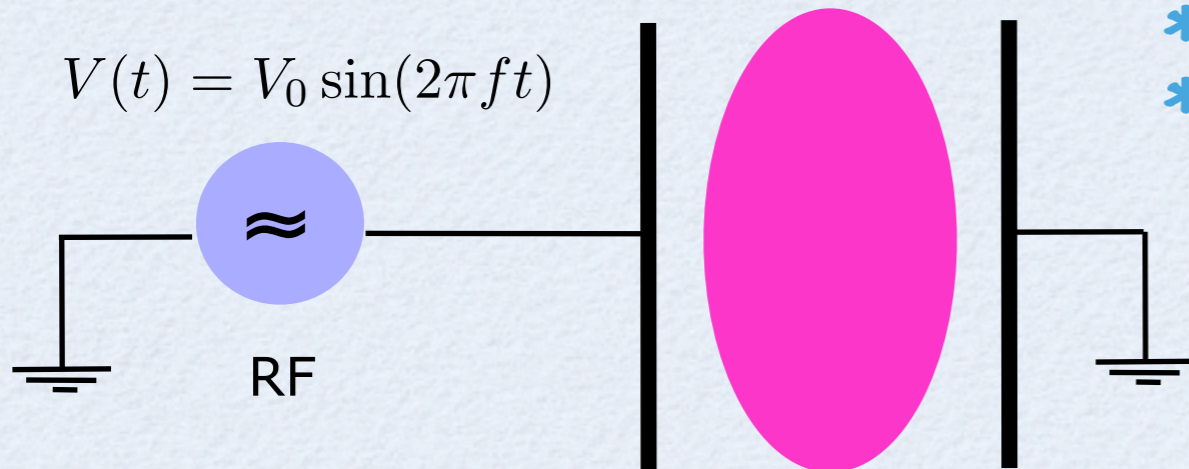


e.g. C. K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci, 19 (1991)

M. M. Turner: Phys. Plasmas 13, 033506 (2006)

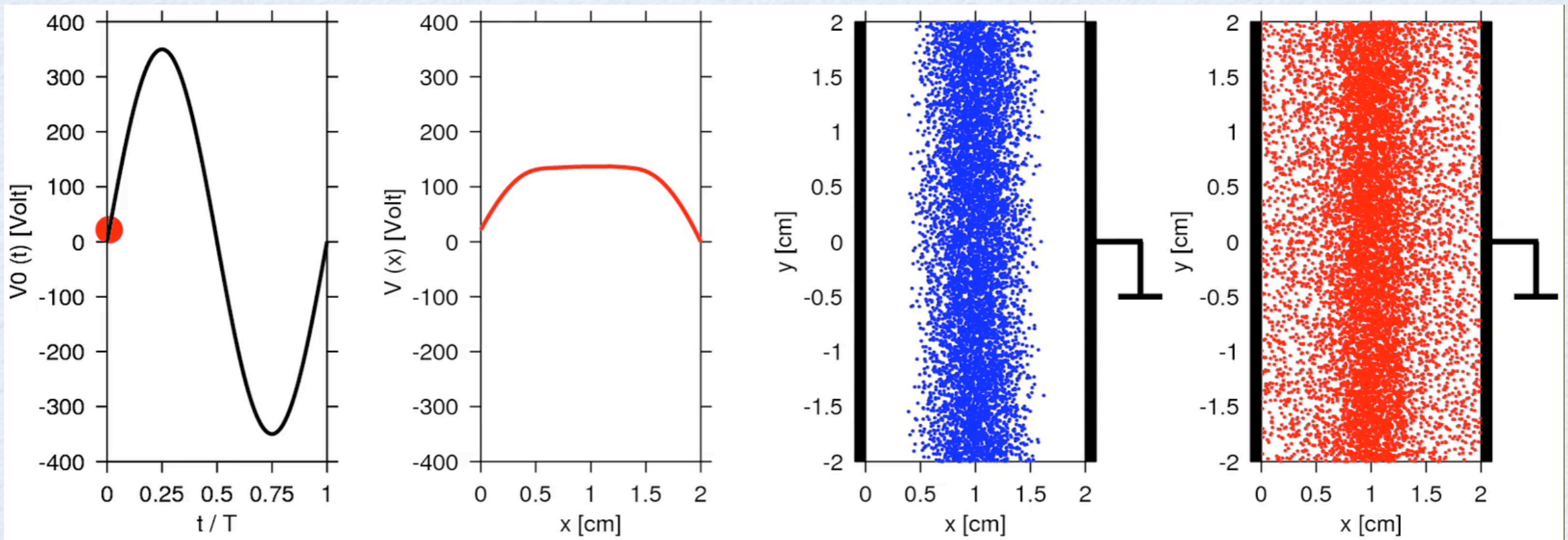
We ❤️ PIC/MCC

Rádiófrekvenciás gázkisülés PIC szimulációja

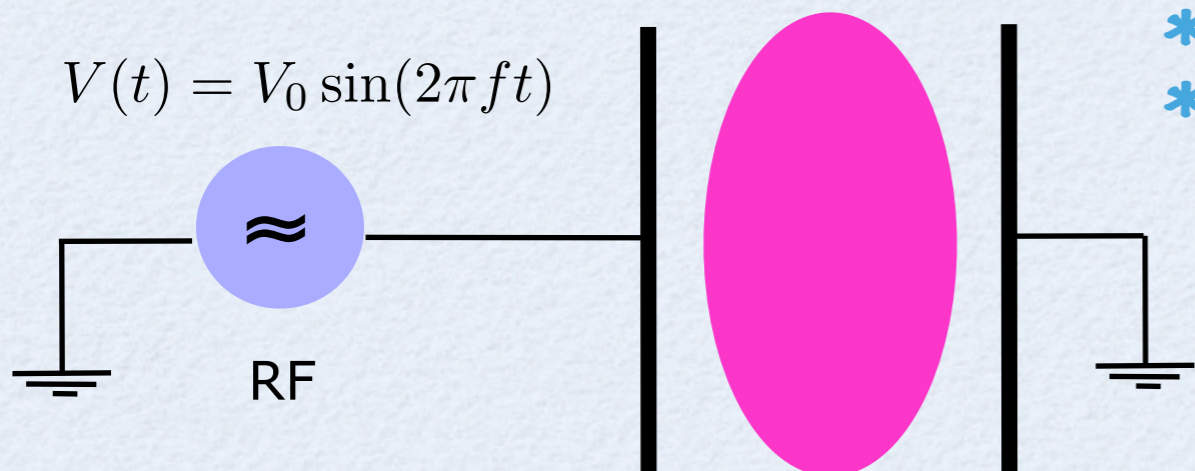


- * Részecskék: elektronok és Ar^+ ionok
- * Folyamatok:
 - * elektronok: rugalmas ütk., gerjesztés, ionizáció
 - * ionok: izotróp szórás és tötés-kicserélő ütközések

Ar @ p = 50 mTorr, f = 13.56 MHz, V = 350 V

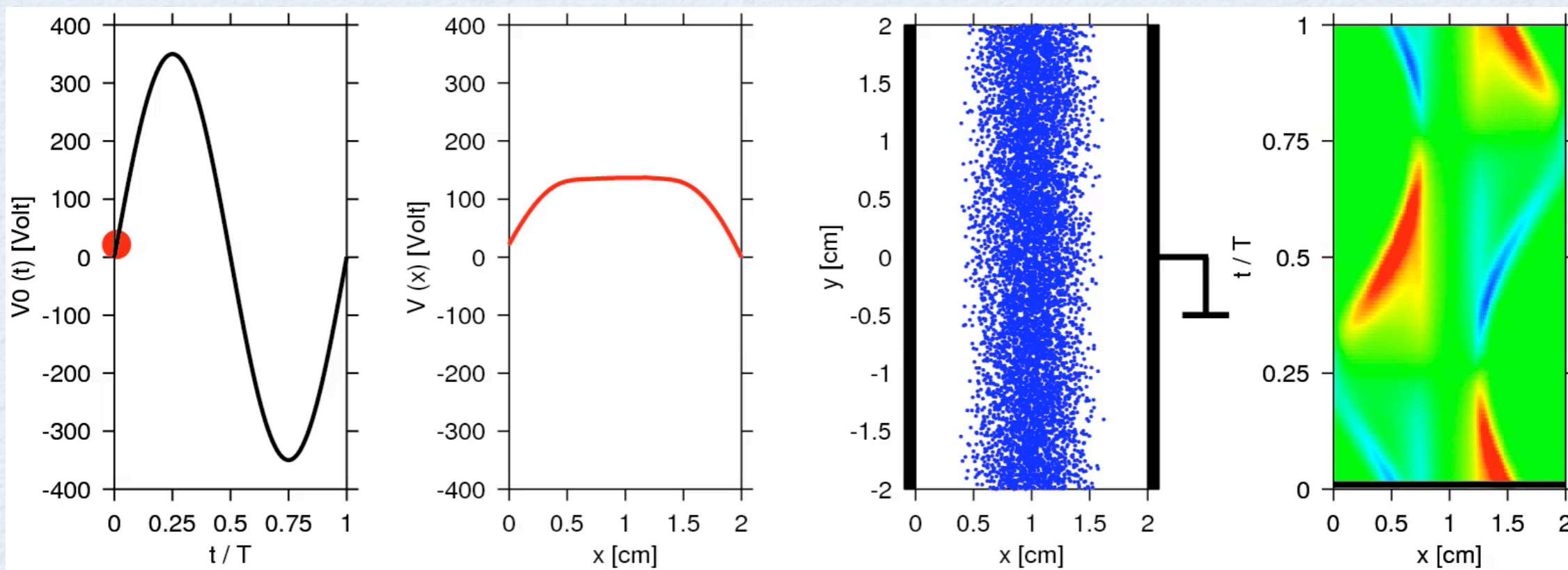


Rádiófrekvenciás gázkisülés PIC szimulációja



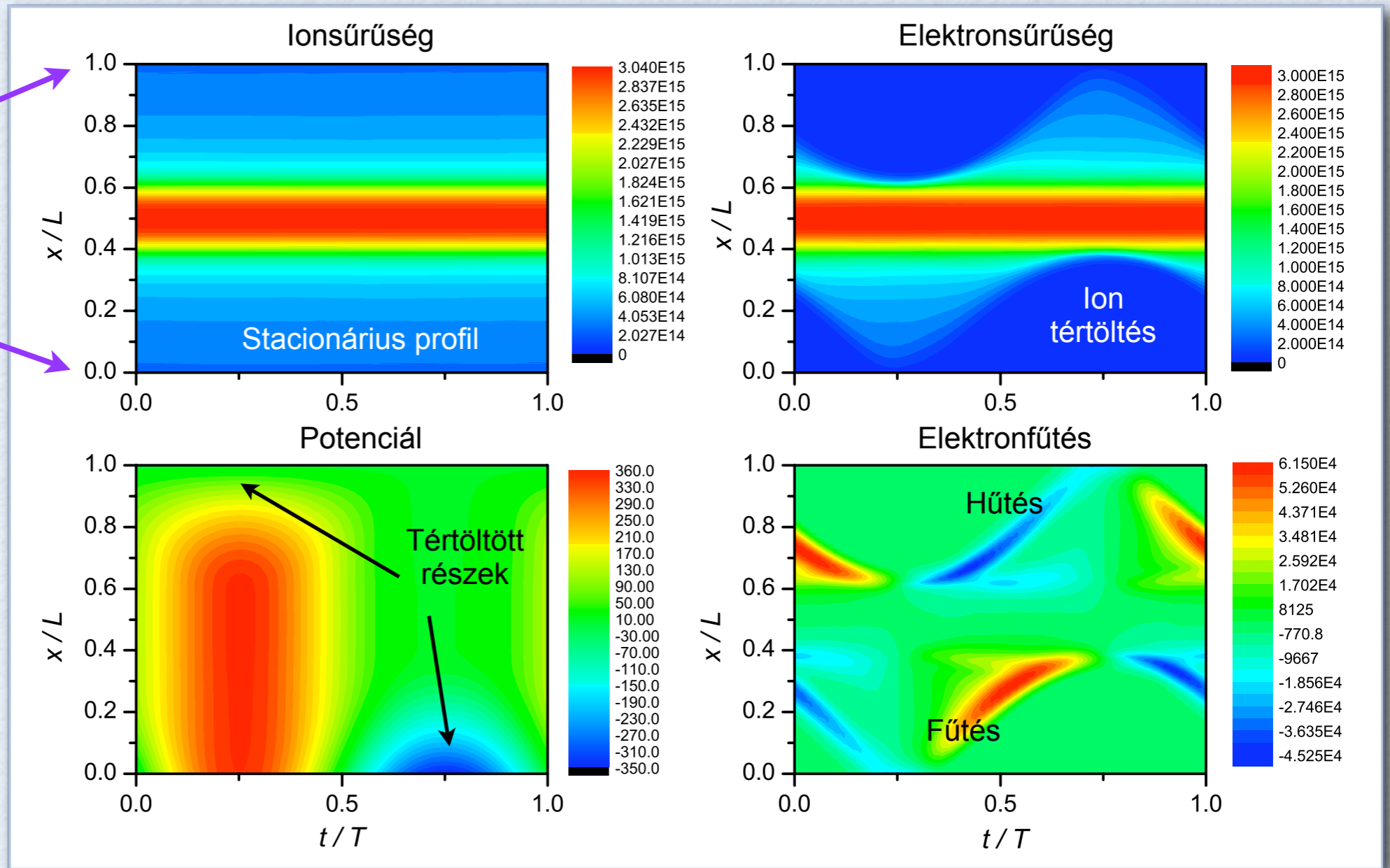
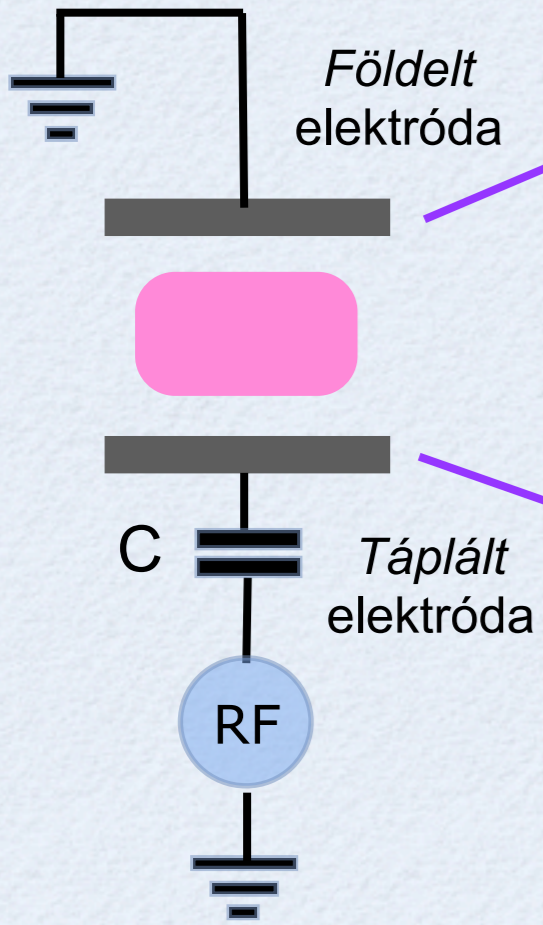
- * Részecskék: elektronok és Ar⁺ ionok
- * Folyamatok:
 - * elektronok: rugalmas ütk., gerjesztés, ionizáció
 - * ionok: izotróp szórás és töteskicserélő ütközések

Ar @ p = 50 mTorr, f = 13.56 MHz, V = 350 V



Rádiófrekvenciás gázkisülés PIC szimulációja

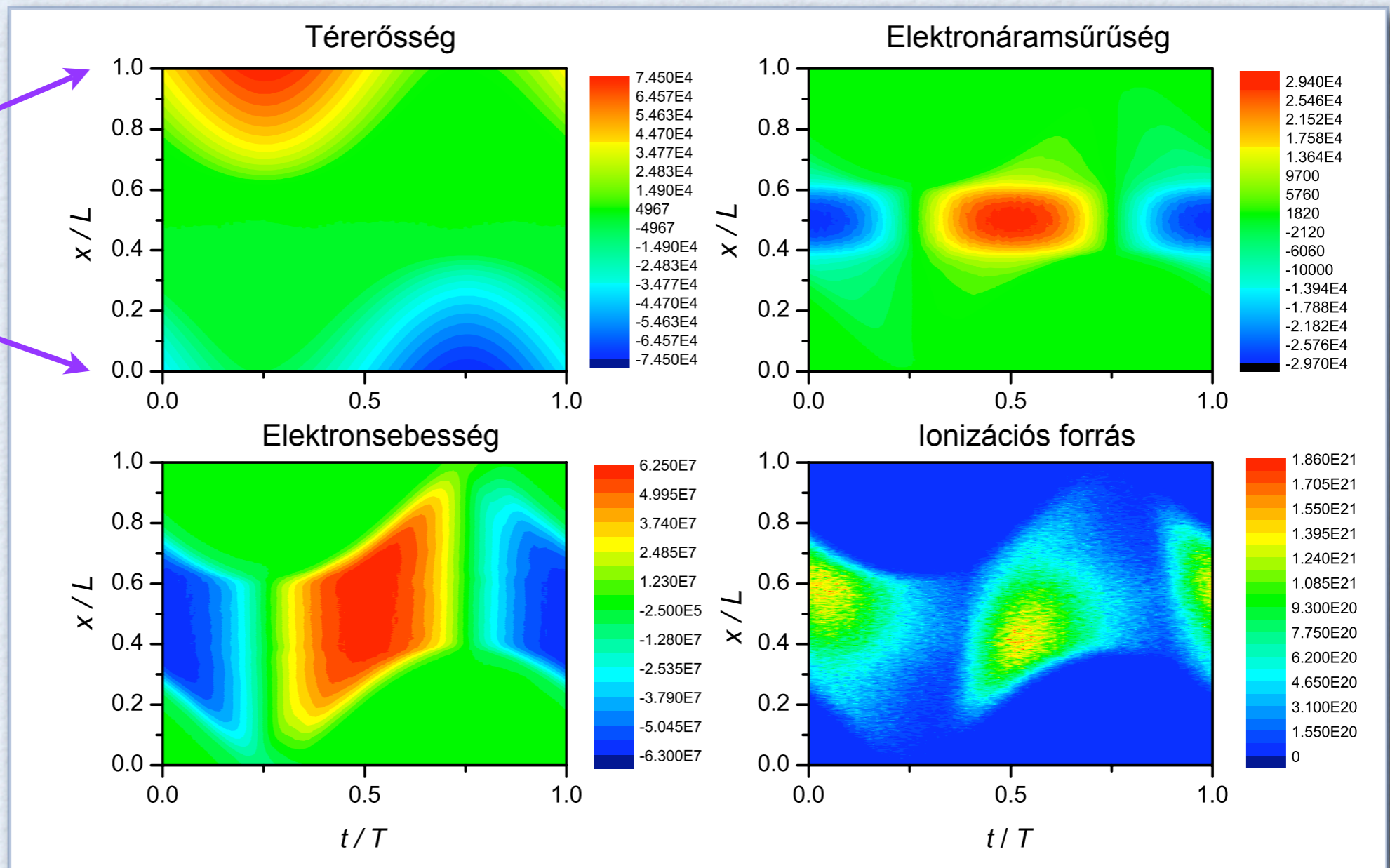
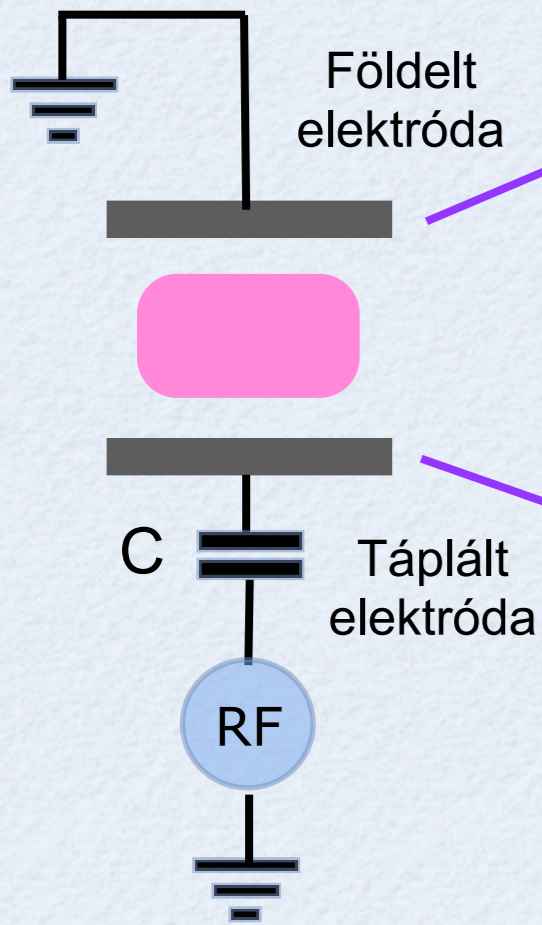
Ar @ p = 50 mTorr, f = 13.56 MHz, V = 350 V



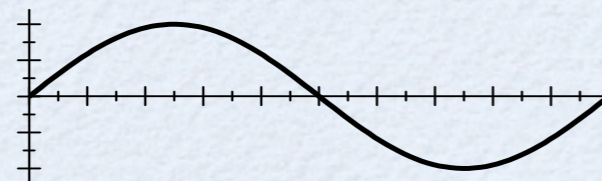
$$V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$$

Rádiófrekvenciás gázkisülés PIC szimulációja

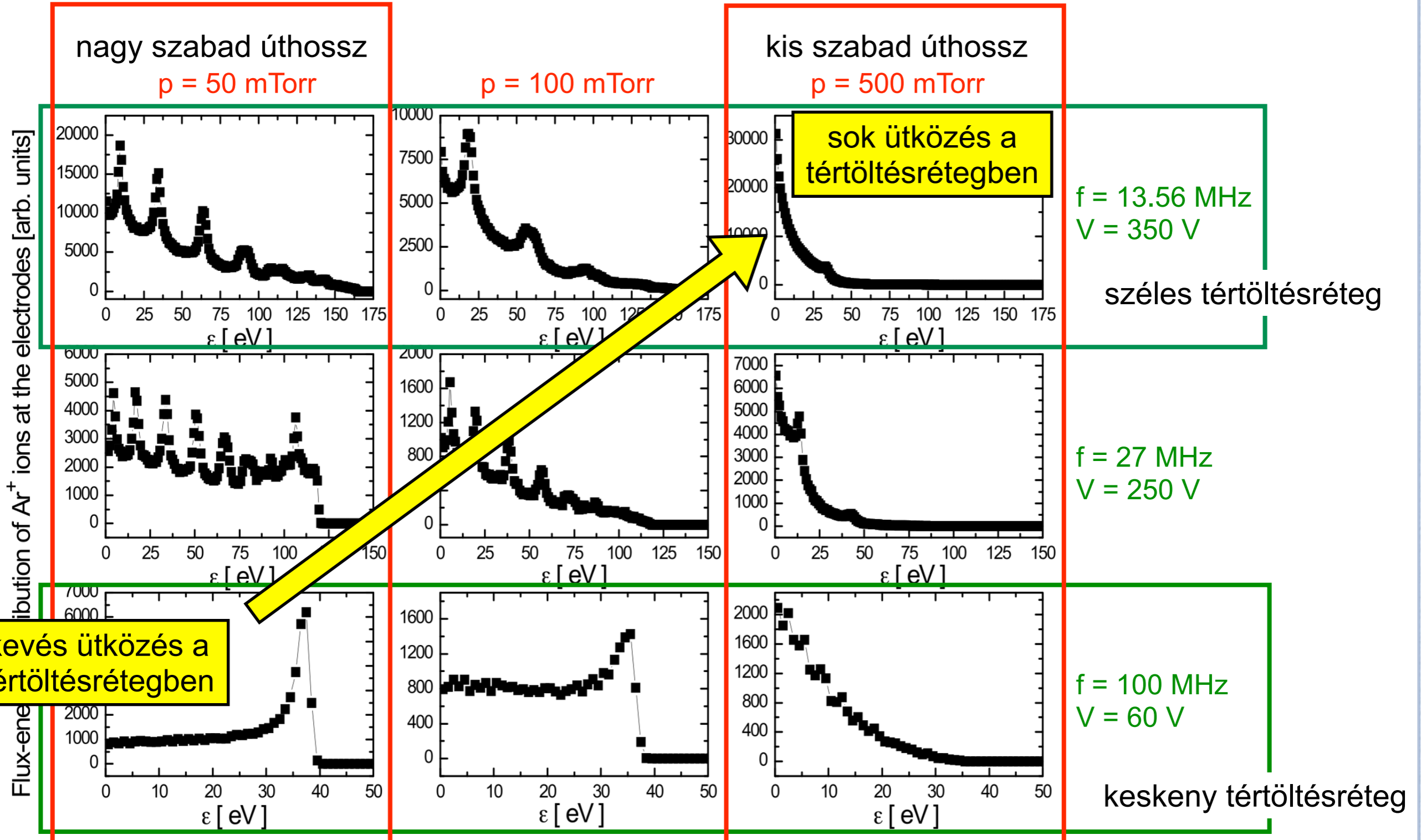
Ar @ p = 50 mTorr, f = 13.56 MHz, V = 350 V



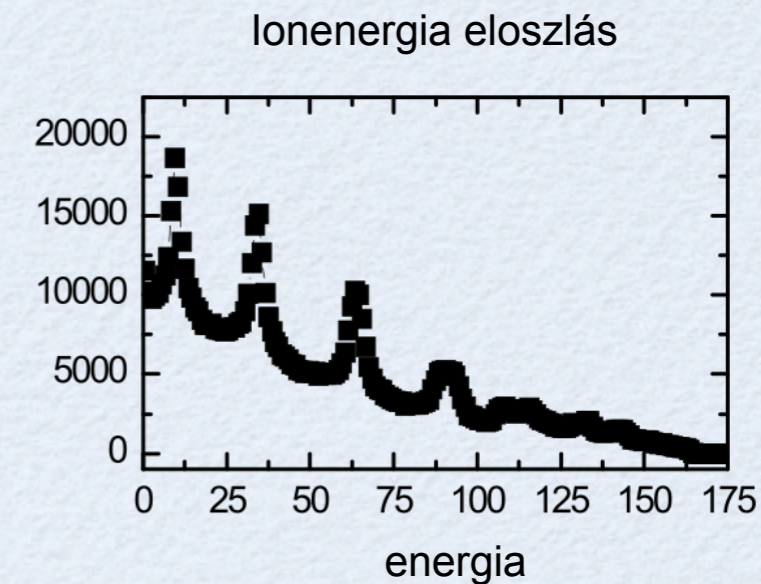
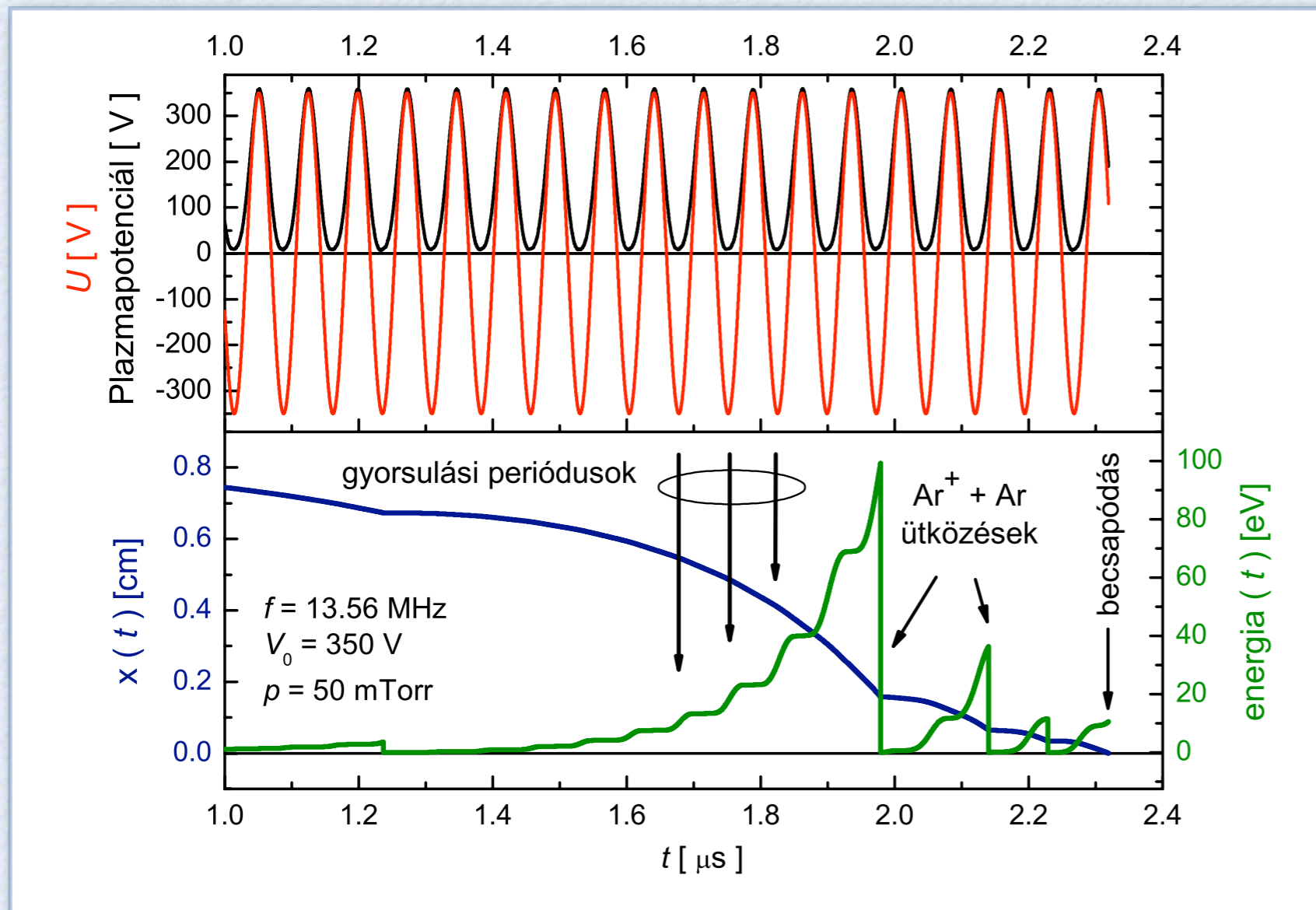
$$V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$$



PIC eredmények: ionenergia eloszlások az elektródáknál



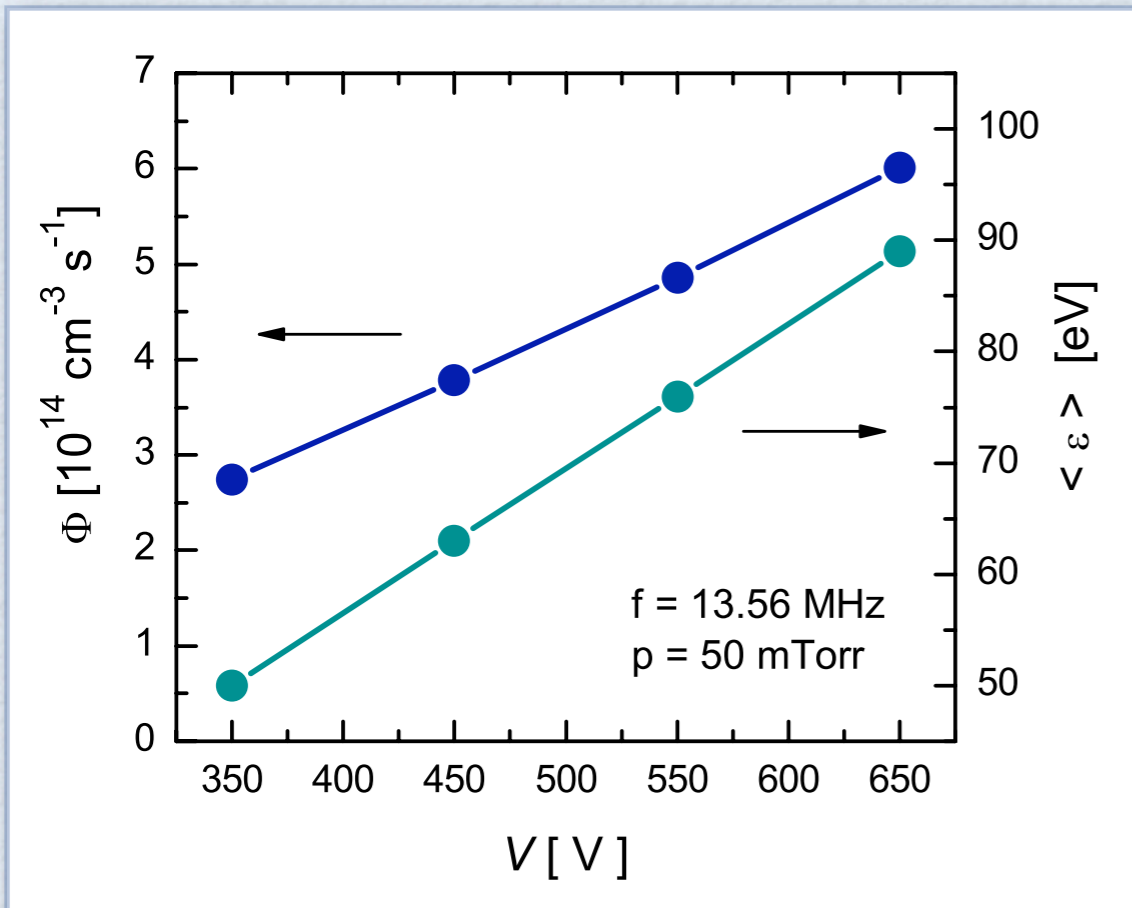
Az ionenergia eloszlások kialakulása



Ar
 $f = 13.56 \text{ MHz}$
 $p = 50 \text{ mTorr}$
 $V = 350 \text{ V}$

- * Ionok áthaladásának ideje $\tau \gg T \rightarrow$ az ionok az átlagos teret érzékelik
- * Periódikus gyorsulás a tértöltött rétegben
- * Töltéscicserélő ütközések hatása $\text{Ar}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}^+$

Ionenergia szabályozása (???)



A gerjesztő feszültség mind az ionenergiát, mind pedig az ionfluxust befolyásolja

Lehetséges ezen jellemzőket egymástól függetlenül szabályozni?

Gerjesztés két frekvenciával

$$V(t) = V_{\text{HF}} \sin(2\pi f_{\text{HF}} t) + V_{\text{LF}} \sin(2\pi f_{\text{LF}} t)$$

Fűtés és ionfluxus

Ionenergia

Boyle P C , Ellingboe A R and Turner M M 2004 Plasma Sources Sci. Technol. 13 493-503, J. Phys. D. 37 697

Kitajima T, Takeo Y, Petrovic Z L and Makabe T 2000 Appl. Phys. Lett. 77 489

Denda T, Miyoshi Y, Komukai Y, Goto T, Petrovic Z L and Makabe T 2004 J. Appl. Phys. 95 870

Lee J K, Manuilenko O V, Babaeva N Yu, Kim H C and Shon J W 2005 Plasma Sources Sci. Technol. 14 89

Kawamura E, Lieberman M A and Lichtenberg A J 2006 Phys. Plasmas 13 053506

Turner M M and Chabert P 2006 Phys. Rev. Lett. 96 205001

Gans T, Schulze J, O'Connell D, Czarnetzki U, Faulkner R, Ellingboe A R and Turner M M 2006 Appl. Phys. Lett. 89 261502

Schulze J, Gans T, O'Connell D, Czarnetzki U, Ellingboe A R and Turner M M 2007 J. Phys. D 40 7008-7018

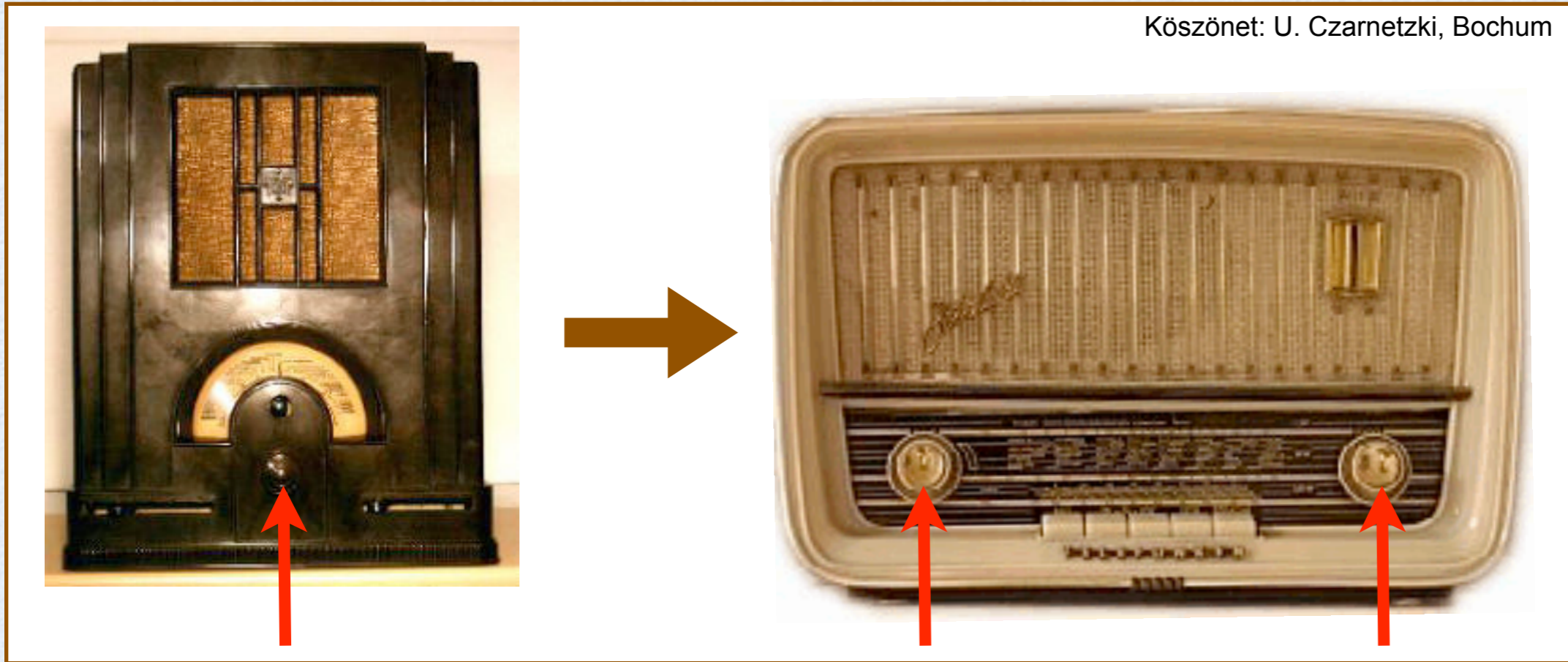
Semmler E, Awakowicz P and von Keudell A 2007 Plasma Sources Sci. Technol. 16 839

Salabas A and Brinkmann R P 2005 Plasma Sources Sci. Technol. 14 2 53-59

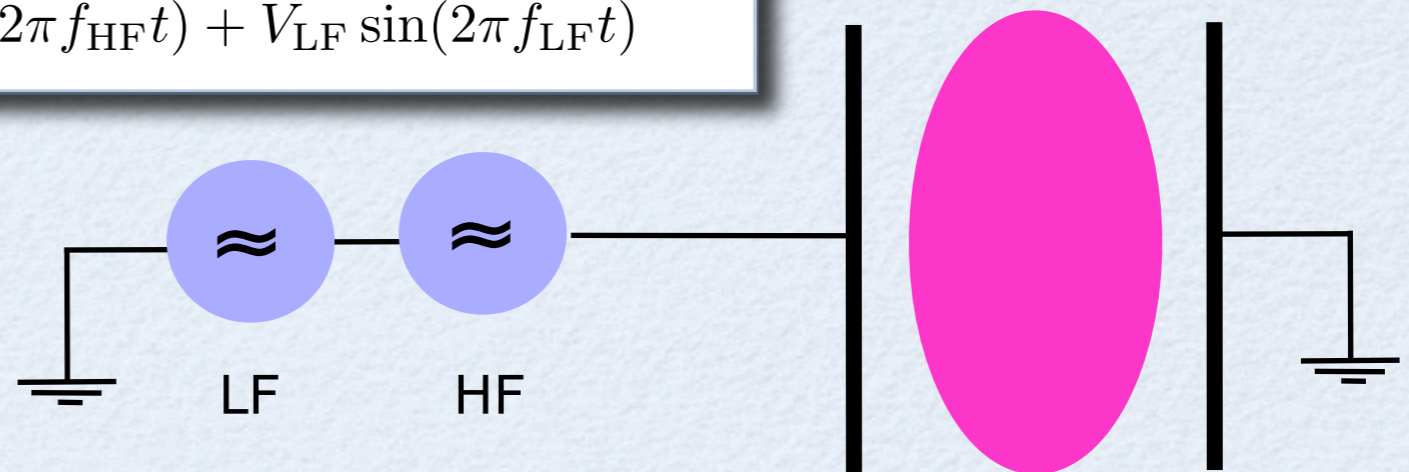
Georgieva V and Bogaerts A 2006 Plasma Sources Sci. Technol., 15, 368-377

Egy / többfrekvenciás gerjesztés

Köszönet: U. Czarnetzki, Bochum



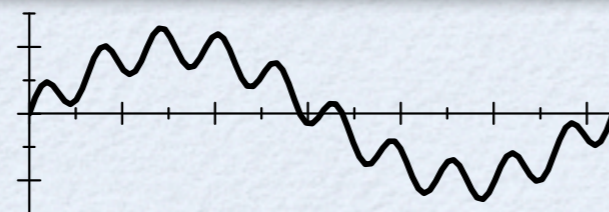
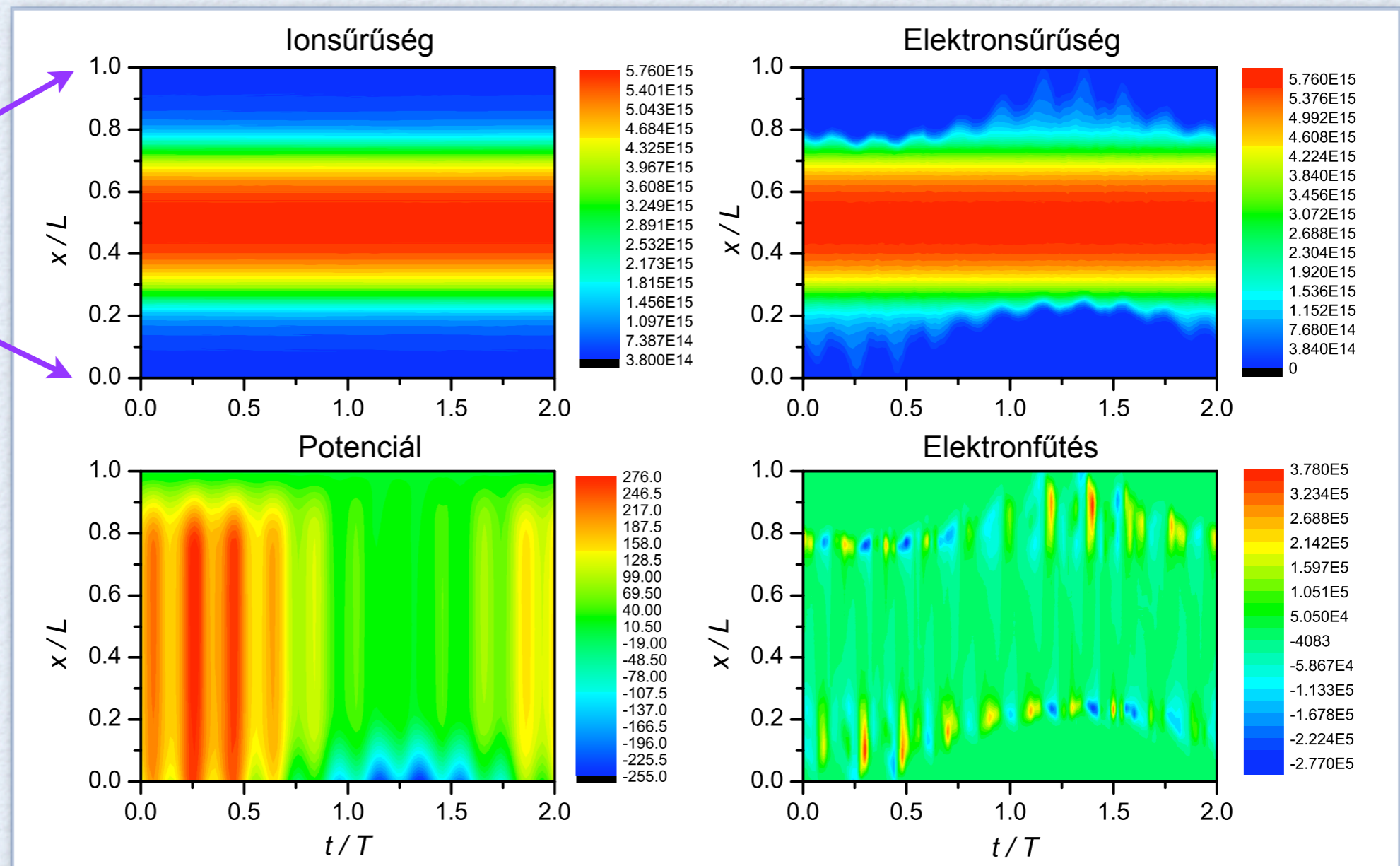
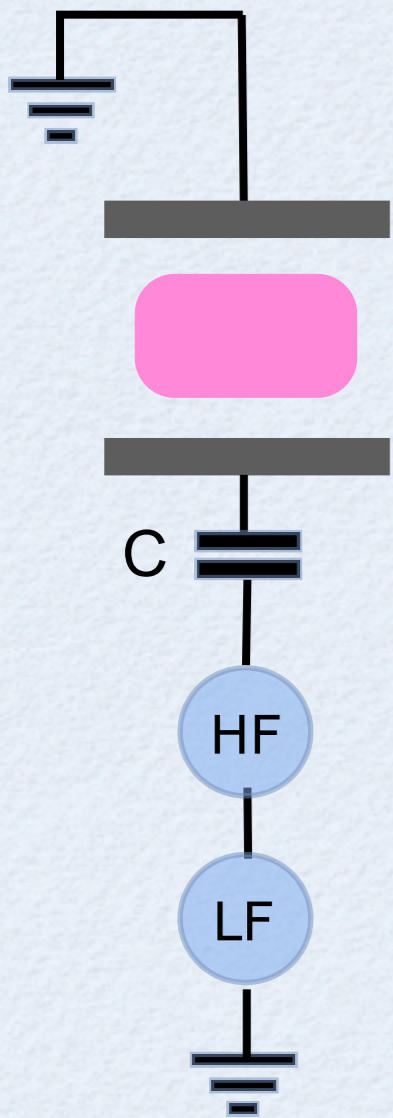
$$V(t) = V_{\text{HF}} \sin(2\pi f_{\text{HF}}t) + V_{\text{LF}} \sin(2\pi f_{\text{LF}}t)$$



Kétfrekvenciás gerjesztésű kisülés jellemzői

Ar @ p = 25 mTorr, L = 2 cm

HF = 60 V @ 100 MHz / LF = 200 V @ 10 MHz

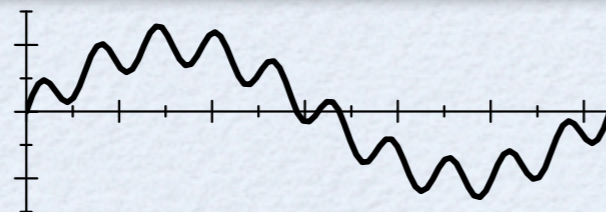
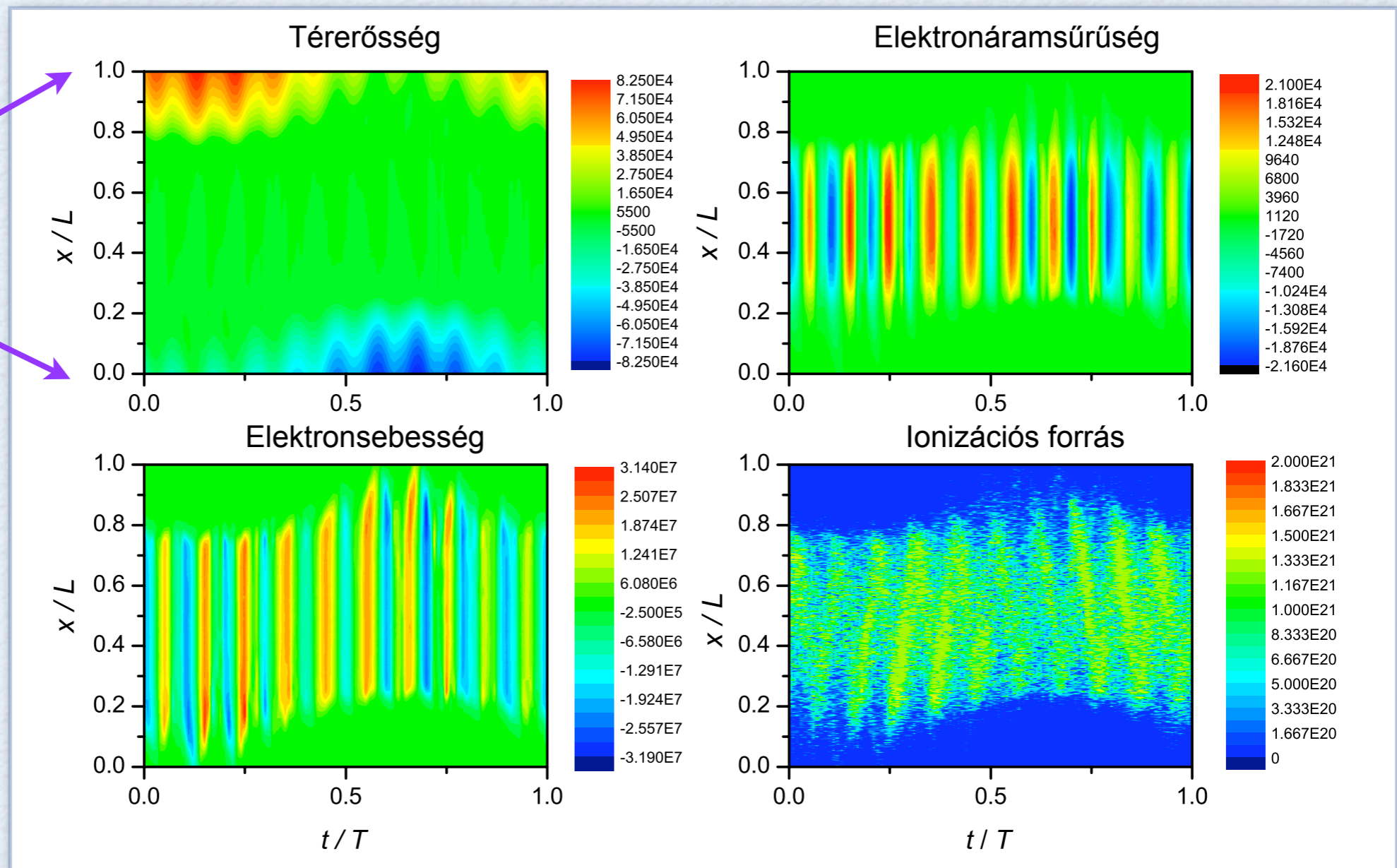
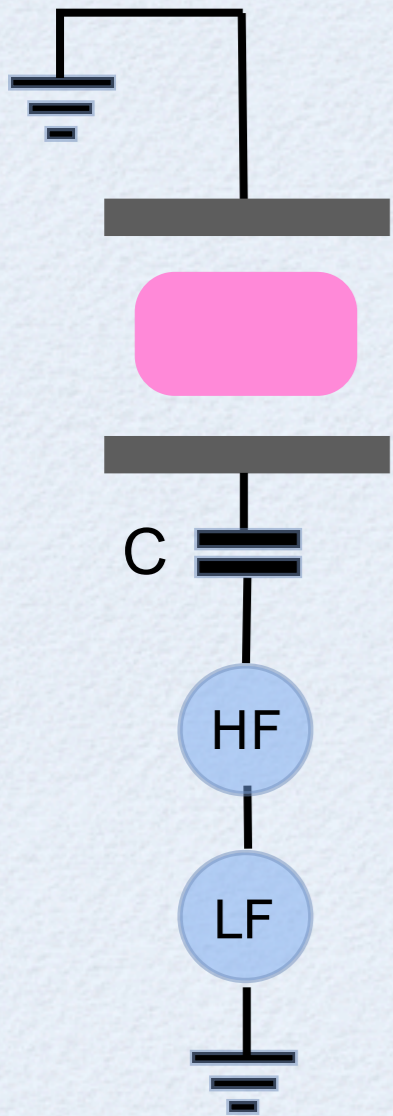


$$V(t) = V_{HF} \sin(2\pi f_{HF}t) + V_{LF} \sin(2\pi f_{LF}t)$$

Kétfrekvenciás gerjesztésű kisülés jellemzői

Ar @ p = 25 mTorr, L = 2 cm

HF = 60 V @ 100 MHz / LF = 200 V @ 10 MHz

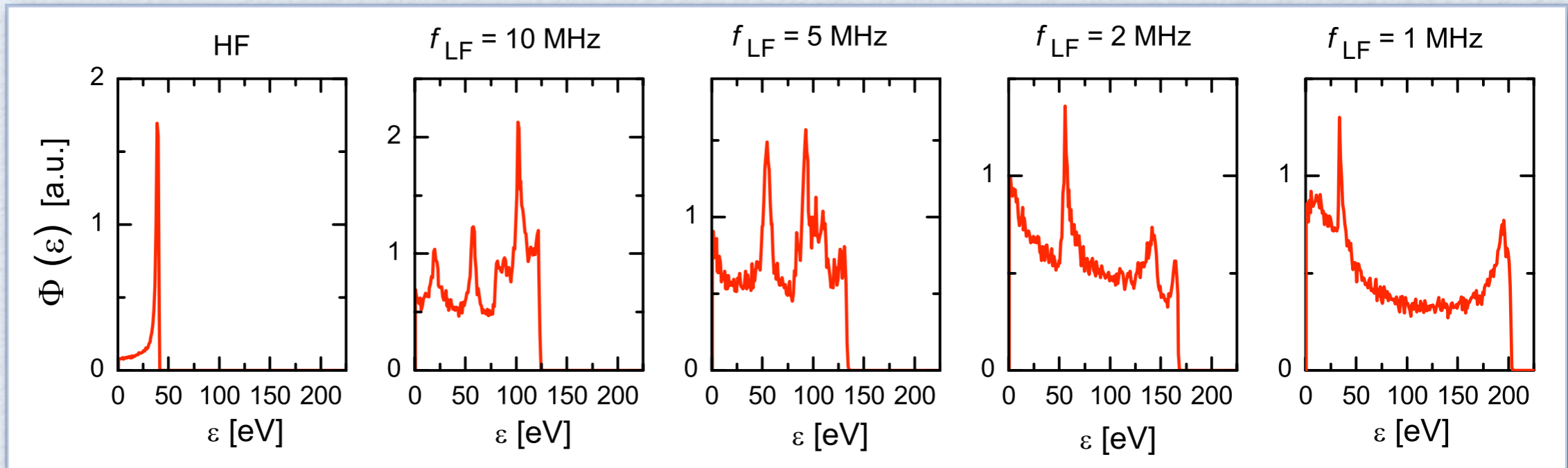


$$V(t) = V_{HF} \sin(2\pi f_{HF}t) + V_{LF} \sin(2\pi f_{LF}t)$$

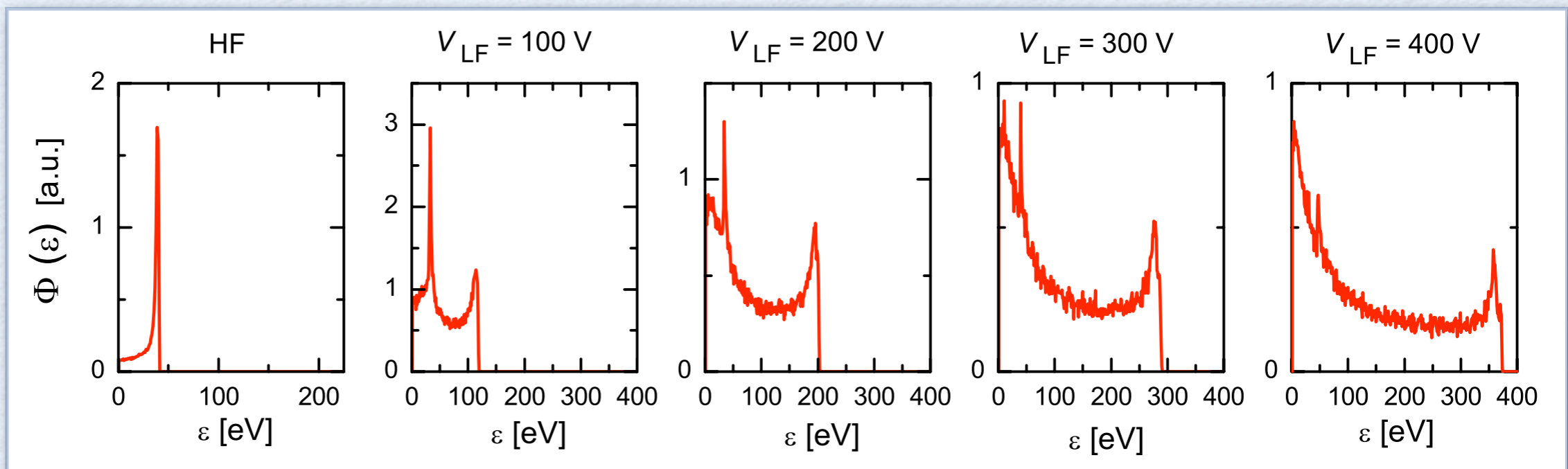
Kétfrekvenciás gerjesztés: a működési paraméterek hatása

Argon, $V_{HF} = 60 \text{ V}$, $f_{HF} = 100 \text{ MHz}$, $L = 2 \text{ cm}$, 25 mTorr

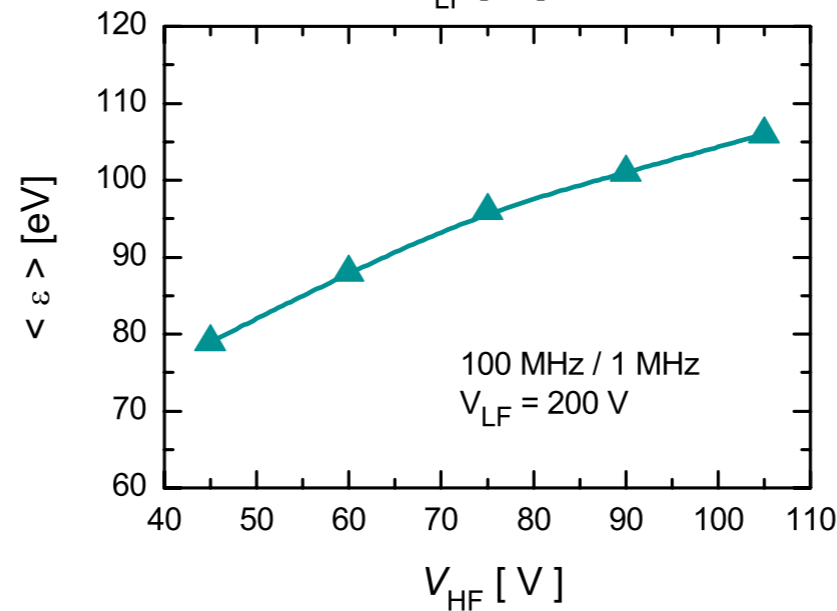
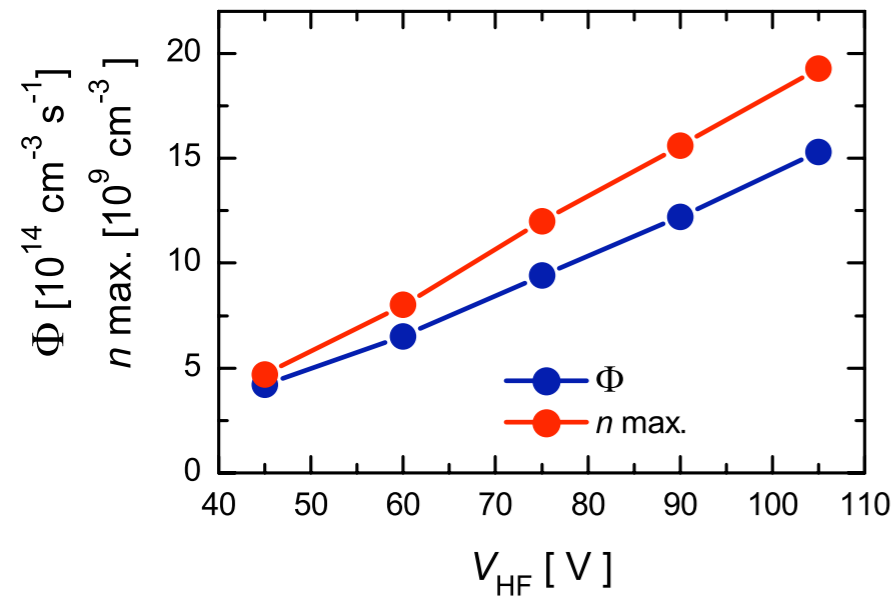
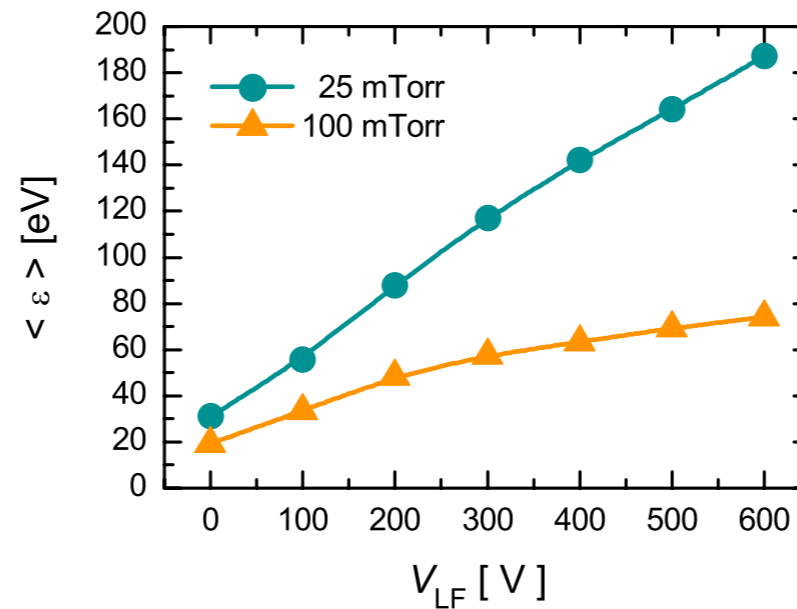
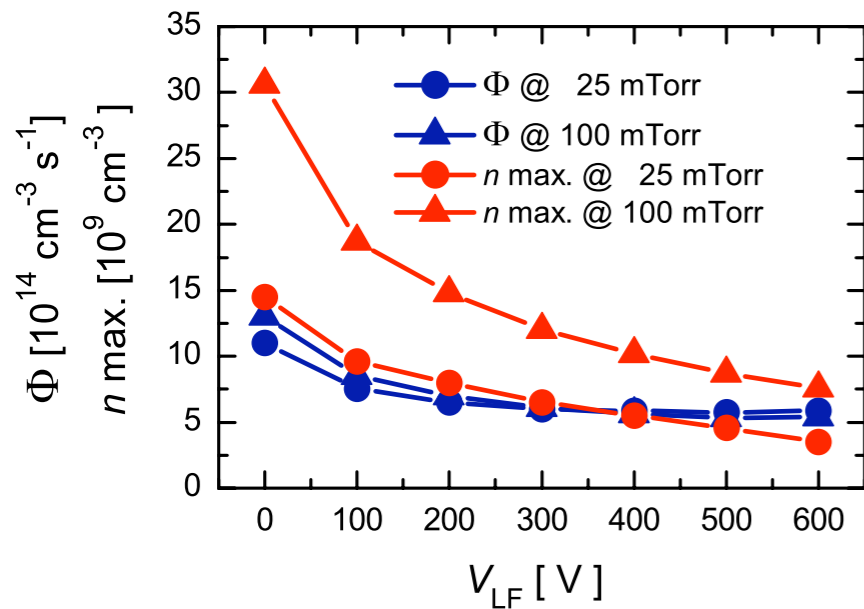
LF hatása
 $V_{LF} = 200 \text{ V}$
mellett



V_{LF} hatása
 $f_{LF} = 1 \text{ MHz}$
mellett



Ionenergia szabályozása



A CÉL:

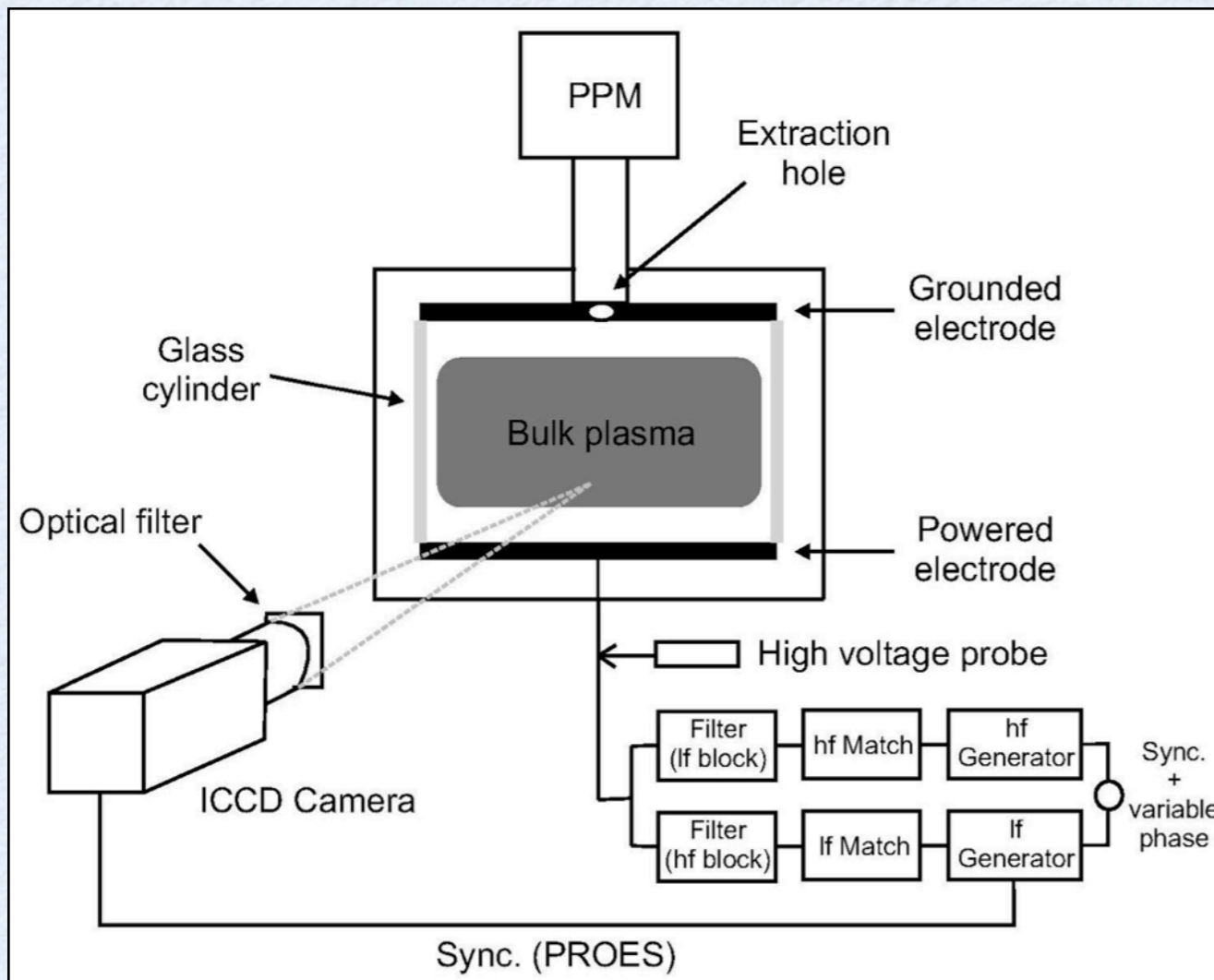
- * Az ionfluxus beállítása: V_{HF}
- * Az ionenergia beállítása: V_{LF}

VALÓSÁG:

$f_{HF} \gg f_{LF}$ mellett közelítőleg egymástól függetlenül szabályozható a fluxus és az átlagos energia a források feszültségével

- * A működési paraméterektől függő "keresztteffektus"
- * Itt $\gamma = 0$, kérdés, hogy $\gamma > 0$ esetén hogy viselkedik a rendszer?

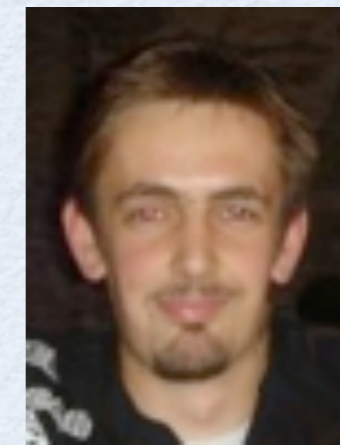
Kísérleti vizsgálatok



Institute for Plasma and Atomic Physics
Ruhr University Bochum



Prof Dr Uwe Czarnetzki

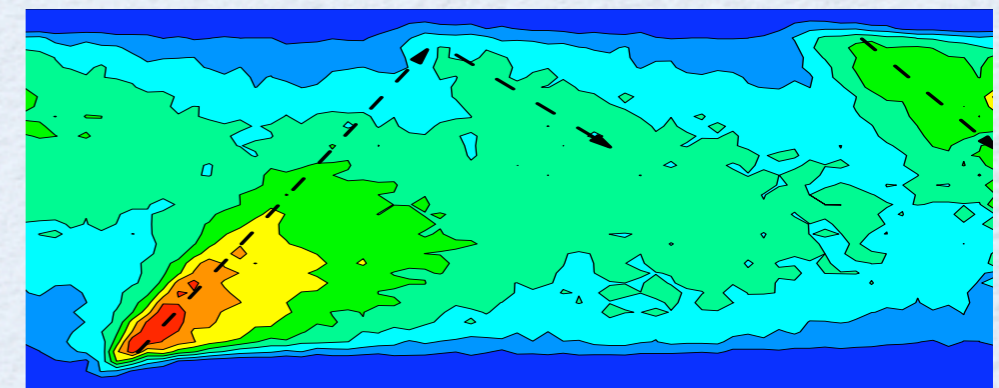


Dr Julian Schulze



Edmund Schüngel

Dr Dirk Luggenhölscher



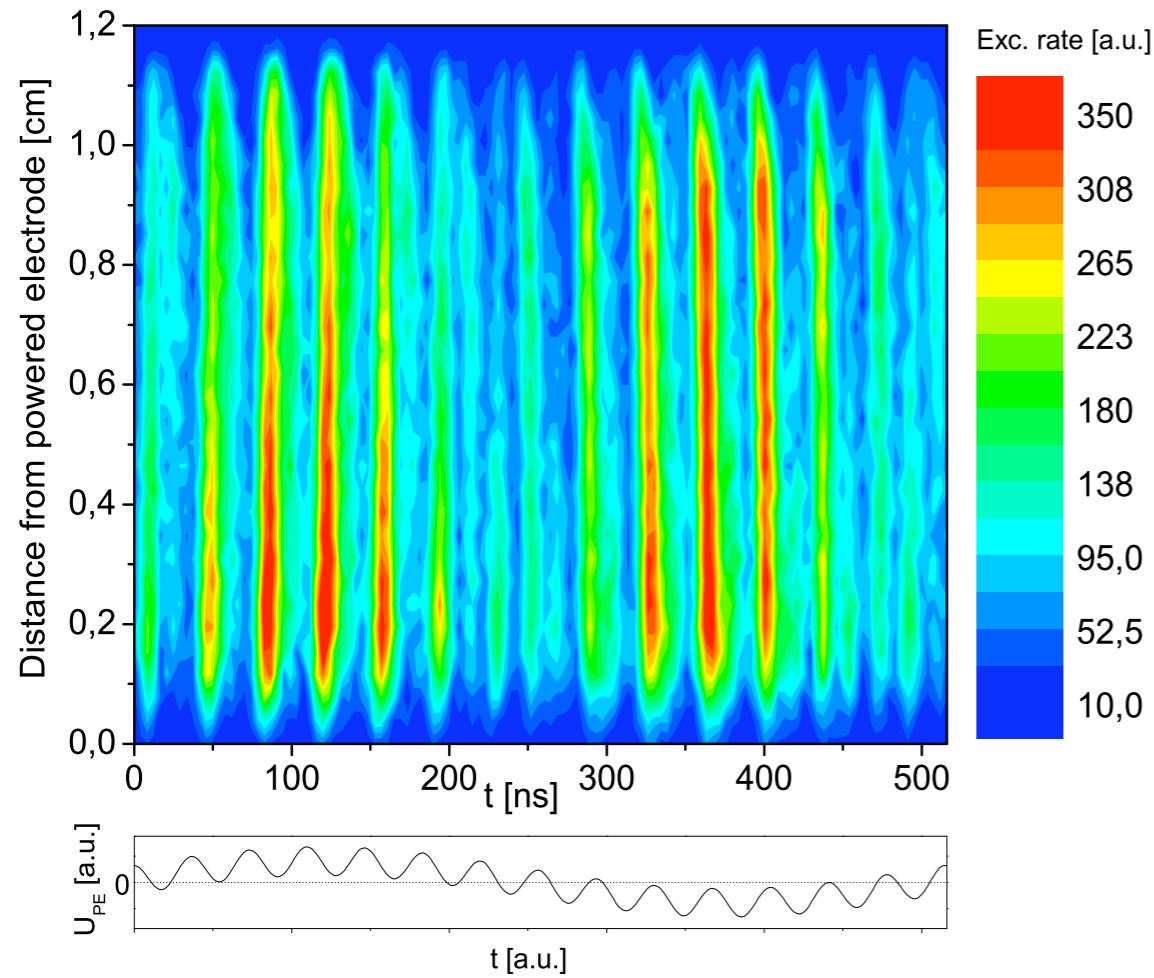
... + ELMÉLET (analitikus modellek)

PROES: Phase Resolved Optical Emission Spectroscopy - gerjesztés térbeli és időbeli eloszlása - gyors elektronok mozgása (ionizáció)

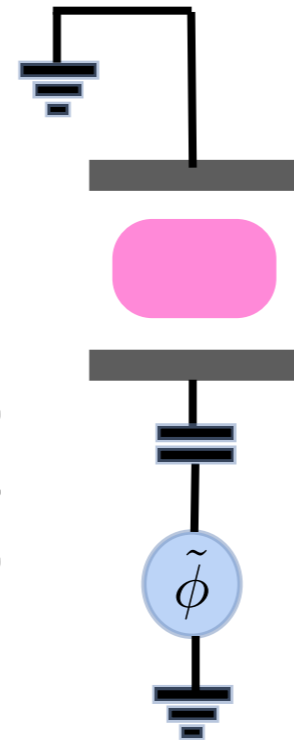
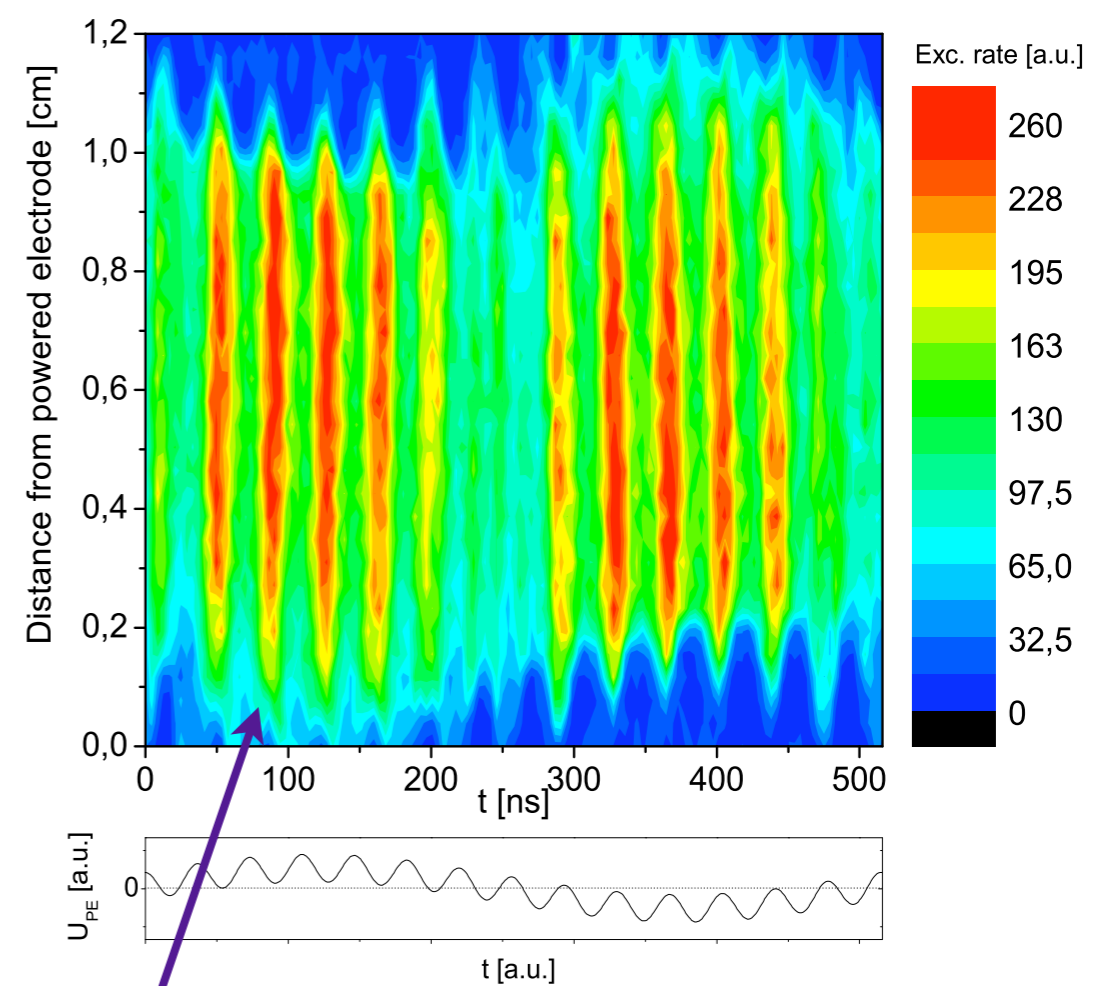
PPM: Plasma Process Monitor - ionenergia-eloszlás mérése

A kisülés fénykibocsátásának tér- és időbeli eloszlása

Kísérlet (Bochum)



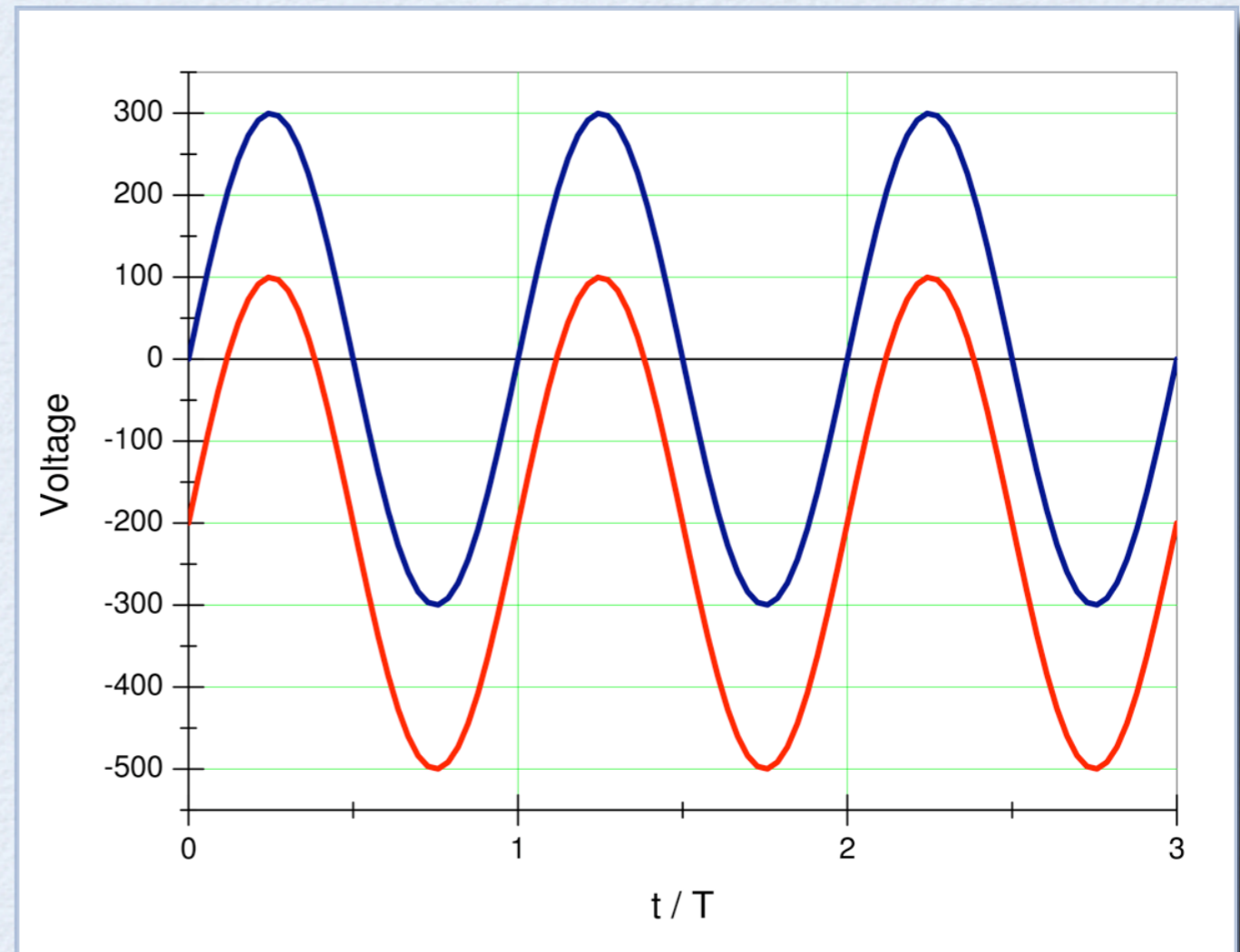
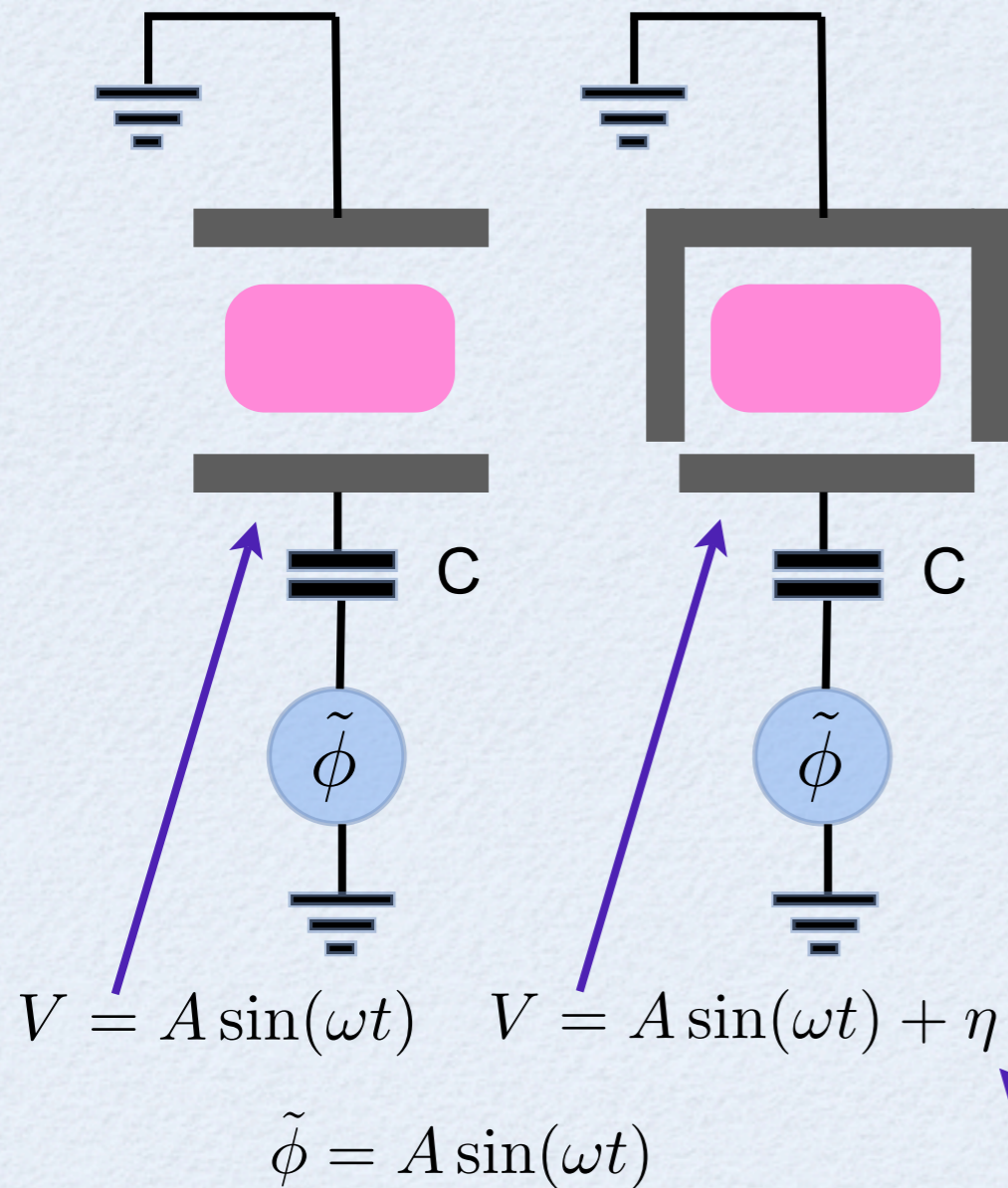
Szimuláció (Budapest)



Elektronnyalábok

He @ 65 Pa
 $f_{HF} = 27.118 \text{ MHz}$
 $f_{LF} = 1.937 \text{ MHz} (= f_{HF}/14)$

Szimmetrikus / aszimmetrikus RF kisülések



“DC bias”: DC előfeszültség, előfeszítés

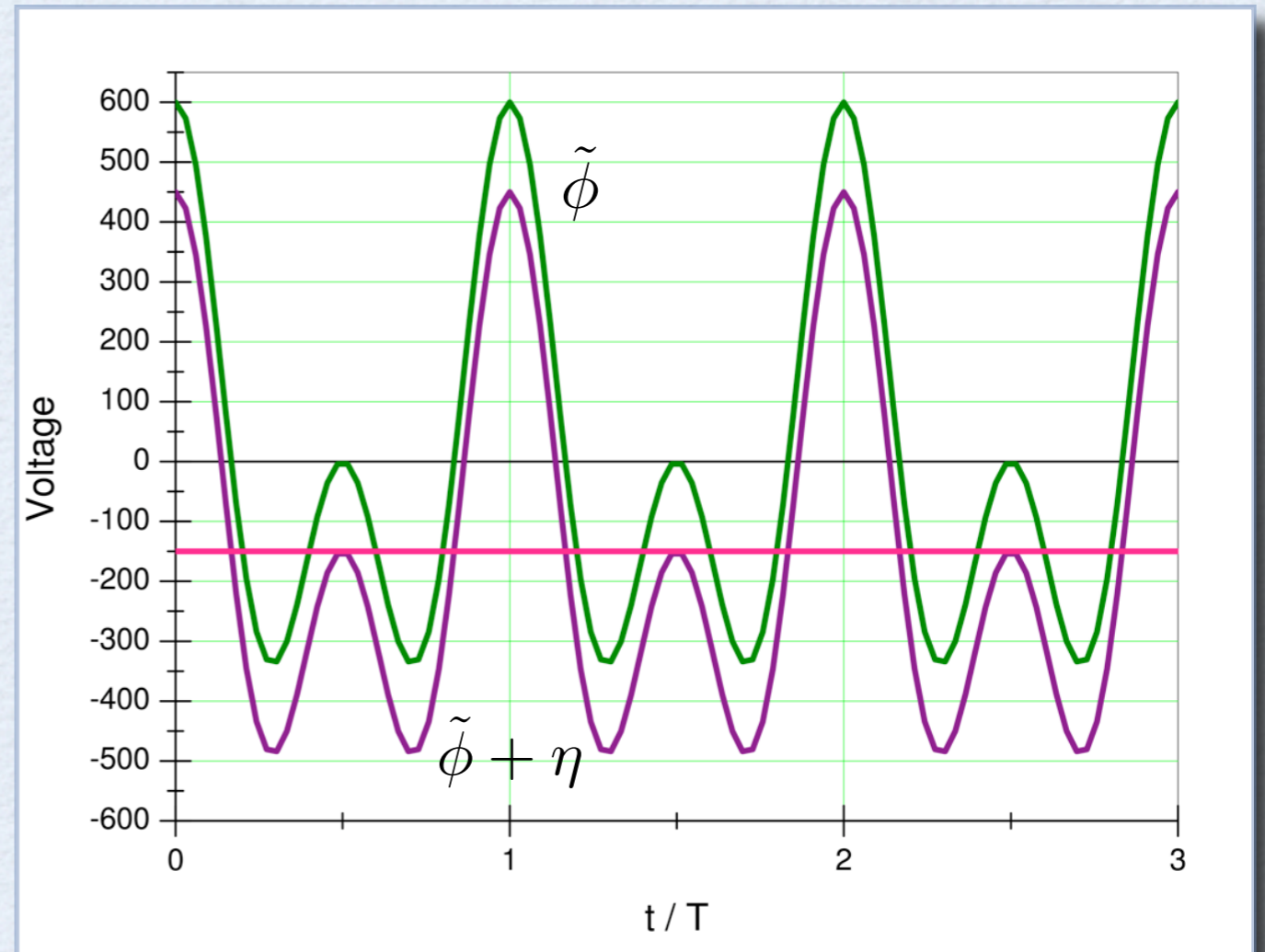
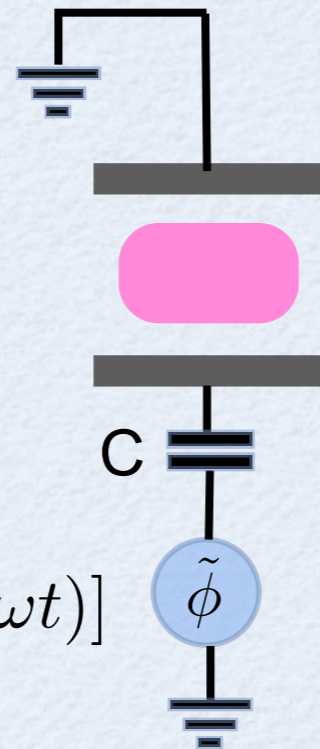
Geometriailag *szimmetrikus* reaktor esetén nem lép fel egyenfeszültségű komponens (előfeszítés). Geometriailag *aszimmetrikus* elrendezésnél egy akkora értékű DC komponens lép fel ami kiegyenlíti az egyes elektródákhoz folyó elektron és ionáramot, egy periódusra átlagolva.

Elektromos aszimmetria

Heil B G, Schulze J, Mussenbrock T, Brinkmann R P and Czarnetzki U 2008 IEEE Trans. on Plasma Sci. 36 1404

Heil B G, Czarnetzki U, Brinkmann R P and Mussenbrock T, 2008 J. Phys. D 41 165202

$$\tilde{\phi} = V_0[\cos(\omega t + \theta) + \cos(2\omega t)]$$

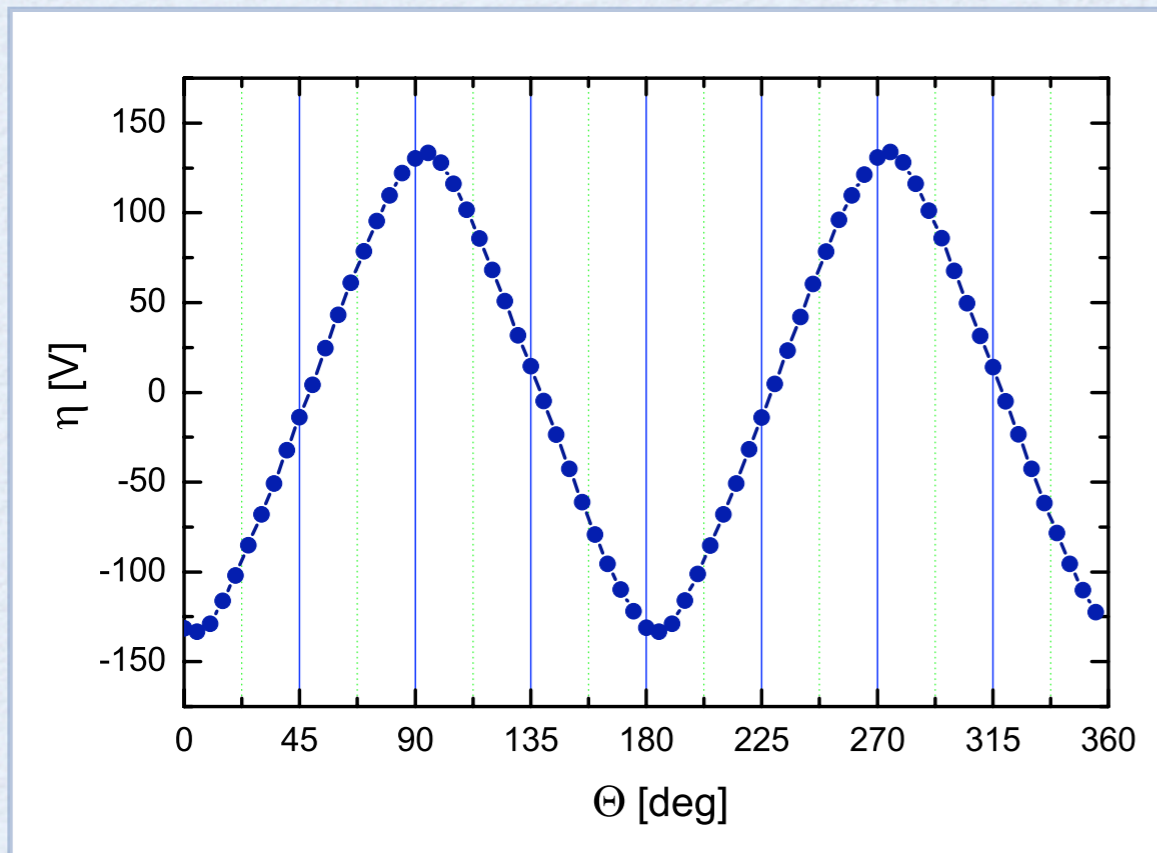


Geometriailag szimmetrikus elrendezésben ugyancsak felléphet egy egyenfeszültségű komponens, ha a gerjesztés a alapharmonikus mellett egy páros harmonikust is tartalmaz

Mivel az ionok az elektródák közelében lévő tértöltött rétegen való áthaladáskor gyorsulnak fel, ezért energiájukat befolyásolja a DC előfeszítés - ami a gerjesztő frekvenciák közötti fázisszöggel állítható be.

A kisülés struktúrája - térerősségeloszlás

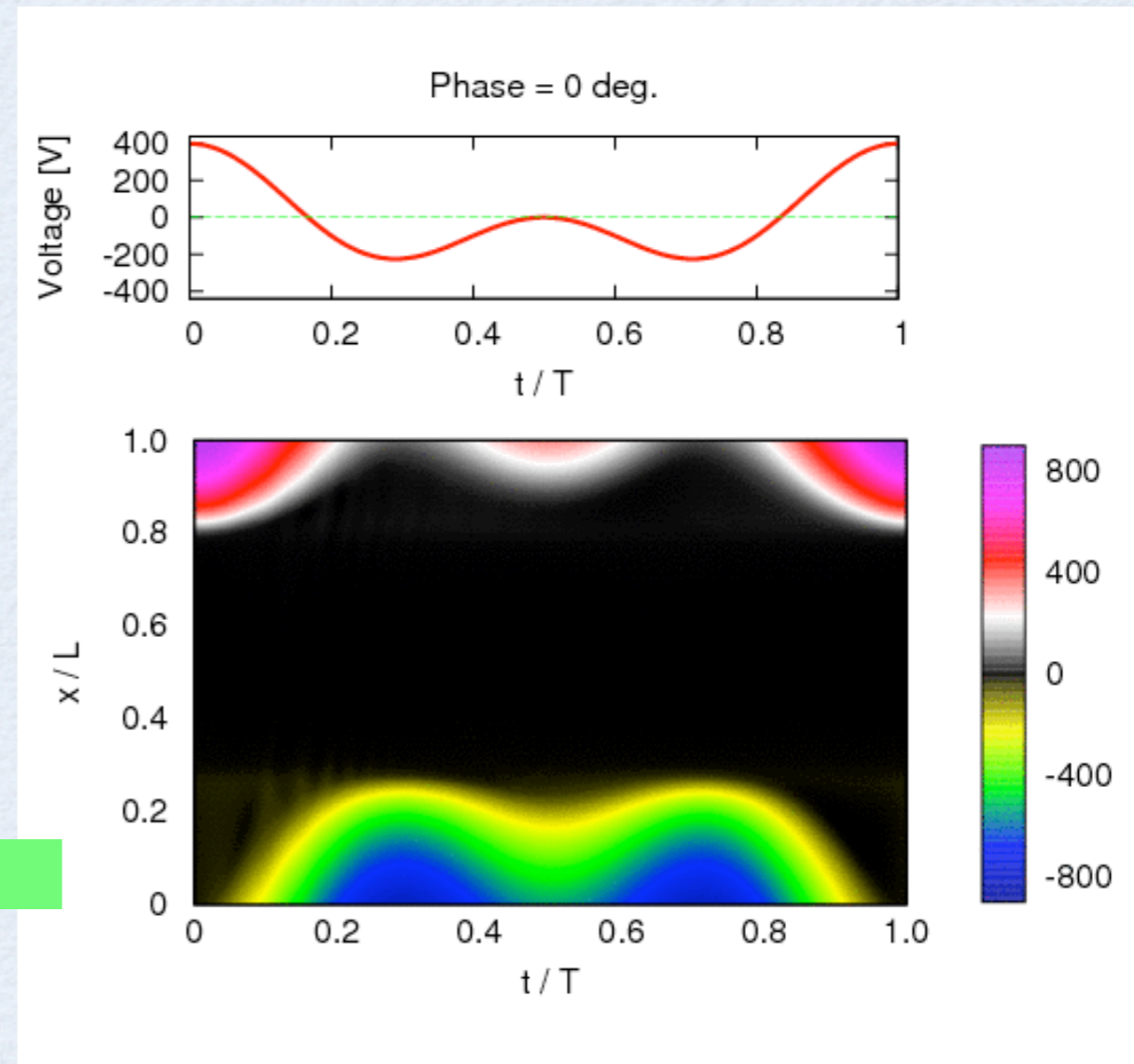
DC előfeszültség a fázisszög függvényében:



Ar @ 5 Pa, L = 2.5 cm, f = 13.56 MHz, V₀ = 200 V

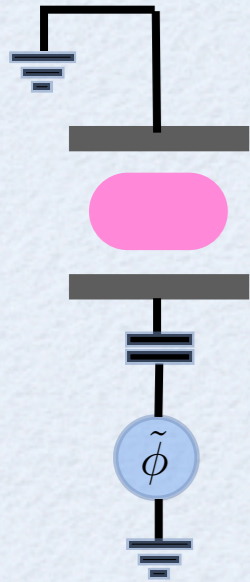
$$\tilde{\phi} = V_0 [\cos(\omega t + \theta) + \cos(2\omega t)]$$

Elektromos térerősség térbeli és időbeli eloszlása:



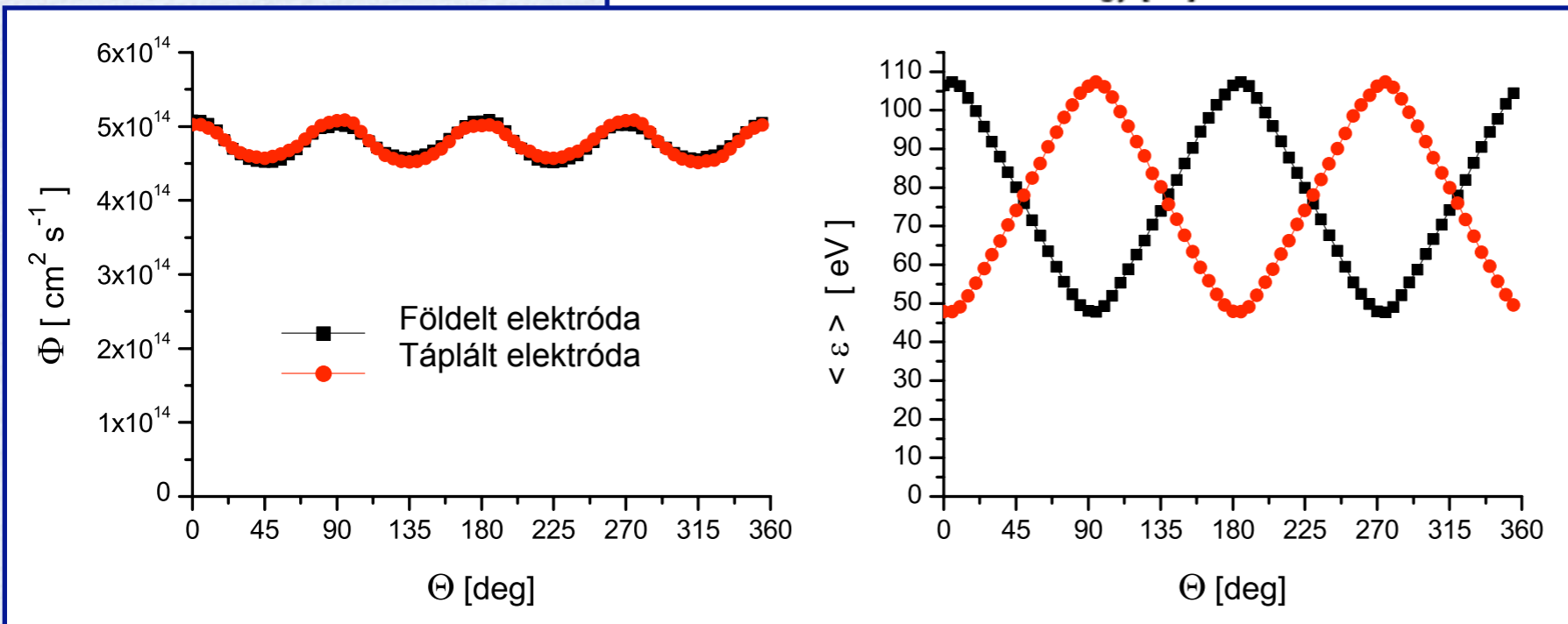
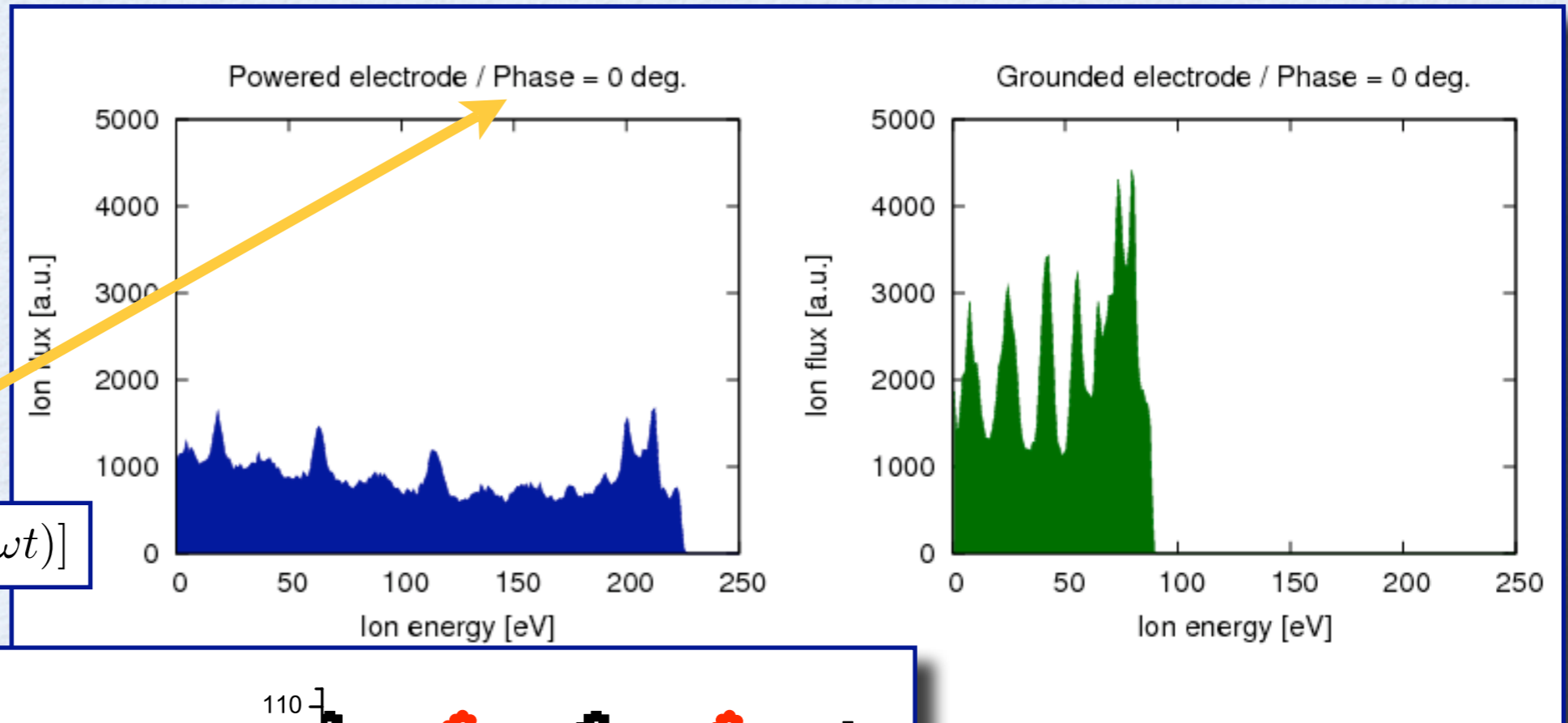
Z. Donkó, J. Schulze, B. G. Heil and U. Czarnetzki, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 025205 (2009);
 U. Czarnetzki, B. G. Heil, J. Schulze, Z. Donkó, T. Mussenbrock and R. P. Brinkmann, J. Phys.: Conf. Ser. 162, 012010 (2009)

Ionenergia eloszlások - szimuláció



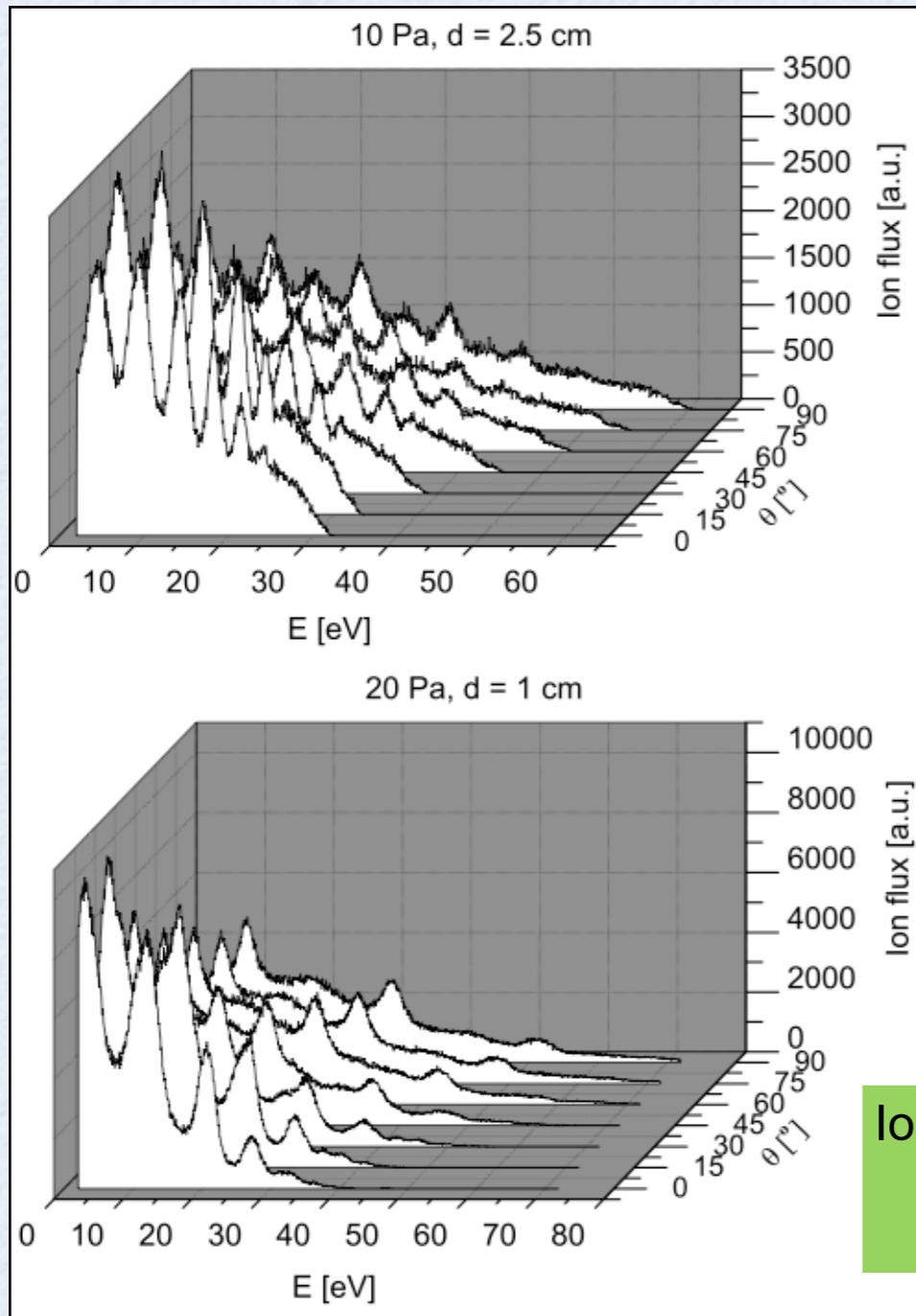
Ar @ 5 Pa,
L = 2.5 cm,
f = 13.56 MHz,
V₀ = 200 V

$$\tilde{\phi} = V_0[\cos(\omega t + \theta) + \cos(2\omega t)]$$

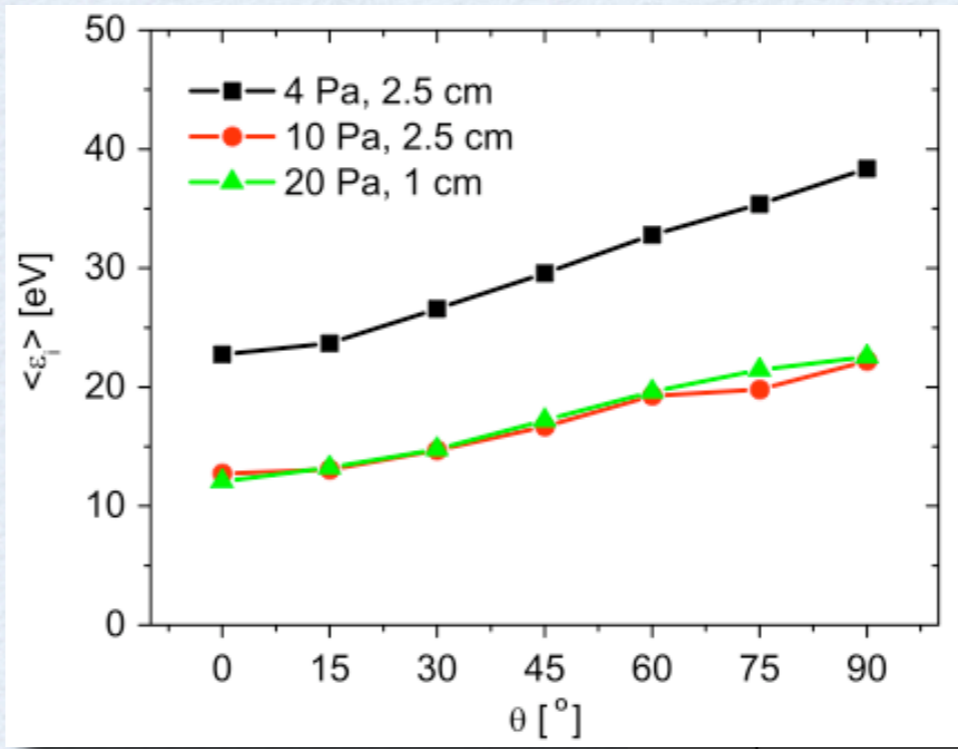


A fázisszöggel az ionenergia széles határok között változtatható, míg az ionfluxus alig változik.

Ionenergia eloszlások - mérés (Bochum)



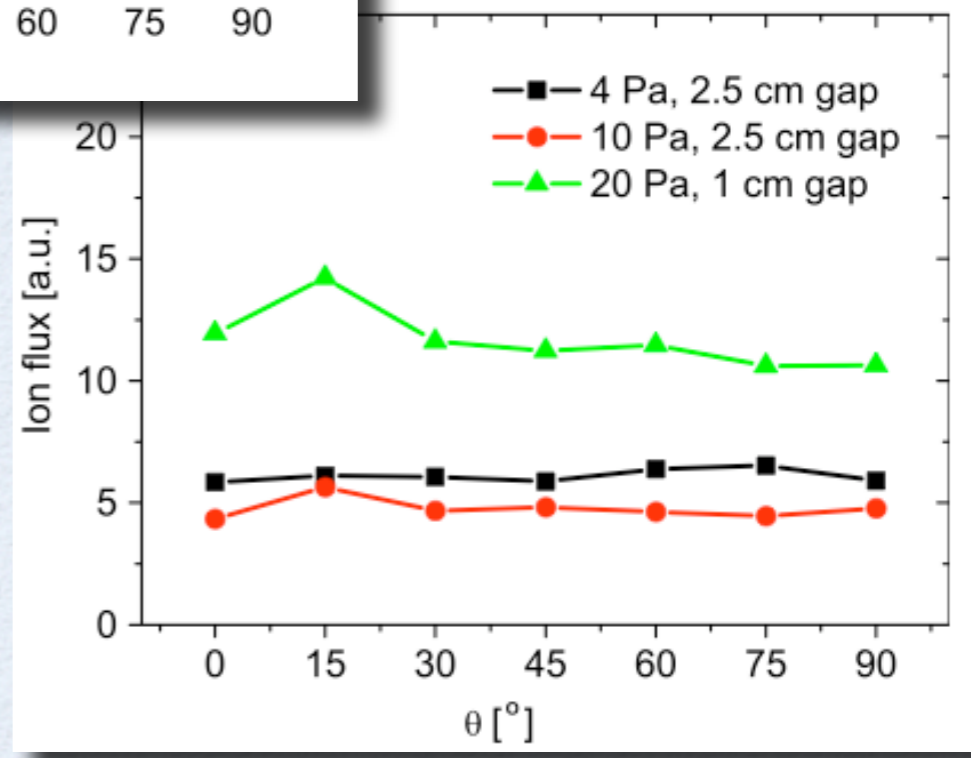
Ionenergia eloszlások a fázisszög függvényében



Átlagenergia

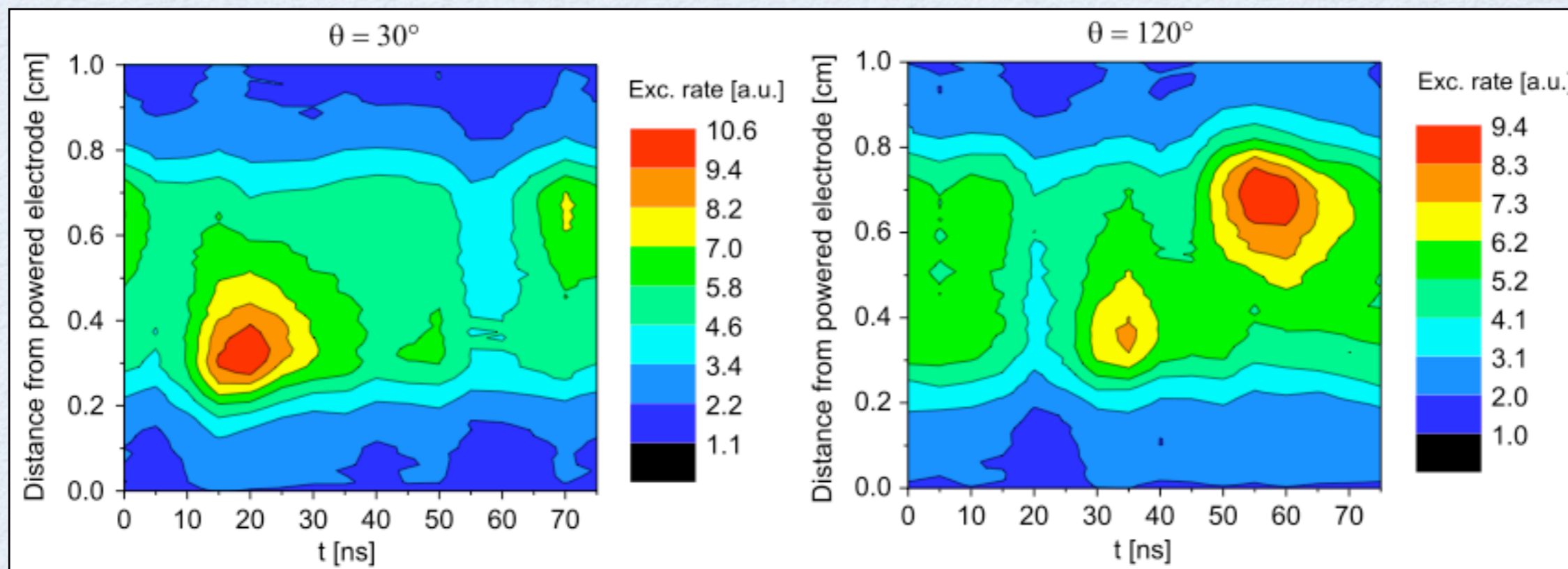
Függetlenül szabályozhatók !!

Ionfluxus



J. Schulze, E. Schüngel and U. Czarnetzki, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 092005/FTC (2009).

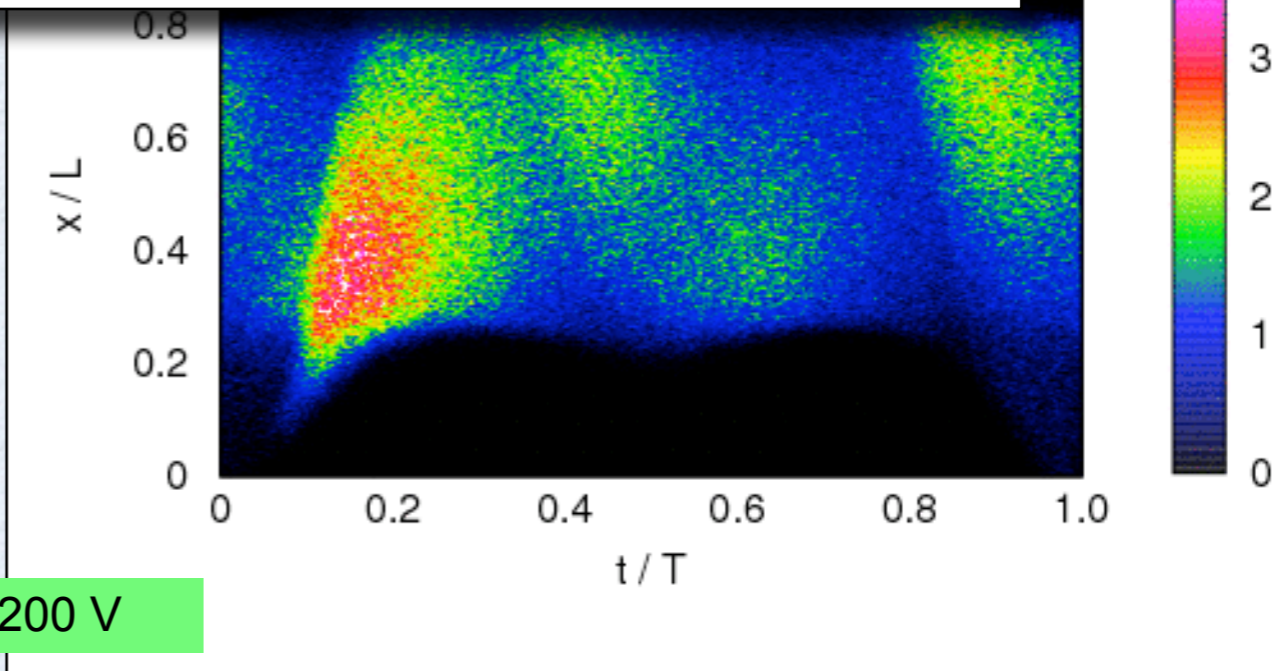
Gerjesztés - energialeadás



PROES mérés
(90% Ar - 10% Ne)
at $L = 1\text{cm}$, 60 Pa and $V_0 = 76\text{ V}$

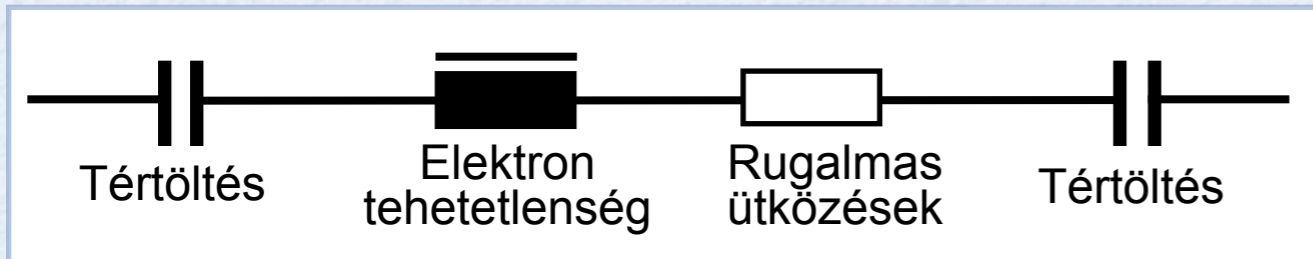
J. Schulze, E. Schüngel and U. Czarnetzki,
J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 092005/FTC (2009).

Ar @ 5 Pa , $L = 2.5\text{ cm}$, $f = 13.56\text{ MHz}$, $V_0 = 200\text{ V}$



Nemlineáris oszcillációk

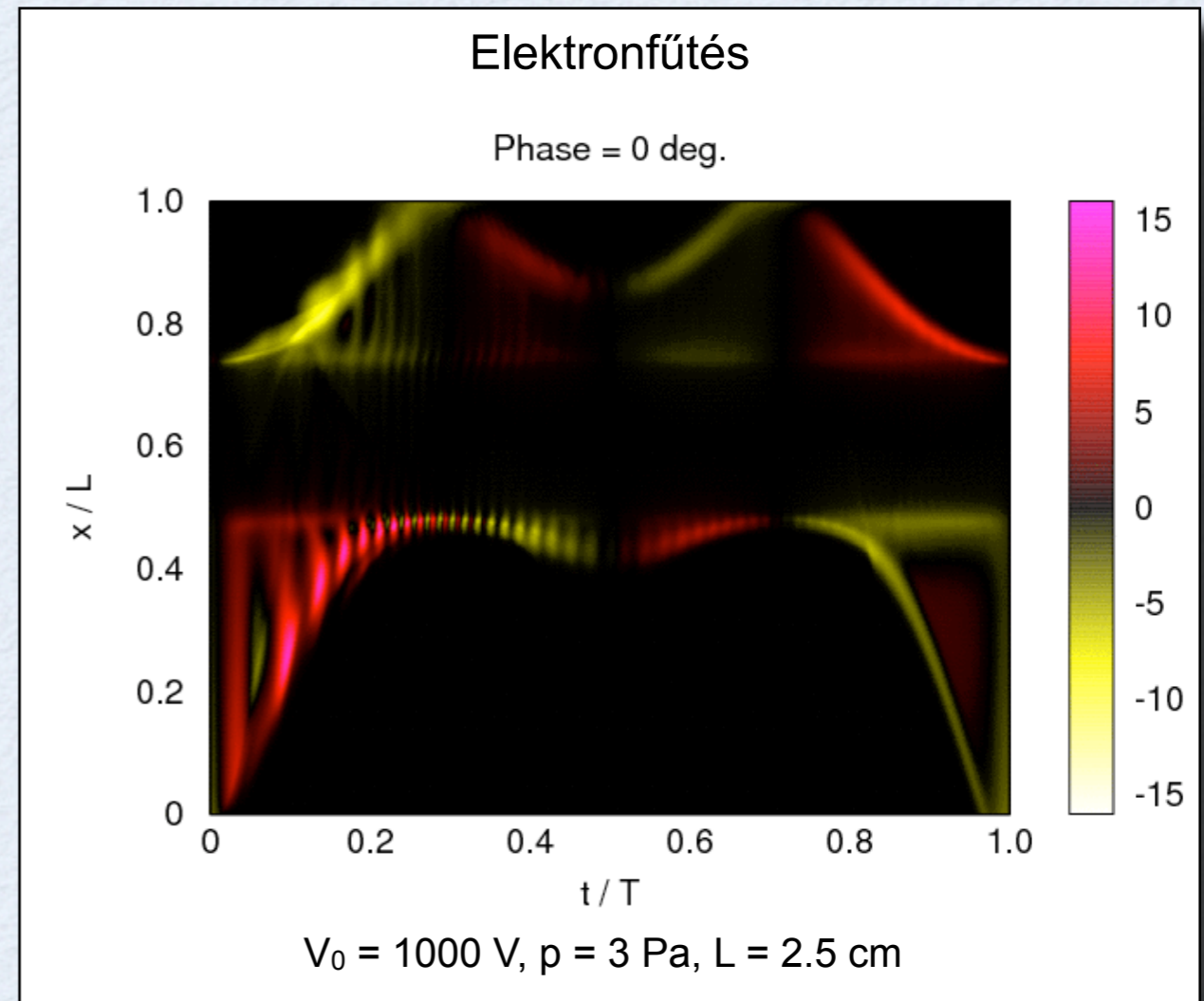
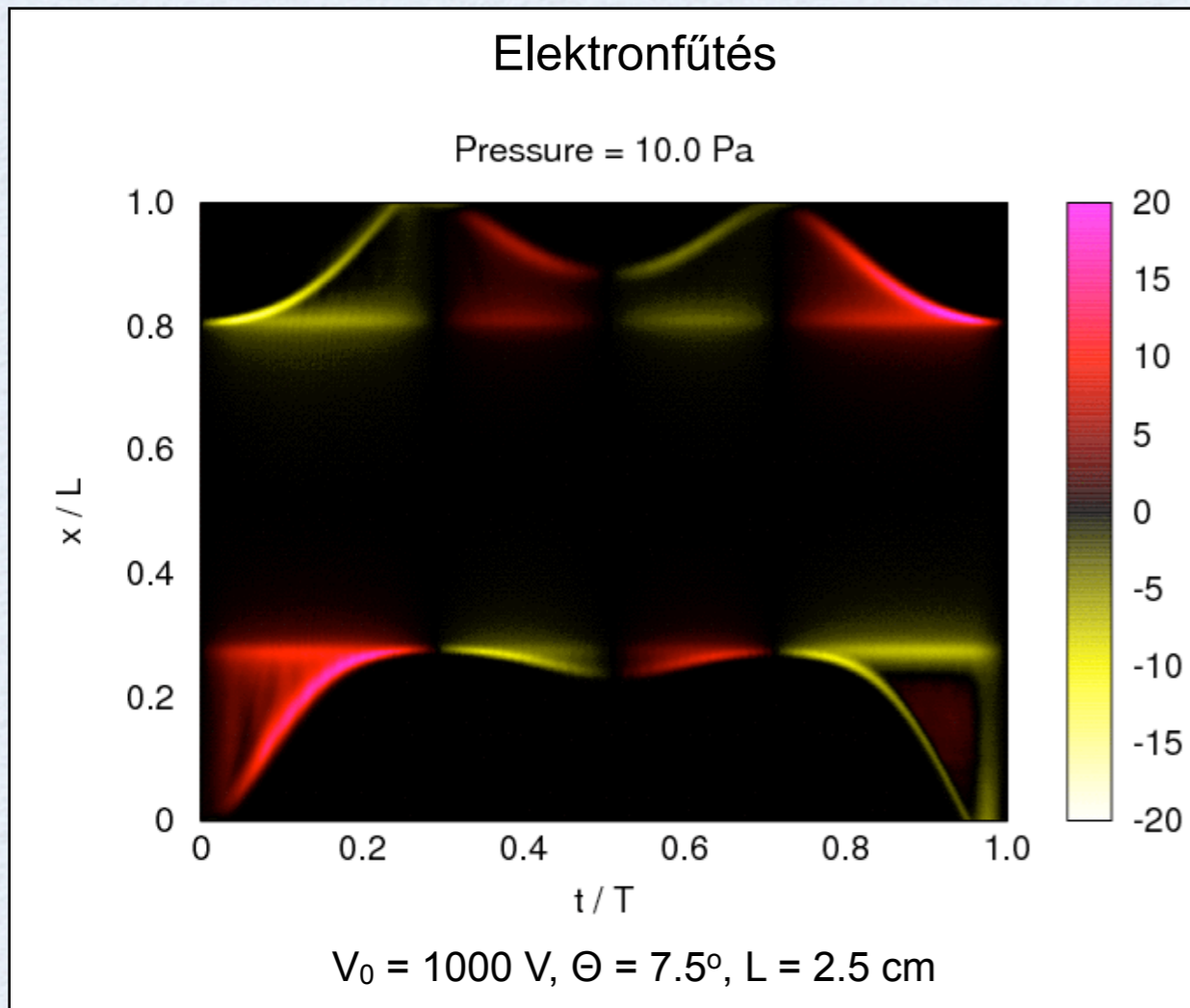
A plazma elektromos helyettesítő képe:



$$-\frac{1}{2e\epsilon_0\bar{n}_s A_s^2} Q^2 = \Phi_{\text{Sheath}}(t)$$

$$\frac{L}{\bar{n}A} \frac{m\nu}{e^2} \left(\frac{1}{\nu} \frac{\partial}{\partial t} + 1 \right) I(t) = \Phi_{\text{Bulk}}(t)$$

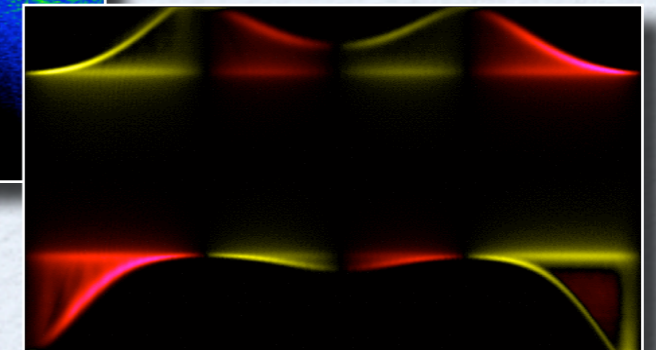
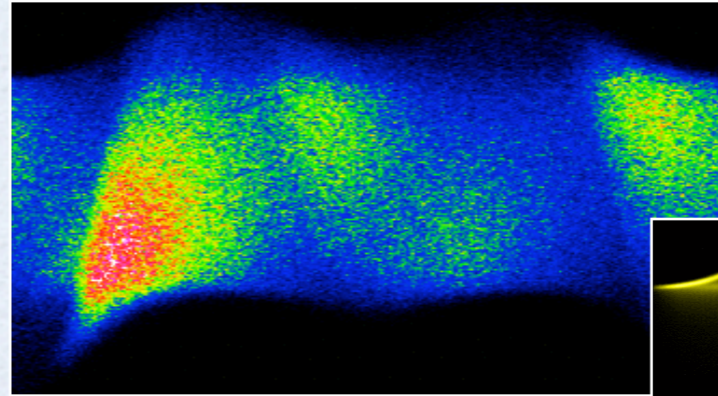
$$\Phi(t) = \Phi_{\text{sheath},1}(t) + \Phi_{\text{sheath},2}(t) + \Phi_{\text{Bulk}}(t)$$



Z. Donkó, J. Schulze, U. Czarnetzki and D. Luggenhölscher, Appl. Phys. Lett. 94, 131501 (2009).

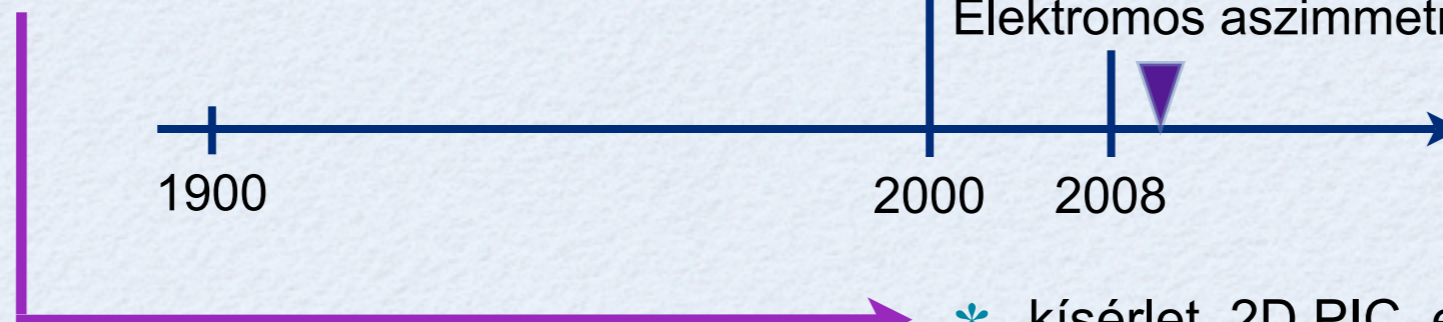
Összefoglalás

- * Elektromos gázkisülések és alkalmazásaik
- * Gáz átütése
- * Plazma-felület kölcsönhatás
- * Egyenáramú / Rádiófrekvenciás gázkisülések
- * Modellézés - szimuláció módszerei
- * Ionfluxus / Ionenergia szabályozása
- * Szimulációk - mérések
- * Hogyan tovább?? (SZFKI és RUB...)



2f (3f) RF gázkisülések (V_{LF} , V_{HF})

Elektromos aszimmetria (f & 2f, θ)



- * kísérlet, 2D PIC, elektronegatív gázok, γ , ...

Köszönet

- * Ruhr University Bochum: U. Czarnetzki, J. Schulze, D. Luggenhölscher, E. Schüngel
- * OTKA
- * SZFKI