

Bevezetés a fúziós plazmafizikába

Részecskék ütközése plazmákban, transzport

Dr. Gergő Pokol



BME NTI

Bevezetés a fúziós plazmafizikába

2019. október 15.

Program

Dátum	Előadó	Cím
Szeptember 10	Pokol	Energiatermelés, fúziós reaktor felépítése, Lawson-kritérium, plazma alapok.
Szeptember 17	Pokol	Töltött részecskék ütközésmentes mozgása mágneses térben.
Szeptember 24	Pokol	Mágneses összetartás: konfigurációk.
Október 1	Veres	Termodinamikai egyensúly, ionizációs és sugárzási folyamatok plazmában.
Október 8	Pokol	Bevezetés mágnesezett plazmák elméleti leírásába: kinetikus elmélet, MHD.
Október 15	Pokol	Részecskék ütközése plazmában: ellenállás, transzport.
Október 22	Földes ?	Mikrorobbantásos fúzió.
Október 29	Pokol	Mágnesesen összetartott plazma egyensúlya, instabilitások.
November 5	Zoletnik	Laboratóriumi kísérletek: plazma előállítás, fűtés, plazma-fal kapcsolat.
November 12		BME TDK Konferencia
November 19	Zoletnik	Fúziós diagnosztika.
November 26	Zoletnik	Aktuális eredmények mágneses összetartású berendezéseknél.
December 3	Veres	Fúziós Útiterv
December 10	Raczkevi, Kedves, Aladi	Részecskegyorsítás lézerplazmával

Elméleti leírások összefoglalás

Kinetikus elmélet: statisztikus megközelítés, Boltzmann-egyenletek az eloszlásfüggvények időbeli változására + Maxwell-egyenletek. Általánosan használható, de makroszkopikus problémákra erőforrásigényes.

Többfolyadék elmélet: Ha az eloszlásfüggvények lokálisan közel Maxwell-eloszlásúak (sok az ütközés), akkor a Boltzmann-egyenlet első 3 momentuma (mérlegegyenletek) jellemzik az eloszlásfüggvény időfejlődését + lezárás + Maxwell-egyenletek. A különböző folyadékok dinamikája különböző lehet.

Rezisztív MHD: Nagy léptékű és lassú folyamatok, egyensúlyok leírására. Egyetlen, elektromosan töltött részeket tartalmazó, semleges folyadék: Kontinuitás + Navier-Stokes + állapotegyenlet + Ohm-törvény + Maxwell-egyenletek.

Ideális MHD: Nagy léptékű és lassú, de a mágneses tér diffúziójához képest gyors folyamatok. A mágneses tér együtt mozog a plazmával, a mágneses tér topológiája nem változik.

Óravázlat

1. Az ütközések jellemzése
2. Transzport nemmágnesezett, gyengén ionizált plazmában
3. Transzport teljesen ionizált plazmában
4. Vezetőképesség
5. Klasszikus transzport
6. Neoklasszikus transzport
7. Anomális transzport

Ütközések jellemzése – ismétlés

Hatáskeresztmetszet: ~ a felület, „amit az ütköző részecske lát”. σ [m²]

Átlagos szabad úthossz: ~ átlagos úthossz az ütközések között. λ [m]

Példa: n_n sűrűségű semleges gáz

$$\lambda = \frac{1}{n_n \sigma}$$

Ütközési idő: ~ ütközések között átlagosan eltelt idő (v sebességű részecskére). $\tau \equiv \lambda/v$ [s]

Példa: n_n sűrűségű semleges gáz

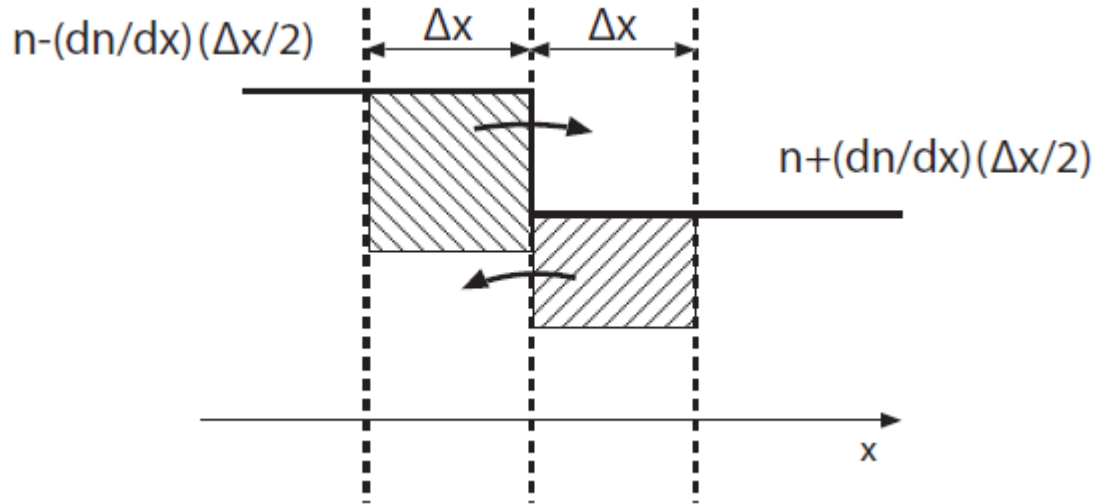
$$\tau = \frac{1}{n_n \sigma v}$$

Ütközési frekvencia: ~ ütközési idő reciproka $\nu \equiv 1/\tau$ [1/s]

Adott sebességeloszlású részecskepopulációra: $\nu = n_n \langle \sigma v \rangle$

Adott sebességű részecskepopulációra: $\nu = n_n \sigma v_{th}$

Véletlen bolyongás – diffúzió



$$\Gamma \frac{1}{\nu_c} = \frac{1}{2} \Delta x \left(n - \frac{\partial n}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \frac{1}{2} \Delta x \left(n + \frac{\partial n}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \implies \Gamma = -\frac{1}{2} (\Delta x)^2 \nu_c \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Gamma = -D \frac{dn}{dx} \implies \boxed{D = \frac{\Delta x^2 \nu_c}{2}}$$

Transzport nemmágnesezett, gyengén ionizált plazmában

Részecskefluxus (folyadék mozgásegyenlet súrlódási taggal):

(Fick-törvény)

$$\Gamma_a \equiv n \mathbf{V}_a = \mu_a n_a \mathbf{E} - D_a \nabla n$$

Mobilitás: $\mu_a = \frac{q_a}{m_a \nu_a}$

Diffúzió állandó: $D_a = \frac{kT_a}{m_a \nu_a}$

Einstein-reláció: $D_a = \frac{kT_a}{q_a} \mu_a$

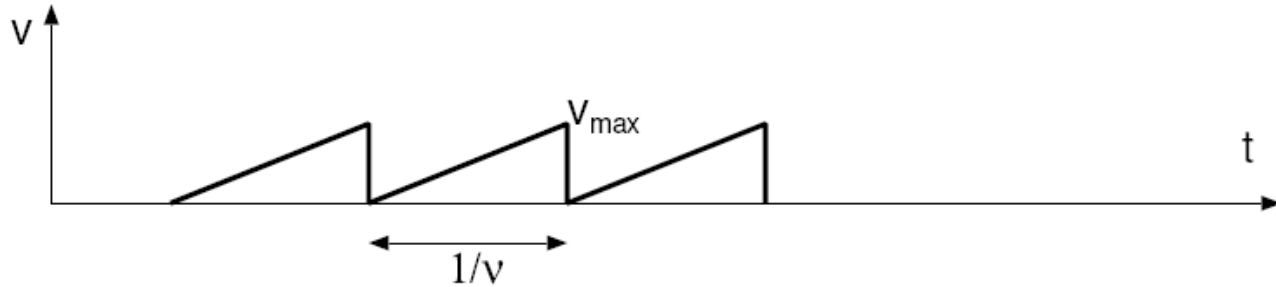
Ambipoláris transzport (kvázisemlegességből): $\Gamma_A \equiv \Gamma_e = \Gamma_i$

Ambipoláris elektromos tér: $\mathbf{E}_A = \frac{D_i - D_e}{\mu_i - \mu_e} \frac{\nabla n}{n}$

Ambipoláris diffúzió állandó: $D_A = \frac{\mu_i D_e - \mu_e D_i}{\mu_i - \mu_e} \approx 2D_i$

Kisülési csövek, plazma letörés

T Townsend-kisülés:



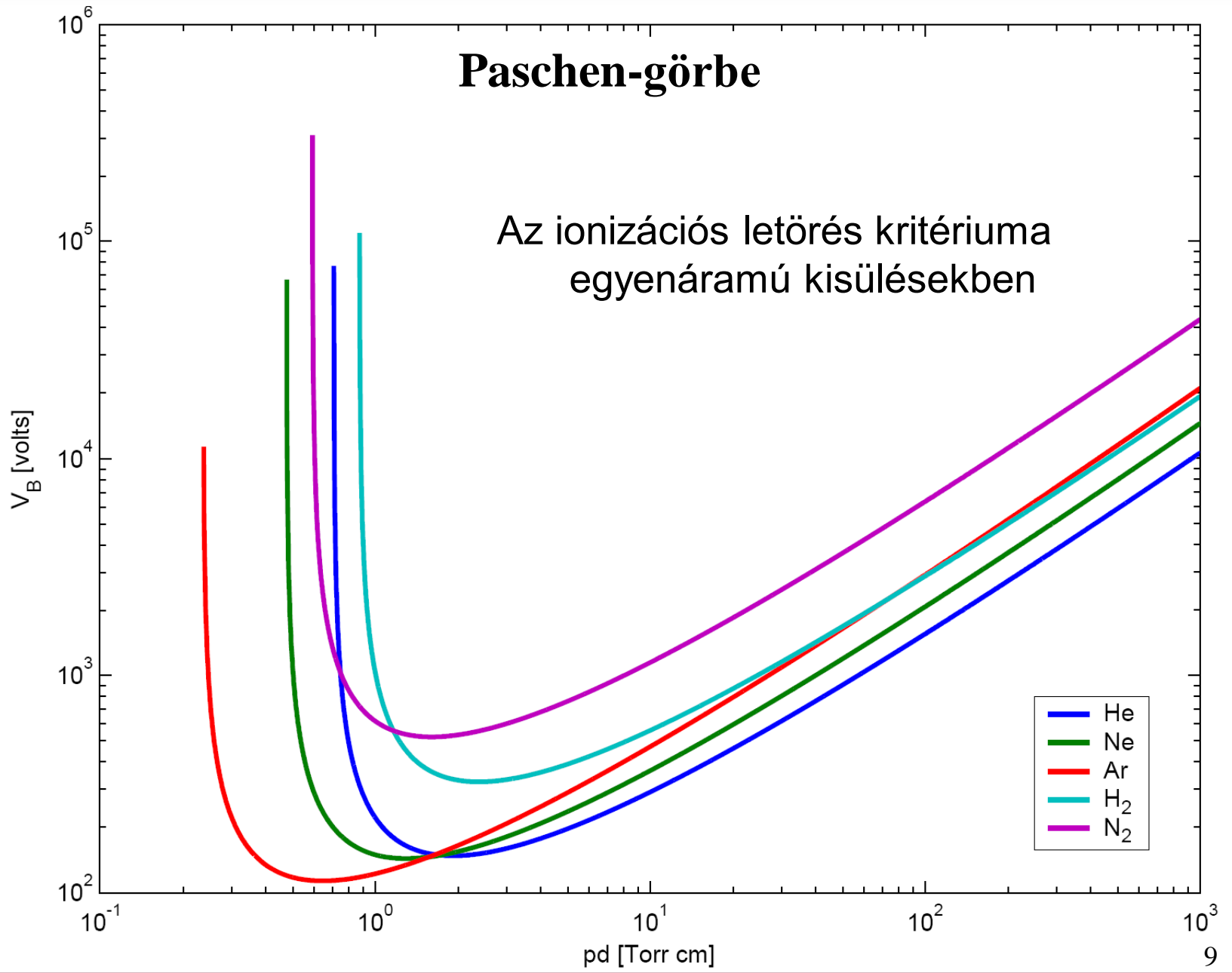
$$eE = \nu_c m v_{max} = \frac{1}{2} \nu_c m \langle v \rangle$$

Plazma letörés:

A részecskék ütközések között ionizációs energiánál nagyobb energiát nyernek → ionizációs lavina

$$n_e(x) \sim \exp \left\{ \ln(1 + \alpha) \frac{x}{v/\nu_c} \right\}$$

Lehet egyenáramú vagy mikrohullámú



Transzport teljesen ionizált plazmában

Különböző folyamatok elektronokra és ionokra.

Ugyanolyan részecskék közötti ütközések nem okoznak transzportot, mivel a tömegközéppont megmarad.

Impulzuscsera ionok és elektronok között: $\mathbf{R}_{ei} = -\mathbf{R}_{ie}$

Különböző ütközési frekvenciák: $m_e n (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) \nu_{ei} = -m_i n (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i) \nu_{ie}$

Coulomb-ütközések:

Egyszerű modell: nagyszögű szóródás különálló ütközésekben:

$$\Delta(m_e v) \approx |F t_{pass}| \approx \frac{Z_i e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} \frac{r_0}{v} \approx m_e v$$

$$\sigma \approx \pi r_0^2 \approx \frac{\pi Z_i^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0 m_e v^2)^2}$$

$$\nu_{ei} = n_i \sigma v \approx \frac{\pi n_i Z_i^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0 m_e)^2 v^3}$$

*Részletes számítások szerint a kisszögű szórások kumulatív hatása dominál
 → szorzófaktorral helyes a formula: $\ln \Lambda = \ln \langle \lambda_D / r_0 \rangle \approx 10 - 20$*

Vezetőképesség – ellenállás

Ohm-törvény (mágneses erővonalak mentén):

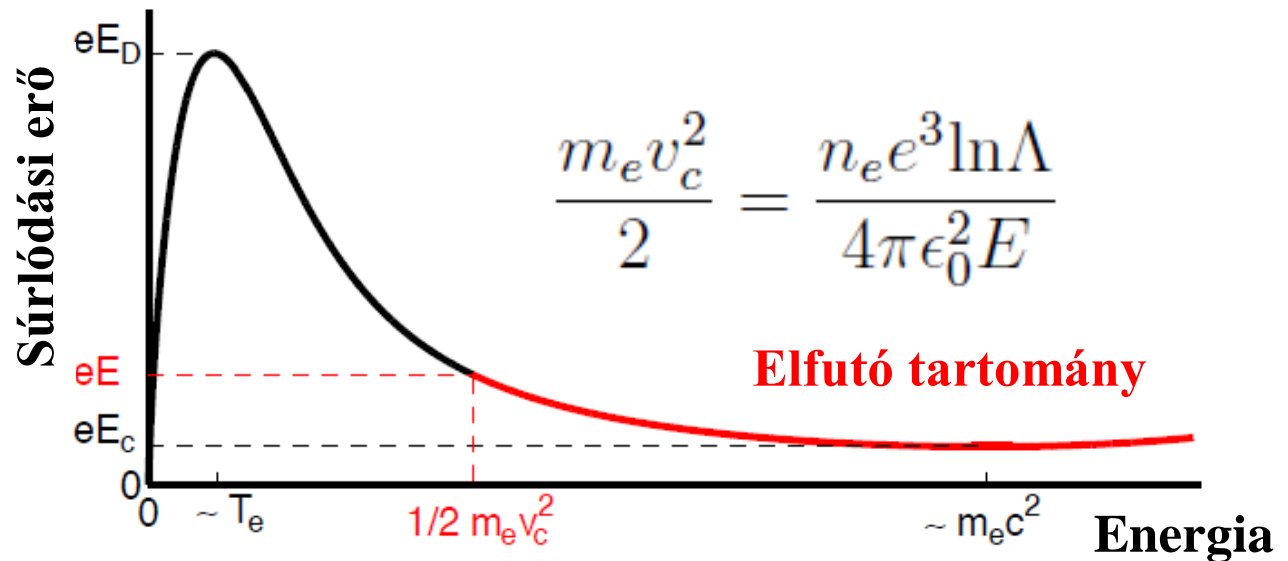
$$\mathbf{R}_{ei} = m_e n (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) \nu_{ei} = \eta n^2 Z_i e^2 (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) = \eta n \mathbf{j} = en \mathbf{E}$$

Fajlagos ellenállás (Ohmikus fűtés):

$$\eta = \frac{m_e}{n Z_i e^2} \nu_{ei} \approx \frac{\pi Z_i e^2 \ln \Lambda}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^3} \approx 5.2 \cdot 10^{-5} \frac{Z_i \ln \Lambda}{T_e^{3/2} [\text{eV}]} [\Omega\text{m}]$$

Elfutó elektronok:

$$E_c = \frac{n_e e^3 \ln \Lambda}{4\pi\epsilon_0^2} \frac{1}{m_e c^2}$$



Elfutó elektronok diszrupcióban



T+: -15.052 ms

Img#: -31 Cam: Phantom v.7 AcqRes: 800 x 600 Rate: 2000 Exp: 495 μ s EDR: 0 μ s First: -293 Last: 1596 Durat: 0.945 s

Range data:

Description:

Elfutó elektronok diszrupcióban



T+: +403.948 ms

Img#: 807 Cam: Phantom v.7 AcqRes: 800 x 600 Rate: 2000 Exp: 495 μ s EDR: 0 μ s First: -293 Last: 1596 Durat: 0.945 s

Range data:

Description:

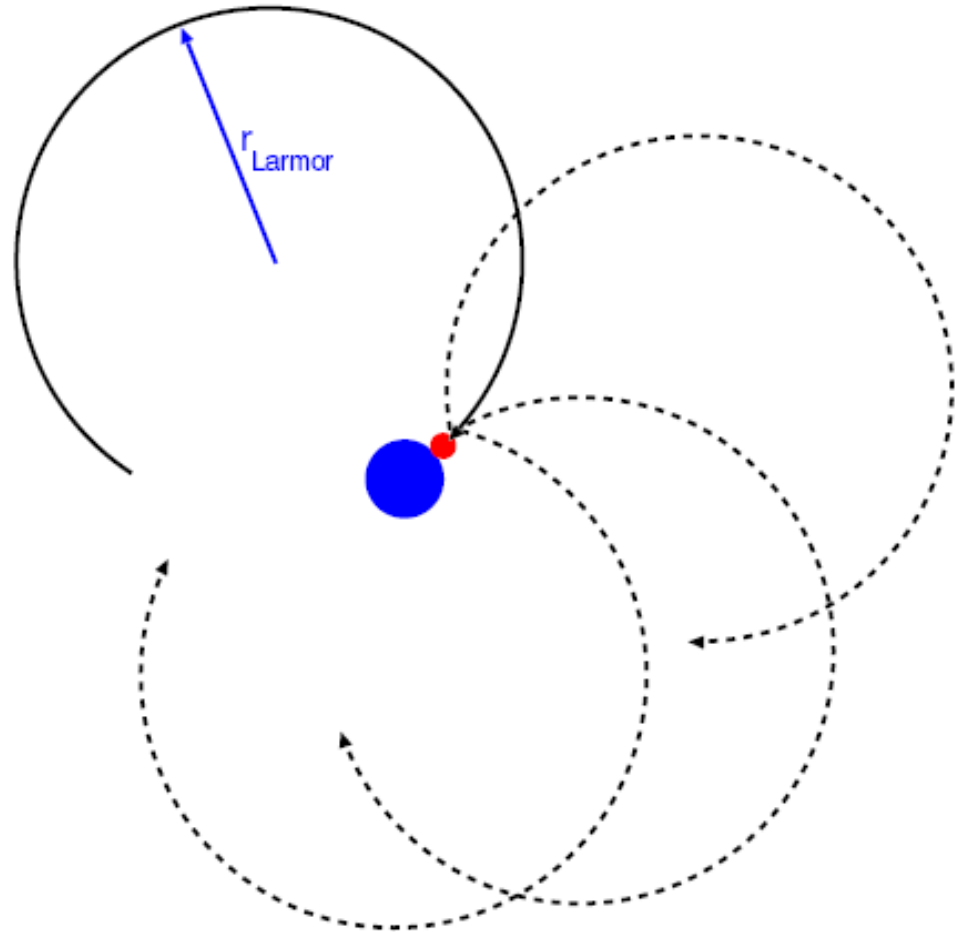
Klasszikus transzport

Diffúzió állandó: $D = \frac{\Delta x^2 v_c}{2}$

**Klasszikus transzport
(homogén mágneses térben):**

$$D_{\parallel} = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_c} \right)^2 v_c \sim T^{5/2}$$

$$D_{\perp} = \frac{1}{2} (r_L)^2 v_c \sim T^{-1/2}$$



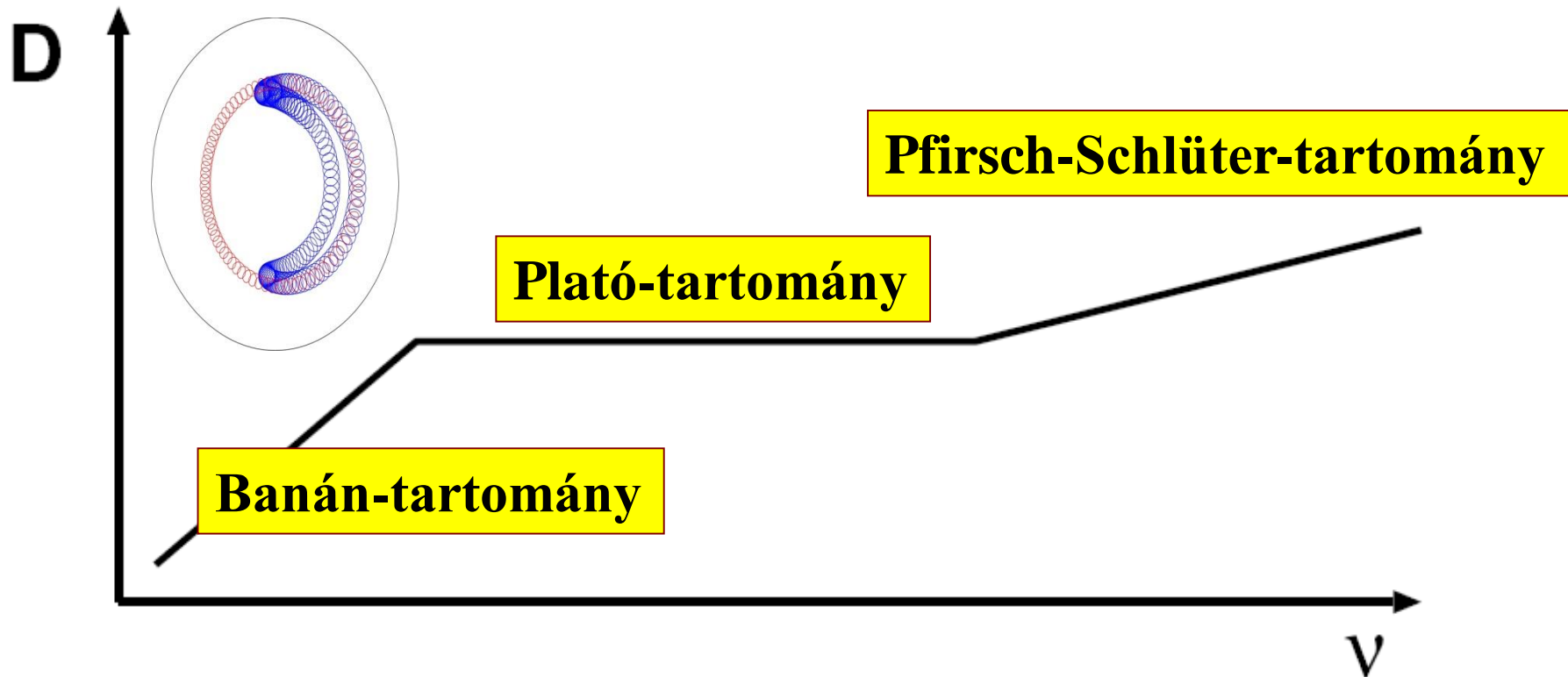
Automatikusan ambipoláris $D_{\perp e} = D_{\perp i}$

Neoklasszikus transzport

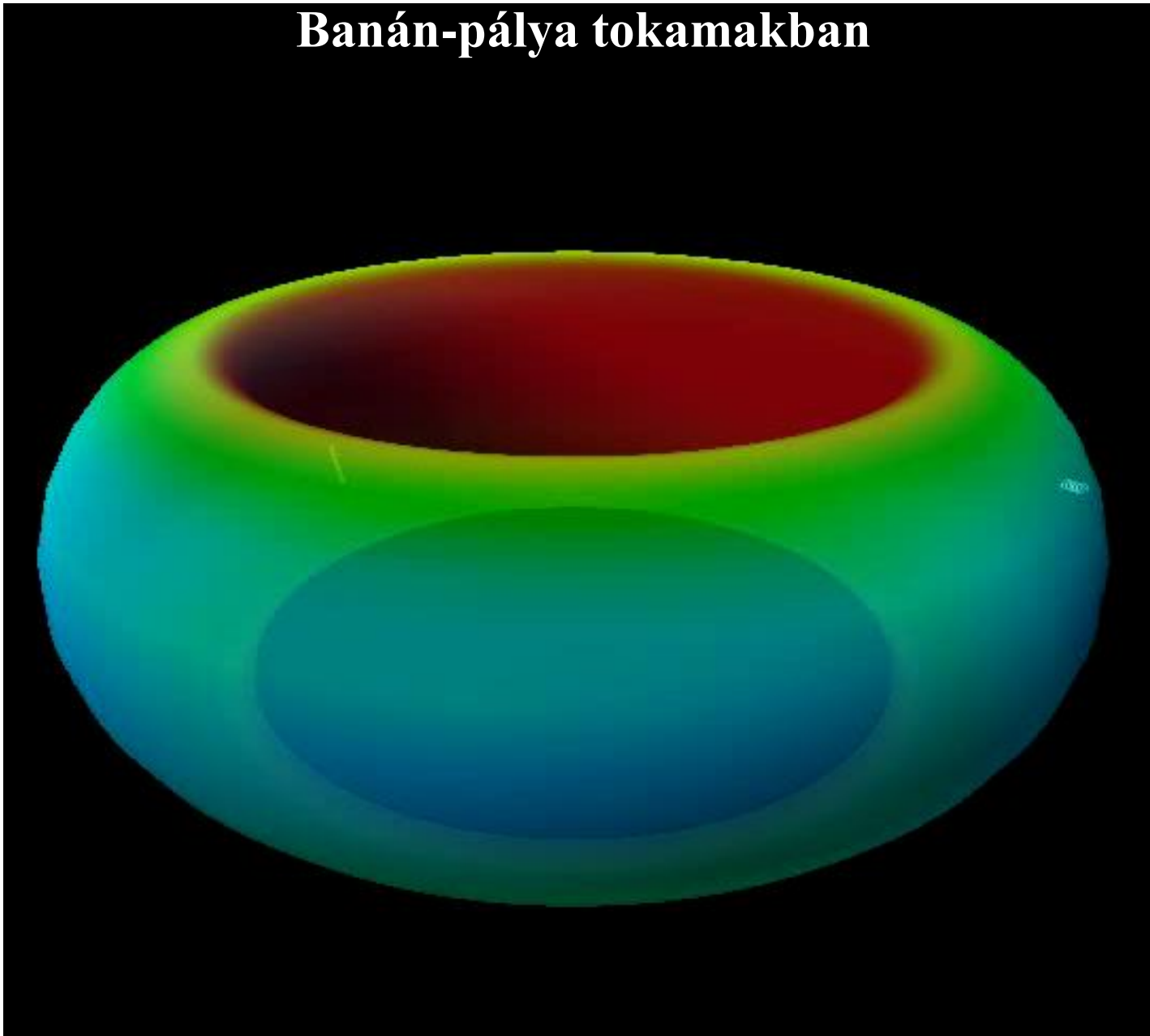
Ütközéses transzport inhomogén mágneses térben a driftek figyelembe vételével.

Nagyobb radiális lépéshossz → Nagyobb diffúzió állandók

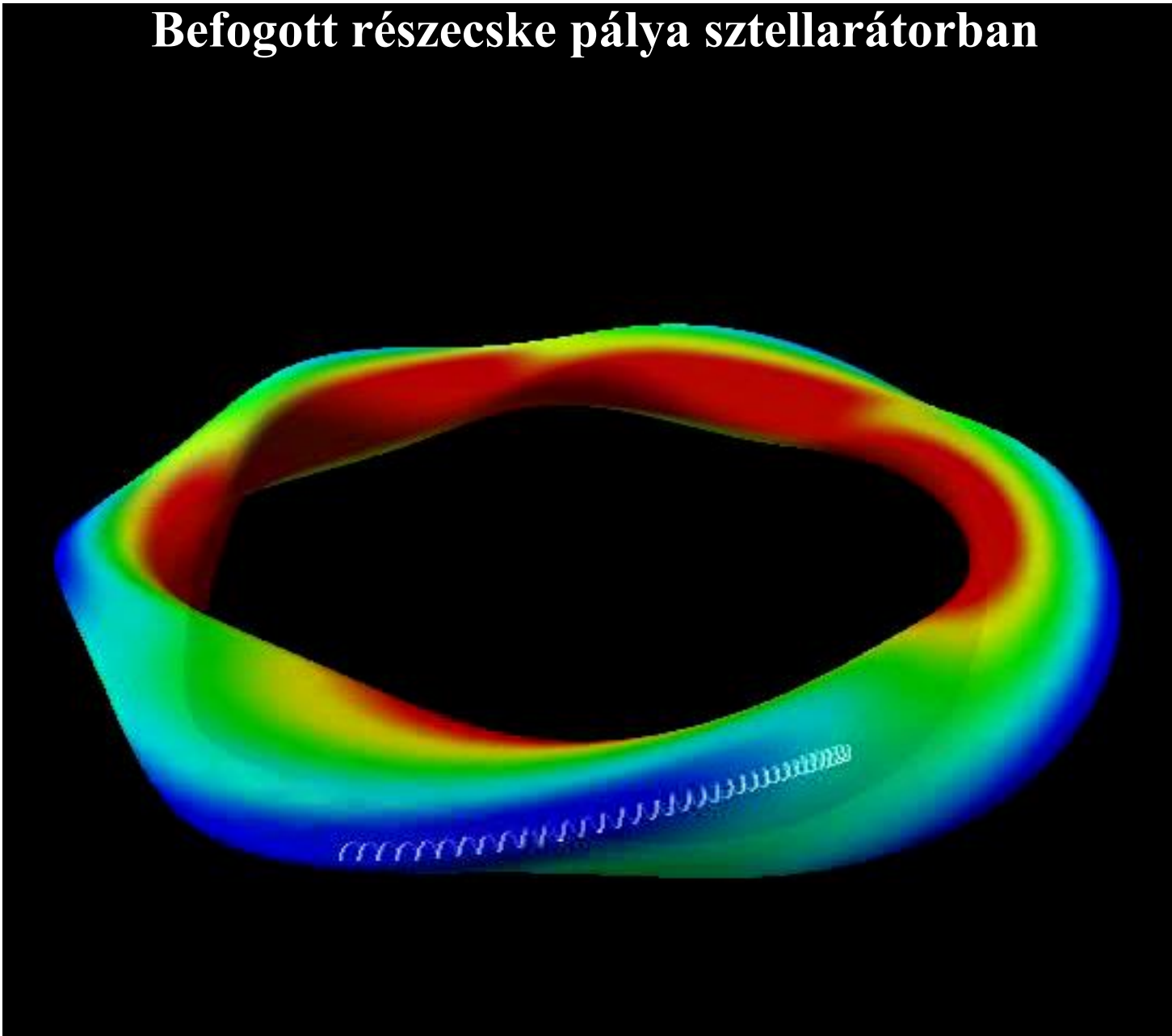
Banán-pálya → bootstrap áram $j_{BS} \approx \frac{dp}{dr}$



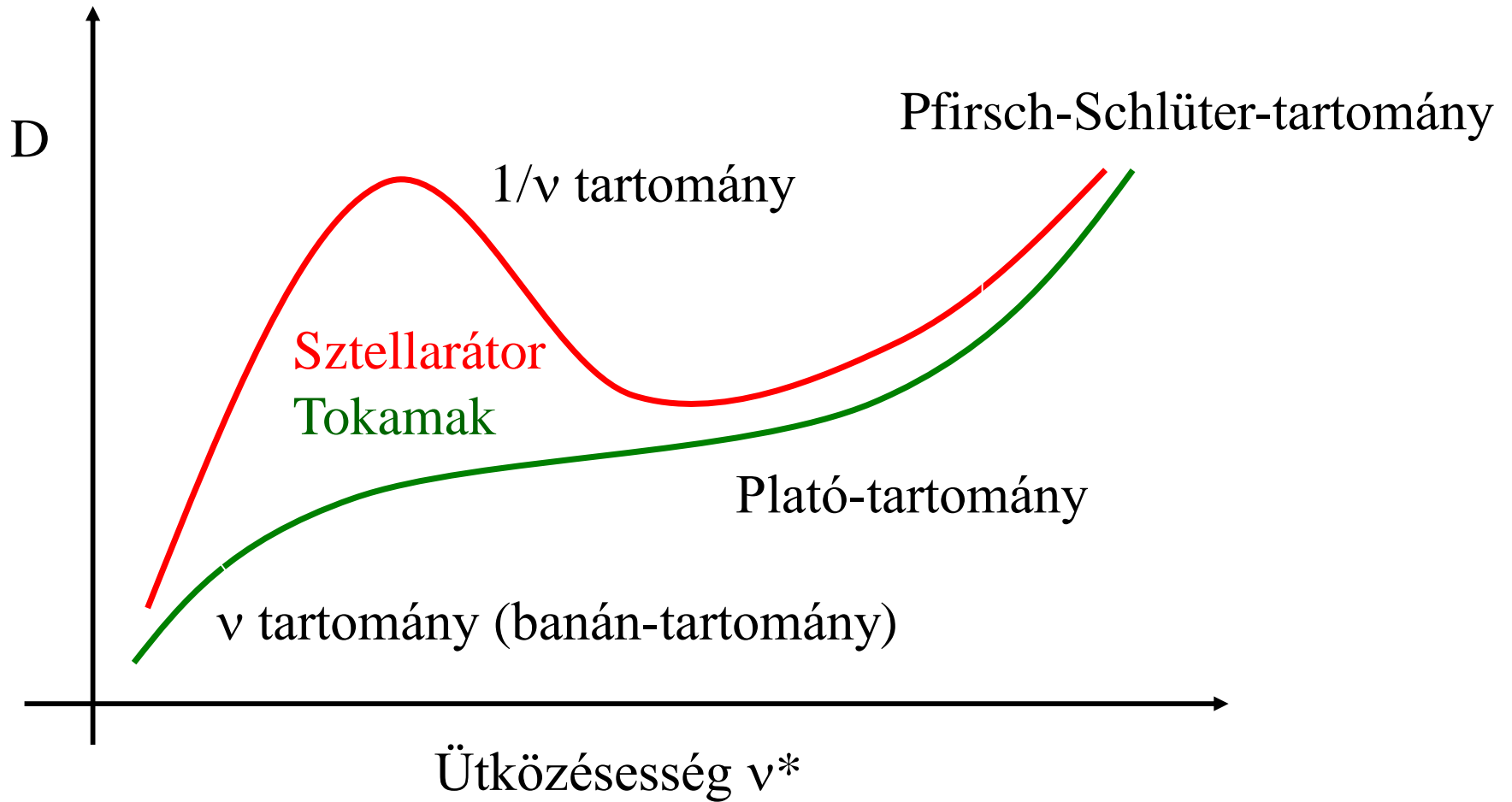
Banán-pálya tokamakban



Befogott részecske pálya sztellarátorban



Neoklasszikus transzport sztellarátorban



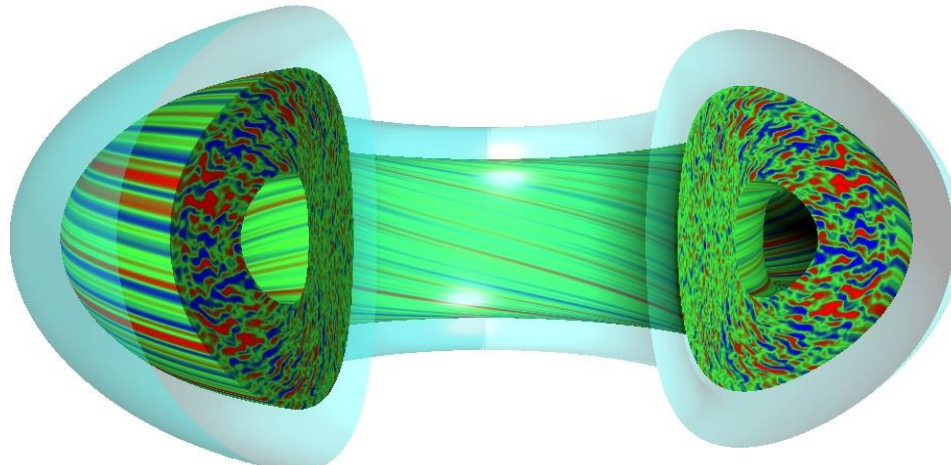
Anomális transzport

Neoklasszikus diffúzió: $D_{\perp} \sim \frac{T^{-1/2} n}{B^2}$

Bohm-diffúzió (empirikus) $D_B = \frac{1}{16} \frac{kT}{eB}$

Nincs egyszerű formula, nem diffúzív a transzport!

**Mikro-turbulencia: kisméretű örvények nemlineáris kölcsönhatása
 → intermittens, nemlokális, önszervező transzport.**



ITG turbulencia

Gyrokinetic Particle Simulations of Plasma Microinstabilities

Simulation by
Zhihong Lin et al.

Science 281, 1835 (1998)

Visualization by
Scott Klasky

Princeton Plasma Physics Laboratory