

Bevezetés a fúziós plazmafizikába 4.

Termodinamikai egyensúly, ionizációs és
sugárzási folyamatok plazmában

Dr. Veres Gábor, Dr. Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

Bevezetés a fúziós plazmafizikába

2019. október 1.

Tematika, időbeosztás

| 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 |

Ismétlés

Plazmaparaméter

$$\Lambda = 4\pi n \lambda_D^3$$

$$N_D = \frac{4\pi}{3} n \lambda_D^3 \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e q_e^2}}$$

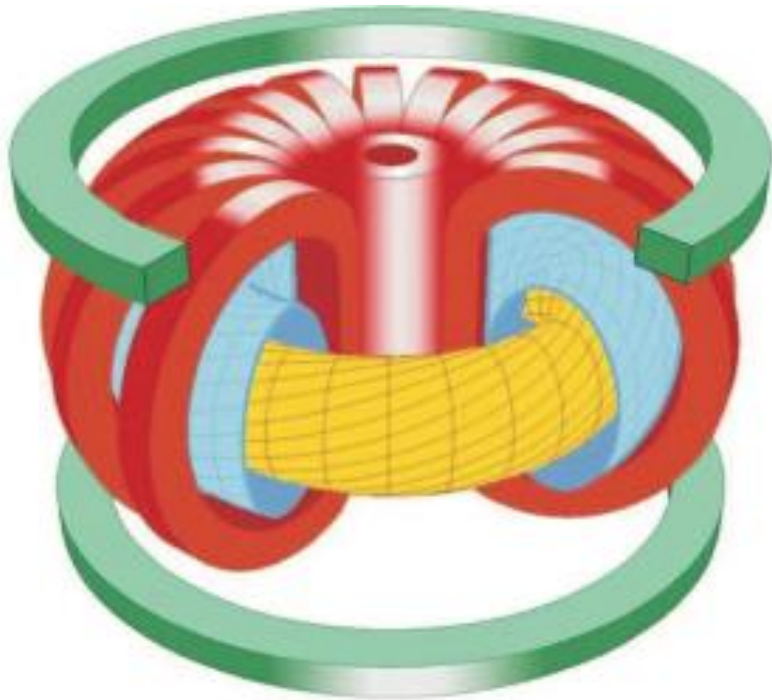
Csatolási együttható

$$\Gamma = \frac{E_C}{k T_e} \quad E_C = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 \langle r \rangle}$$

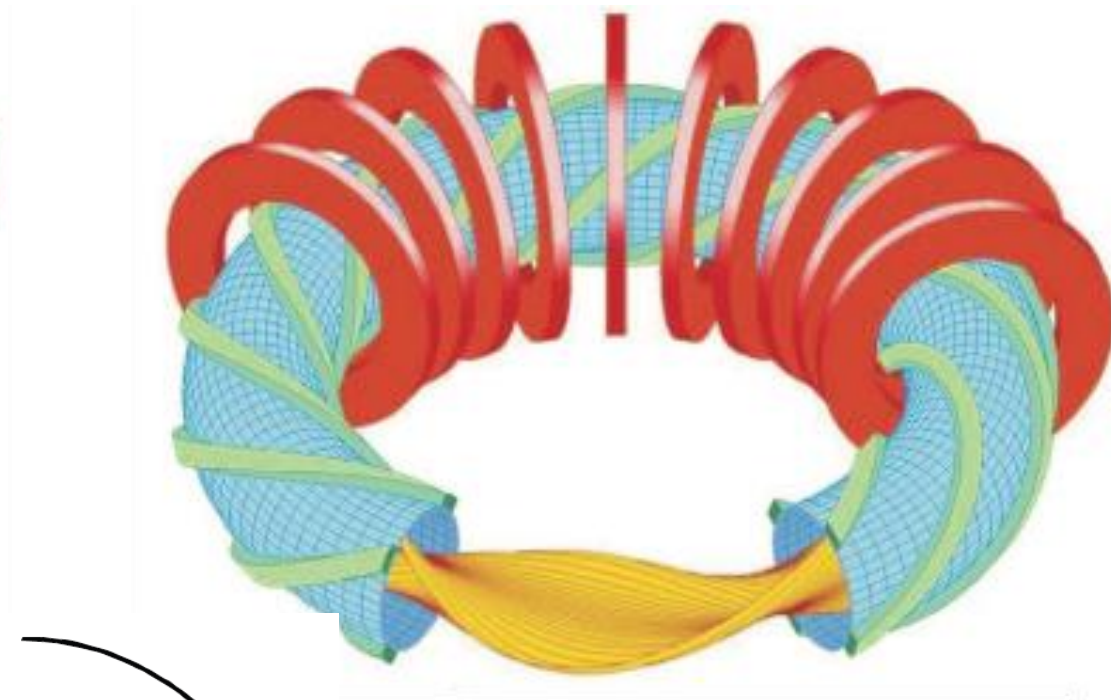
| Plazmafajta | Elektron- hőmérséklet (eV) | Elektron- sűrűség (m ⁻³) | Csatolási paraméter (Γ) |
|-----------------------|-------------------------------|---|----------------------------|
| Tokamak fő plazma | 1500 | 10 ¹⁵ | 1,55·10 ⁻⁷ |
| Pellet felhő | 10 | 10 ²³ | 1,08·10 ⁻² |
| Ívkisülés | 2 | 10 ²⁰ | 5,39·10 ⁻³ |
| Lézerplazma | 100 | 10 ²⁵ | 5·10 ⁻³ |
| Szilárdtest plazma | 0,025 | 10 ²⁴ | 9,28·10 ⁰ |

Ismétlés

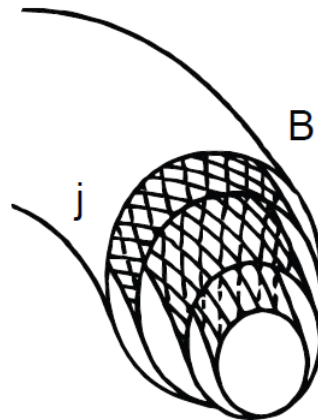
Tokamak



Stellarator



$$q = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum \phi_n}{\sum \vartheta_n}$$



$$q \cdot t = 1$$

Óravázlat

- 1. Elemi atomfizikai folyamatok**
- 2. Egyensúlyi eloszlások**
- 3. Rátaegyütthetők**
- 4. Rátaegyenletek**
- 5. Termalizációs folyamat**
- 6. A plazma sugárzása**
- 7. Plazma-fal kölcsönhatás**

A plazma összetétele

Elektronok

Ionok

→ különböző elemek

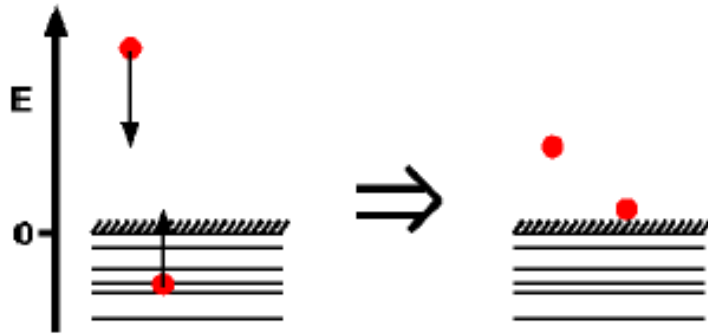
→ különböző ionizációs állapotban

→ különböző gerjesztett állapotban

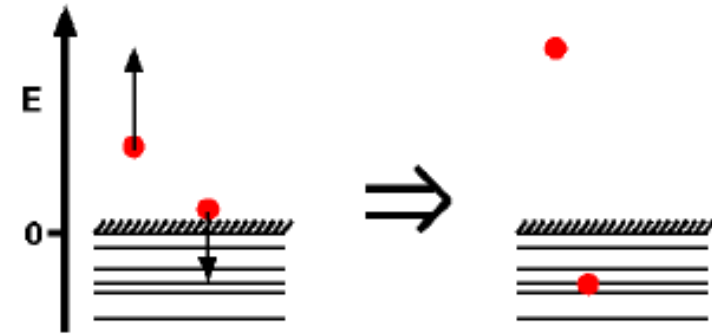
Sugárzás (fotonok)

Semlegesek

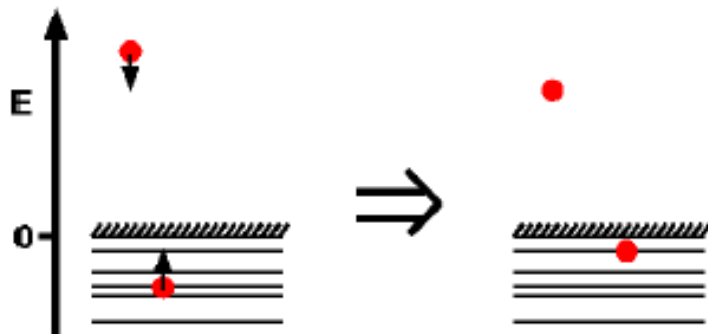
Elektronütközéses elemi folyamatok (+analóg folyamatok ionokkal)



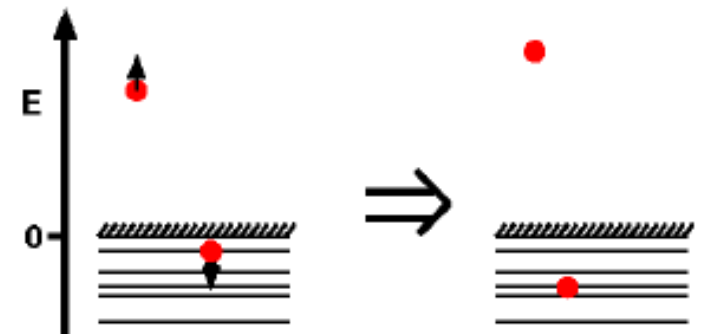
(a) Elektronütközéses ionizáció



(b) Kételektronos rekombináció

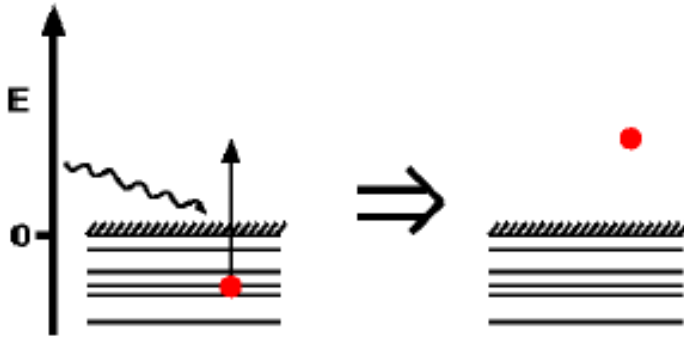


(c) Elektronütközéses gerjesztés

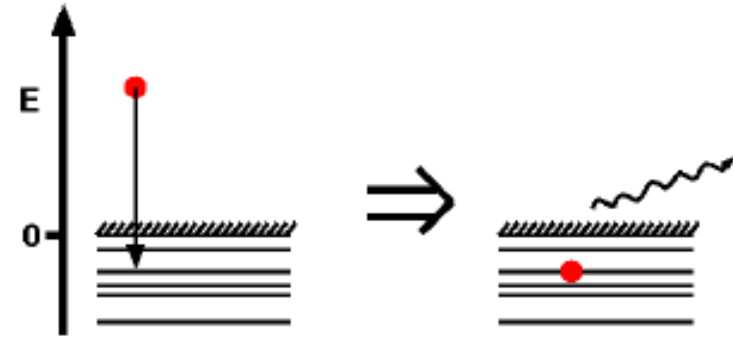


(d) Elektronütközéses legerjesztés

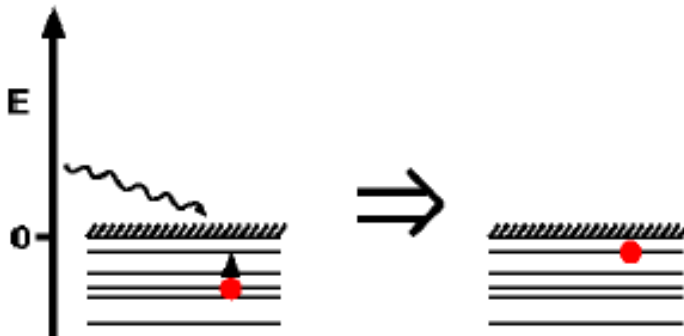
Sugárzásos elemi folyamatok



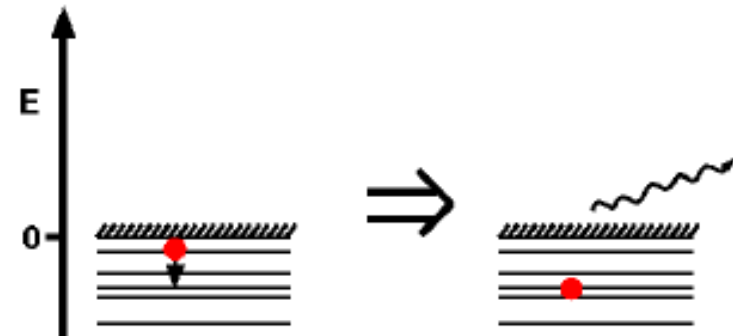
(a) Sugárzásos ionizáció



(b) Sugárzásos rekombináció

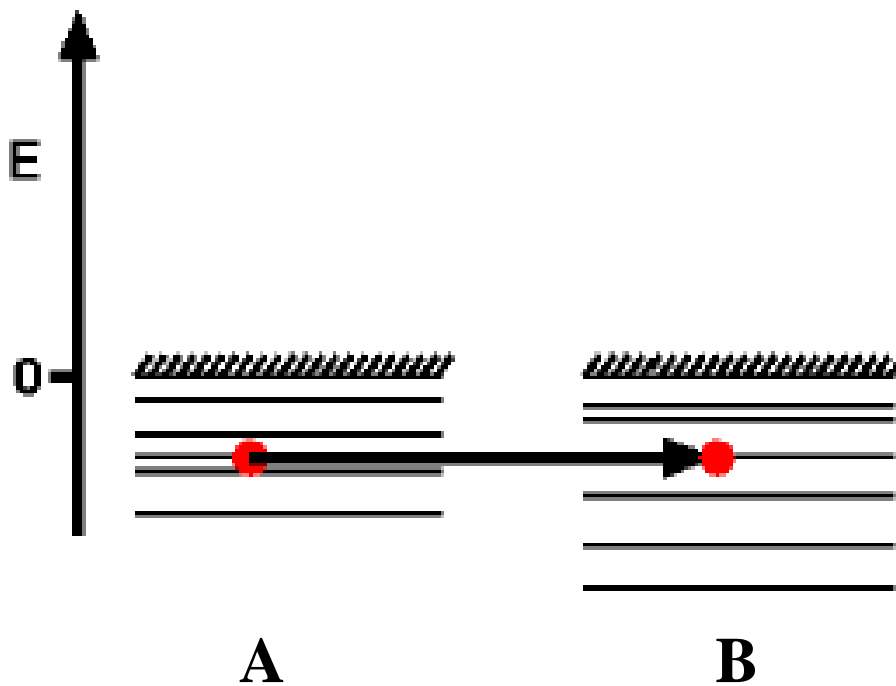


(c) Sugárzásos gerjesztés



(d) Spontán legerjesztődés

Töltéscsere



Nincs impulzuscsere!

Teljes termodinamikai egyensúly

Elég hosszú idő eltelte után egy zárt rendszerben **az intenzív mennyiségek homogén eloszlásúak** és **minden elemi folyamat dinamikus egyensúlyt tart az inverz folyamatával** így kialakulnak az egyensúlyi eloszlások.

Ionizációs állapotok (Saha-egyenlet):
$$\frac{n_i}{n_a} = \left(\frac{mkT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{1}{n_i} e^{-E_i/kT}$$

Gerjesztési állapotok (Boltzmann-eloszlás):
$$\frac{n_Z^p}{n_Z^q} = \frac{g_p}{g_q} e^{-E_{pq}/kT}$$

Sugárzás (Planck-törvény):
$$E(\lambda)d\lambda = 2c^2 h \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1} d\lambda$$

Sebességeloszlás (Maxwell-eloszlás):

$$f_{\mathbf{v}}(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT} \right],$$

Lokális termodinamikai egyensúly

A sugárzás elszökik.

Ha a sugárzásos folyamatok elhanyagolhatóak → **lokális termodinamikai egyensúly (LTE)**

Ionizációs állapotok (Saha-egyenlet): $\frac{n_i}{n_a} = \left(\frac{mkT}{\hbar^2}\right)^{3/2} \frac{1}{n_i} e^{-E_i/kT}$

Gerjesztési állapotok (Boltzmann-eloszlás): $\frac{n_Z^p}{n_Z^q} = \frac{g_p}{g_q} e^{-E_{pq}/kT}$

Sebességeloszlás (Maxwell-eloszlás):

$$f_{\mathbf{v}}(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}\right],$$

Korona egyensúly

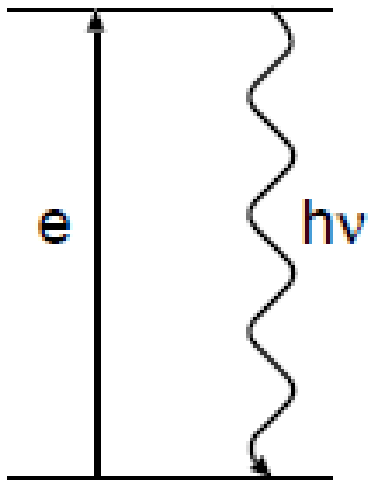
A sugárzás elszökik.

Ha elektronütközéses folyamatok egyensúlyozzák ki a sugárzásos folyamatokat → **korona egyensúly**

pl.: Nap koronája

Sebességeloszlás (Maxwell-eloszlás):

$$f_{\mathbf{v}}(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT} \right],$$



Rátaegyütthetők

Definíció: $\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v) v f_M(T, v) dv.$

Alkalmazás: $N = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$

Rátaegyenletek:

$$\frac{dn_0}{dt} = n_e [-\langle \sigma_i^0 v \rangle n_0 + \langle \sigma_r^1 v \rangle n_1]$$

$$\frac{dn_1}{dt} = n_e [-\langle \sigma_i^1 v \rangle n_1 + \langle \sigma_r^2 v \rangle n_2 + \langle \sigma_i^0 v \rangle n_0 - \langle \sigma_r^1 v \rangle n_1]$$

$$\frac{dn_2}{dt} = n_e [-\langle \sigma_i^2 v \rangle n_2 + \langle \sigma_r^3 v \rangle n_3 + \langle \sigma_i^1 v \rangle n_1 - \langle \sigma_r^2 v \rangle n_2]$$

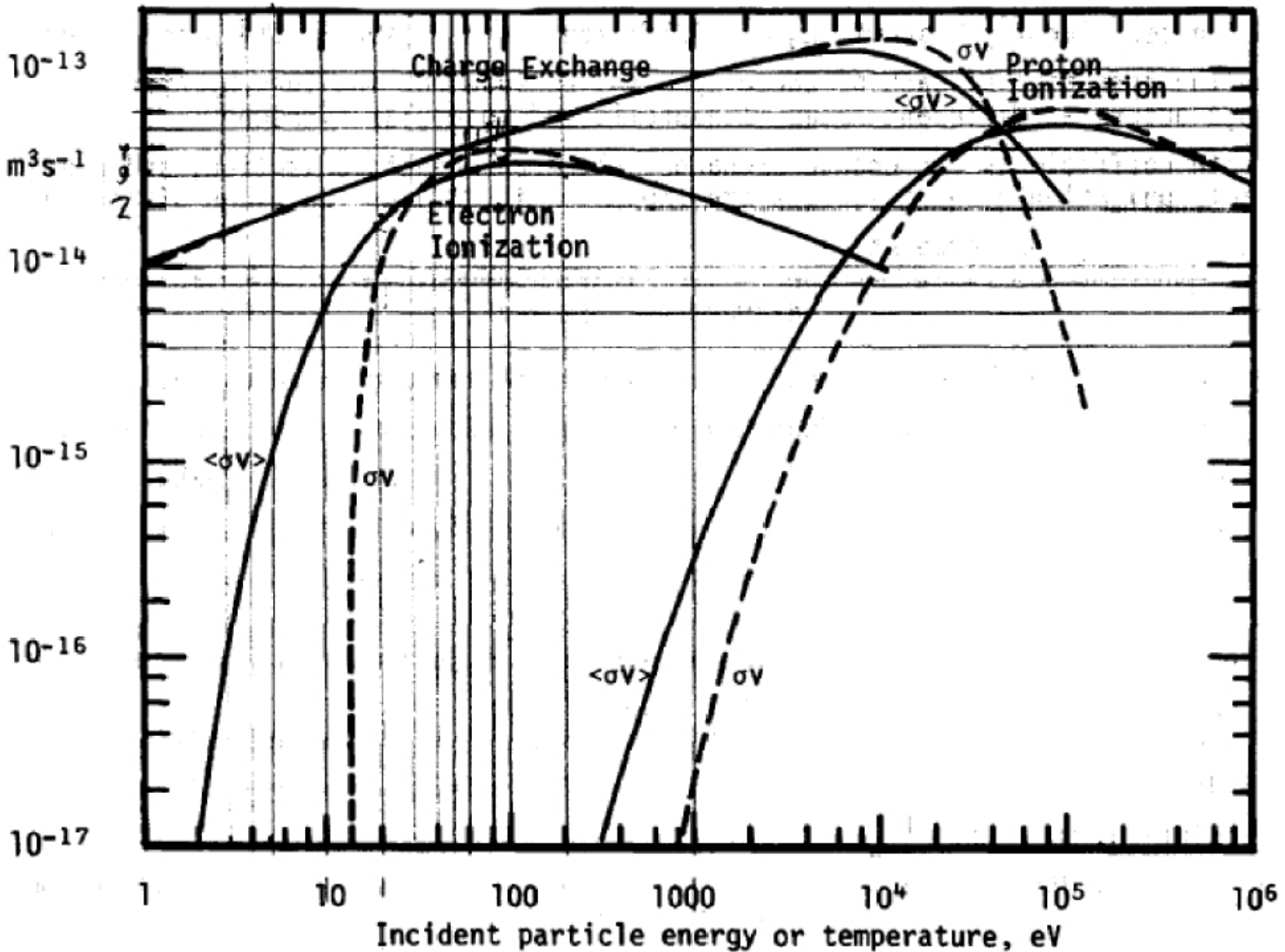
.

.

.

.

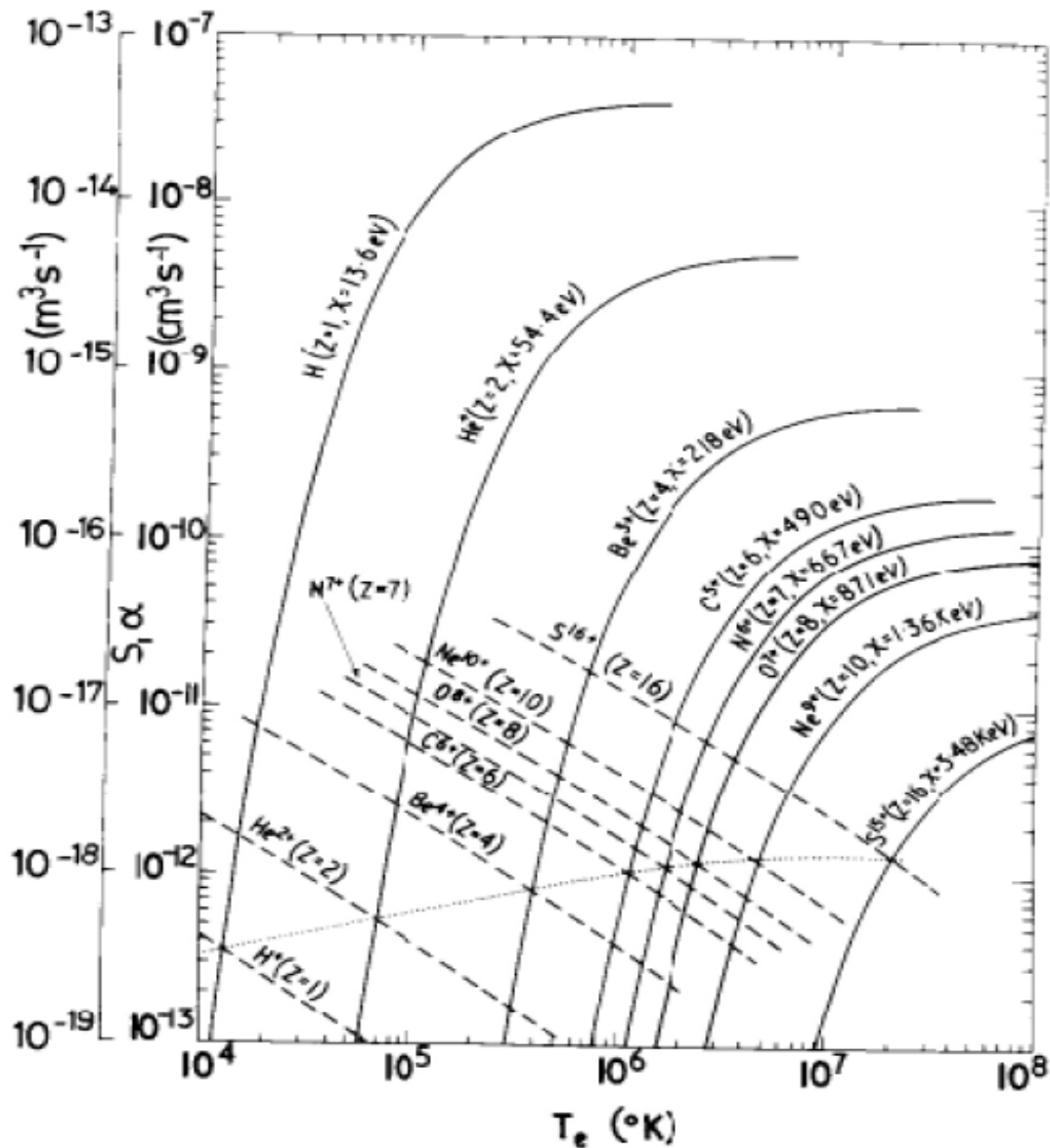
Elektronvesztással járó folyamatok hidrogénben



Ionizációs és rekombinációs rátaegyütthatók

Különböző hidrogén-szerű ionokra.

50%-os ionizáció hőmérséklete a metszetben.



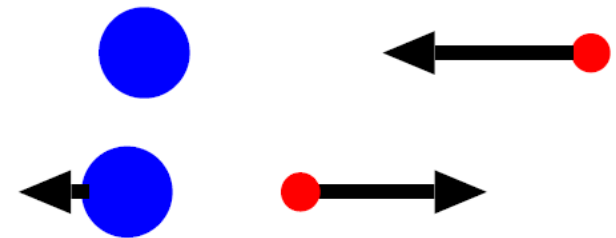
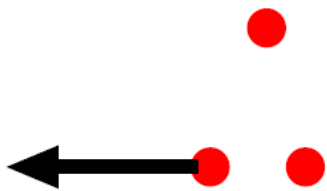
Termalizáció

A Maxwell-eloszlás kialakulása ütközések által

Ütközési frekvencia: $\nu = n \langle \sigma v \rangle \approx n \sigma \sqrt{\frac{kT}{m}}$

Ütközési idő: $\tau_c = 1/\nu$

Energiaszere egy ütközésben:



$$\Delta E \approx E$$

$$\Delta E \approx \frac{m_1}{m_2} E \quad (m_1 \ll m_2)$$

Termalizációs idők

Az energia eloszlásának karakterisztikus ideje: $\tau_{12} \approx \tau_c \frac{E}{\Delta E}$

Z=1 (hidrogén):

$$\tau_{ee} : \tau_{ii} : \tau_{ei} = 1 : \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^{1/2} : \left(\frac{m_1}{m_2} \right)$$

A fűtések és a veszteségek különbözőek az elektronokra és ionokra → **különböző ion- és elektronthőmérsékletek!**

A plazma sugárzása

Különböző elektronátmenetek okozzák:

1. Szabad-szabad átmenet:
→ **Fékezési sugárzás**
2. Szabad-kötött átmenet:
→ **Rekombinációs sugárzás**
3. Kötött-kötött átmenet:
→ **Vonalas sugárzás**

Elhanyagolható: ion fékezési sugárzás, elektron ciklotron emisszió.

Fékezési sugárzás

Az elektronok rugalmas ütközések által okozott gyorsulása okozza.

Lesugárzott teljesítmény: $P_B = 1.4 \cdot 10^{-28} n_e \sqrt{T_e} Z_{eff} [\text{W}/\text{m}^3]$

Effektív iontöltés: $Z_{eff} = \frac{\sum n_z Z^2}{n_e}$

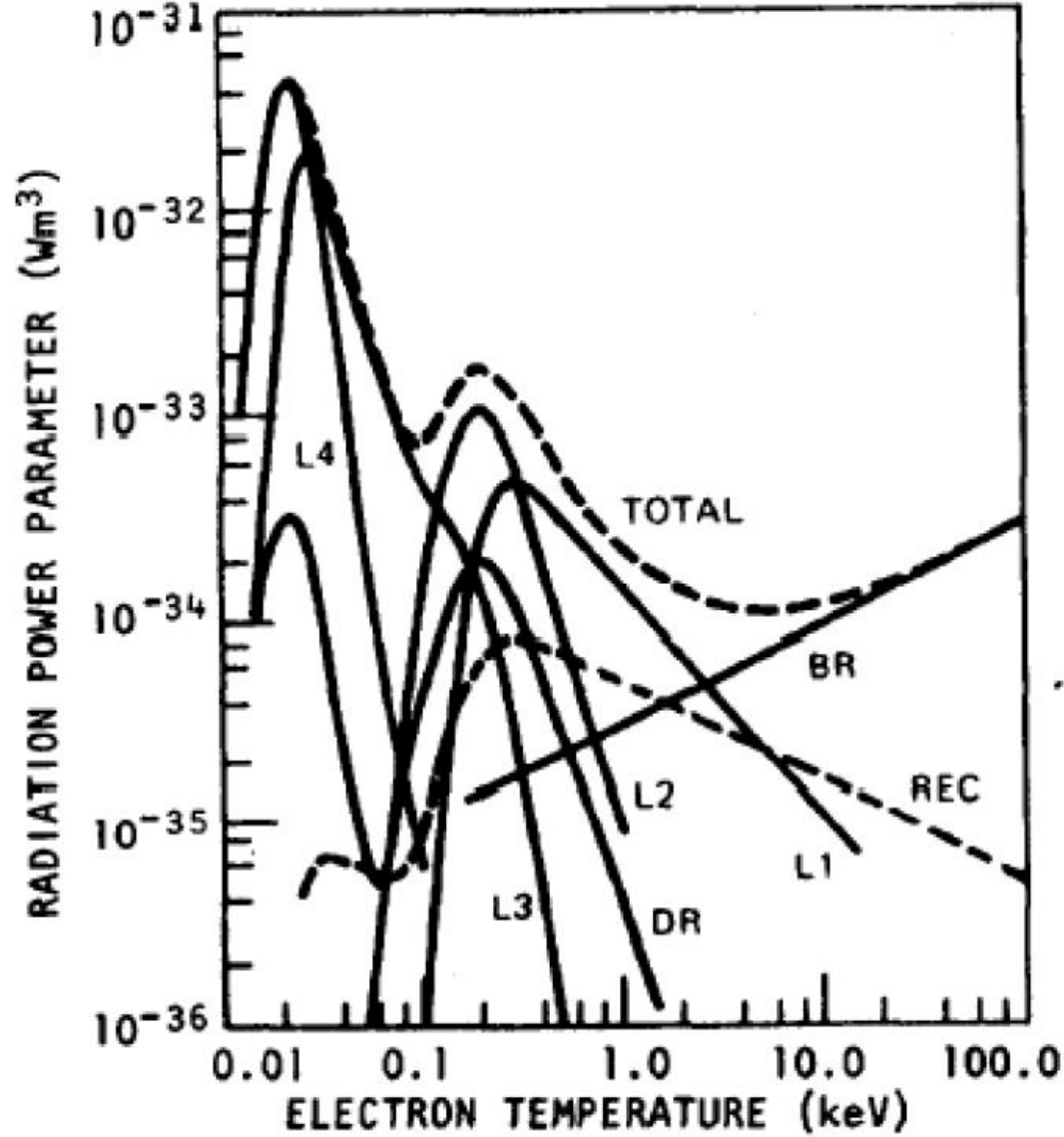
Folytonos spektrum $\lambda_{max} = 0.62/T_e [\text{keV}] \text{nm}$

Rekombinációs sugárzás

Elektronok ionok által történő befogása okozza.

Folytonos spektrum egy küszöbenergia fölött.

Vonalas sugárzás

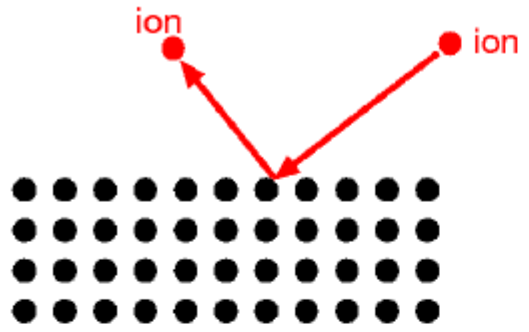


Bonyolult spektrum

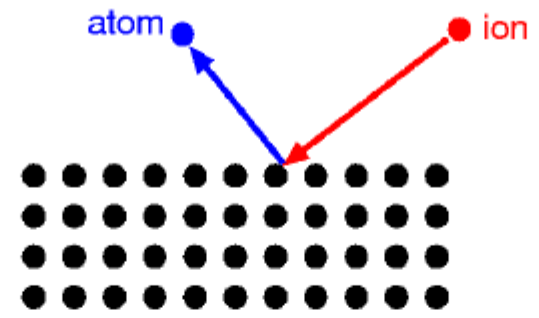
**Példa:
oxigén plazma sugárzása**

Hőmérsékleti instabilitás!

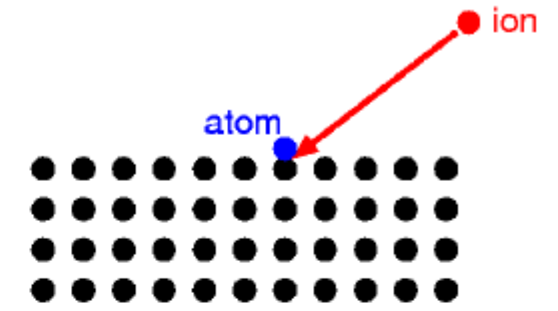
Plazma-fal kölcsönhatás elemi folyamatai



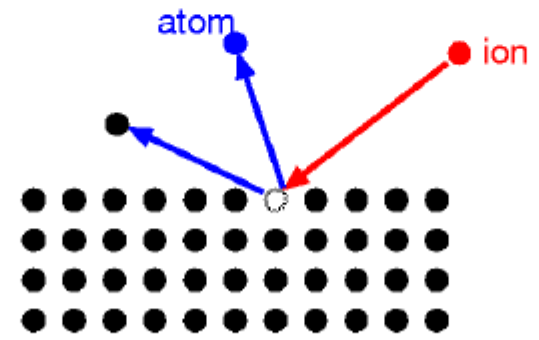
(a) Visszaverődés



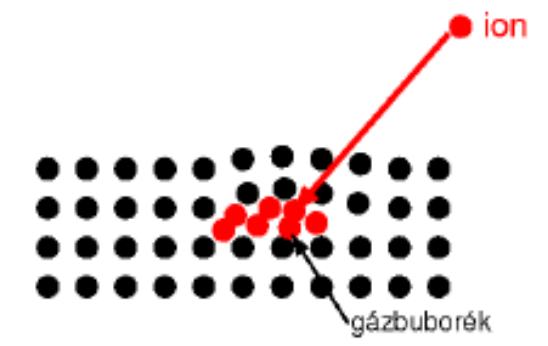
(b) Semlegesítődés



(c) Adhézió



(d) Porlasztás



(e) Pikkelyesedés

Plazma megmunkálás

Plazmamaró

Plazmatisztítás

Vákuumpárolóztatás

Plazmaporlasztás

Plazmavágás

**Ködfénykisülés, RF,
magnetron, etc.**

