



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

TMEC121

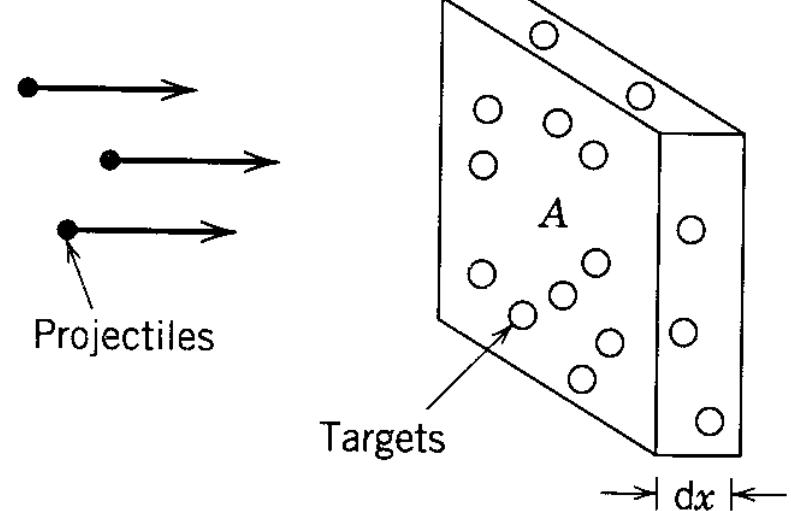
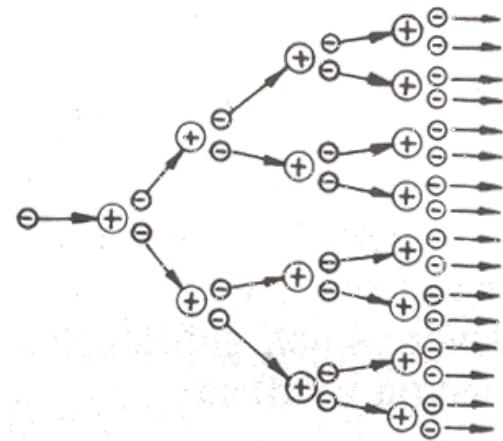
Introdução a Plasma para Tratamento de Materiais

Colisões

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Objetivo

Entender a importância dos processos colisionais nos Plasmas
-> sem colisões não existe plasma



Visão esquemática do que ocorre

Seção de choque

$$dn = -\sigma n n_g dx$$

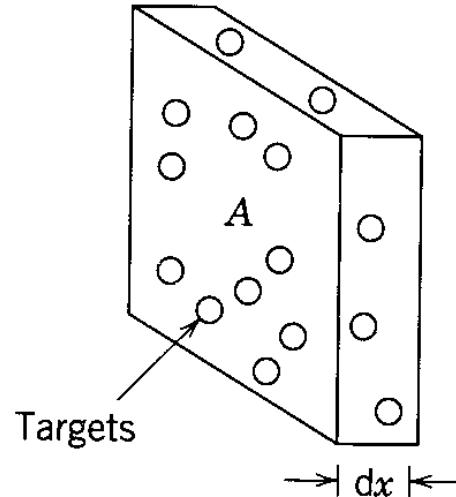
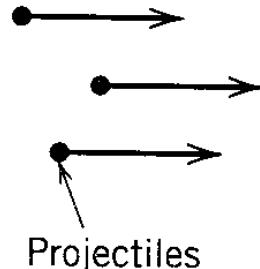
Partículas
que
interagem

For a simple interpretation of σ , let the incident and target particles be hard elastic spheres of radii a_1 and a_2 , and let the “interaction” be a collision between the spheres. In a distance dx there are $n_g dx$ targets within a unit area perpendicular to x . Draw a circle of radius $a_{12} = a_1 + a_2$ in the $x = \text{const}$ plane about each target. A collision occurs if the centers of the incident and target particles fall within this radius. Hence the fraction of the unit area for which a collision occurs is $n_g dx \pi a_{12}^2$. The fraction of incident particles that collide within dx is then

$$\frac{d\Gamma}{\Gamma} = \frac{dn}{n} = -n_g \sigma dx \quad (3.1.3)$$

where

$$\sigma = \pi a_{12}^2 \quad (3.1.4)$$

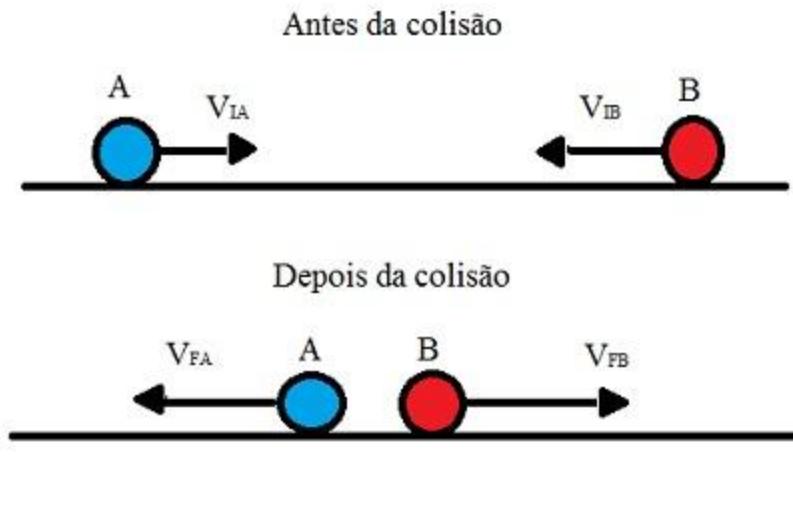


Fluxo incidente

$$\Gamma = nv$$

$$d\Gamma = -\sigma \Gamma n_g dx$$

Colisões elásticas



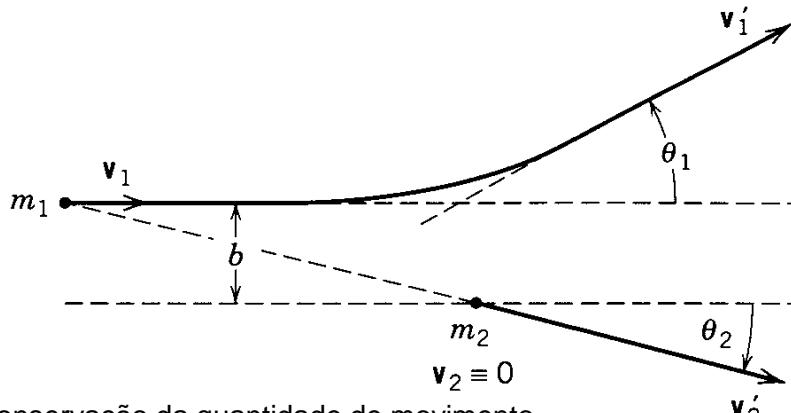
Conservação de:

- Energia
- Quantidade de movimento

Colisões elásticas ocorrem em um plasma?

Colisões elásticas podem levar a formação de um plasma?

Função transferência de energia



Conservação da quantidade de movimento

$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 \cos \theta_1 + m_2 v'_2 \cos \theta_2$$

$$0 = m_1 v'_1 \sin \theta_1 - m_2 v'_2 \sin \theta_2$$

Conservação da energia

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v'_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_2^2$$

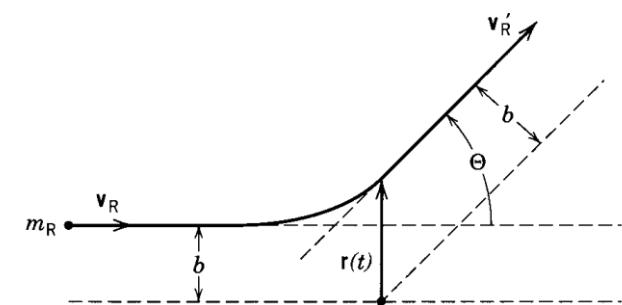
$$\frac{\frac{1}{2} m_2 v'_2^2}{\frac{1}{2} m_1 v_1^2} \Rightarrow \zeta_L = \frac{4 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \theta_2$$

$$\zeta_L = \frac{2 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 - \cos \Theta)$$

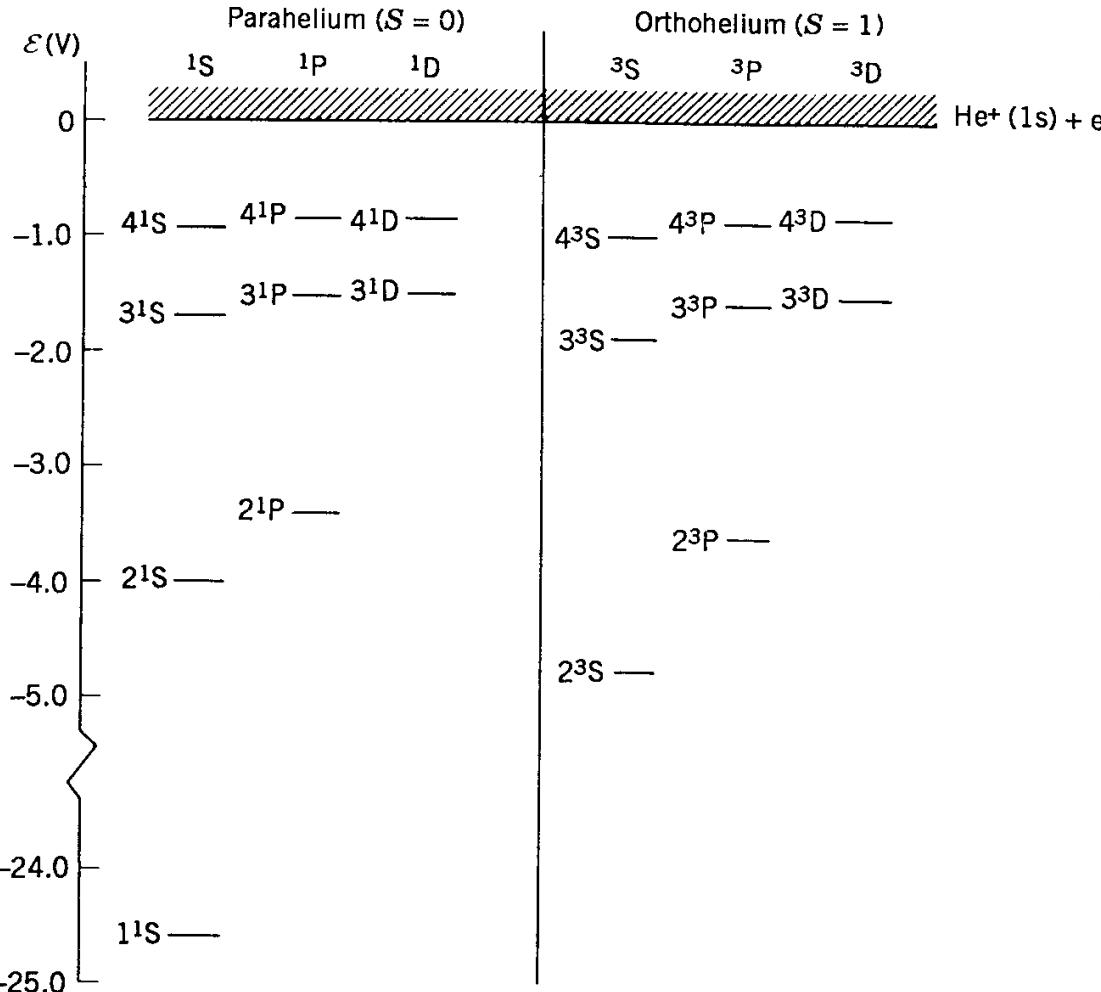
$m_1 = m_2 \rightarrow$ max. transfer.

$m_1 \ll m_2 \rightarrow$ pouca transfer.

For hard-sphere scattering of electrons against atoms, we have $m_1 = m$ (electron mass) and $m_2 = M$ (atom mass), and $\sigma_{sc} = \sigma_m$ by (3.1.9), such that $\langle \zeta_L \rangle_\Theta = 2m/M \sim 10^{-4}$. Hence electrons transfer little energy due to elastic collisions with heavy particles, allowing $T_e \gg T_i$ in a typical discharge. On the other hand, for $m_1 = m_2$, we obtain $\langle \zeta_L \rangle_\Theta = \frac{1}{2}$, leading to strong elastic energy exchange among heavy particles and hence to a common temperature.



Colisões inelásticas



Colisões inelásticas ocorrem em um plasma?

Colisões inelásticas podem levar a formação de um plasma?

Quando é possível ocorrer uma colisão inelástica?

Conservação da energia

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_1v'_1{}^2 + \frac{1}{2}m_2v'_2{}^2$$

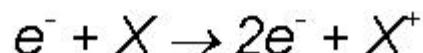
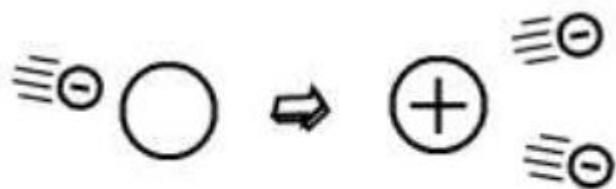
+ parte inelástica
(ΔU , ex dif. entre níveis)

Mais eficiente $m_1 \ll m_2$

FIGURE 3.12. The energy levels of the helium atom, showing the division into singlet and triplet states and the metastable levels 2^1S and 2^3S (after Bransden and Joachain, 1983).

Colisões inelásticas

Ionização (responsável pela formação do plasma)



Porque o elétrons não se recombina rapidamente?

Recombinação



Conservation of momentum:

$$mv = (m + M)u$$

Conservation of energy:

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (m + M) u^2 - U_i$$

Therefore, eliminating v,

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{m+M}{m} \right)^2 u^2 = \frac{1}{2} (m + M) u^2 - U_i$$

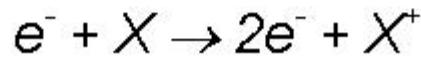
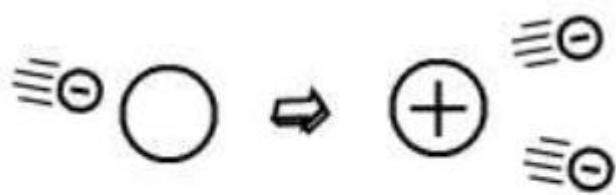
which yields

$$u^2 = - \frac{2U_i m}{(m + M)M}$$

Resulta em velocidade imaginária, logo trata-se de um processo impossível

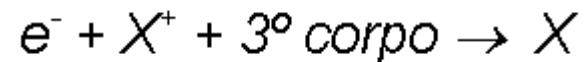
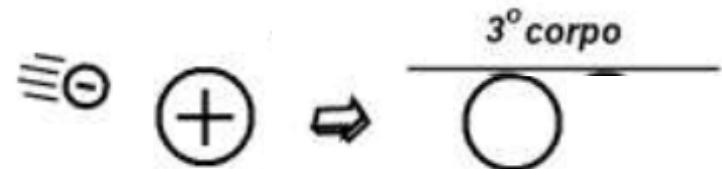
Colisões inelásticas

Ionização



Porque o elétrons não se recombina rapidamente?

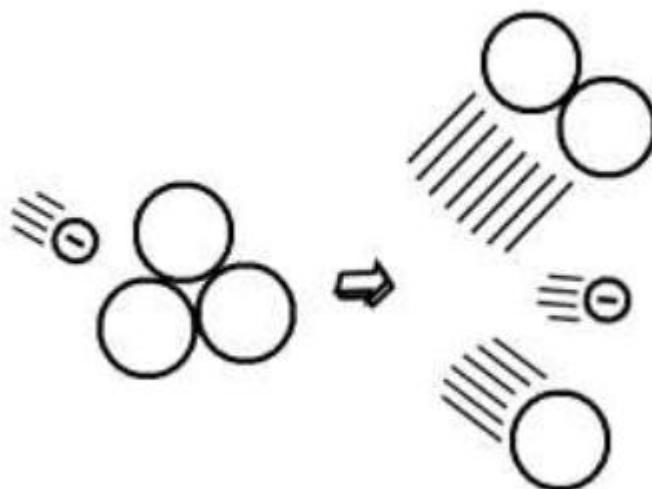
Recombinação a 3 corpos



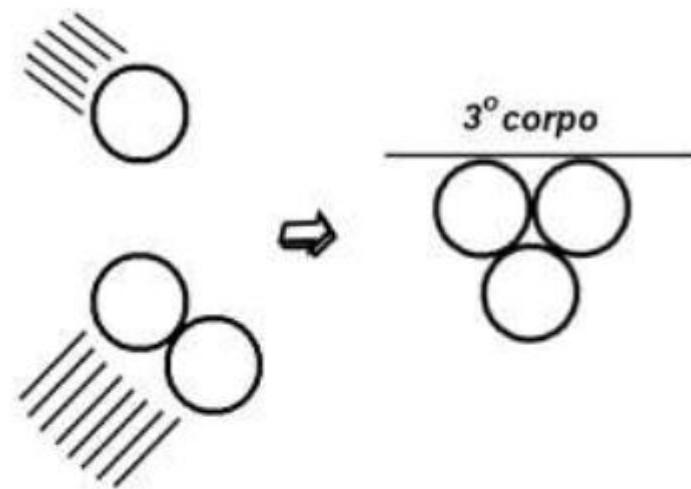
Terceiro corpo pode ser a **parede ou qualquer espécies do plasma**, inclusive um elétron

Colisões inelásticas

Dissociação

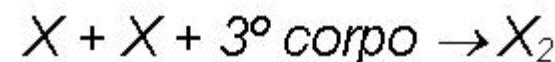


Recombinação a 3 corpos



Porque os átomos/radicais não se recombina rapidamente?

Novamente e a reação a dois corpos é desfavorável energeticamente

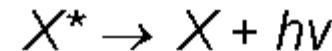


Colisões inelásticas

Excitação



Relaxação



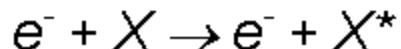
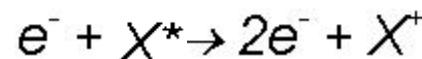
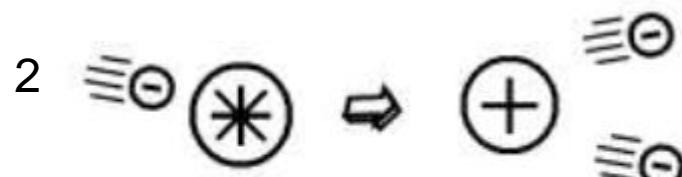
Tempo de vida de espécie emissivas da ordem de nanosegundos (pouca chance de interagir e de atingir elevadas concentrações)

Se a emissão de fótons não for possível (níveis proibidos) o tempo de vida de espécie excitada será maior (espécie metaestável – tempo de vida pode atingir 1 segundo) -> necessidade do terceiro corpo para retornar ao estado fundamental (maior chance de interagir e de atingir elevadas concentrações)

Colisões inelásticas

Ionização em dois estágios

1

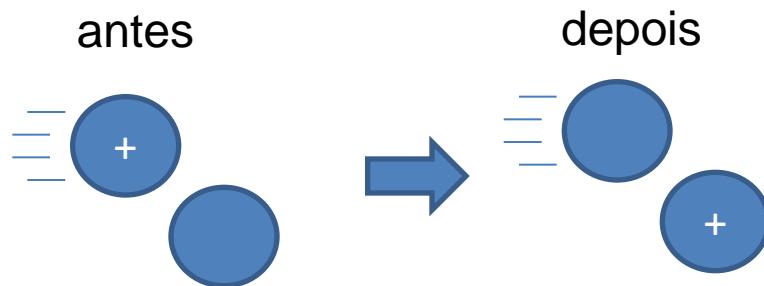


Normalmente importante em pressões maiores e para espécies de maior energia de ionização

Maior probabilidade para espécies excitadas metaestáveis

Colisões

Troca de carga (simétrica – íon e espécie neutra do mesmo átomo)



Trocas de carga assimétricas podem ocorrer, mas são muito mais improváveis (problema de conservação de energia novamente)

Ex.: Em plasma Ar+H₂ forma-se ArH⁺, que ao colidir com o cátodo tem maior energia que o Ar⁺, ArH⁺ não faz troca de carga simétrica.

Seção de choque de diferentes processos

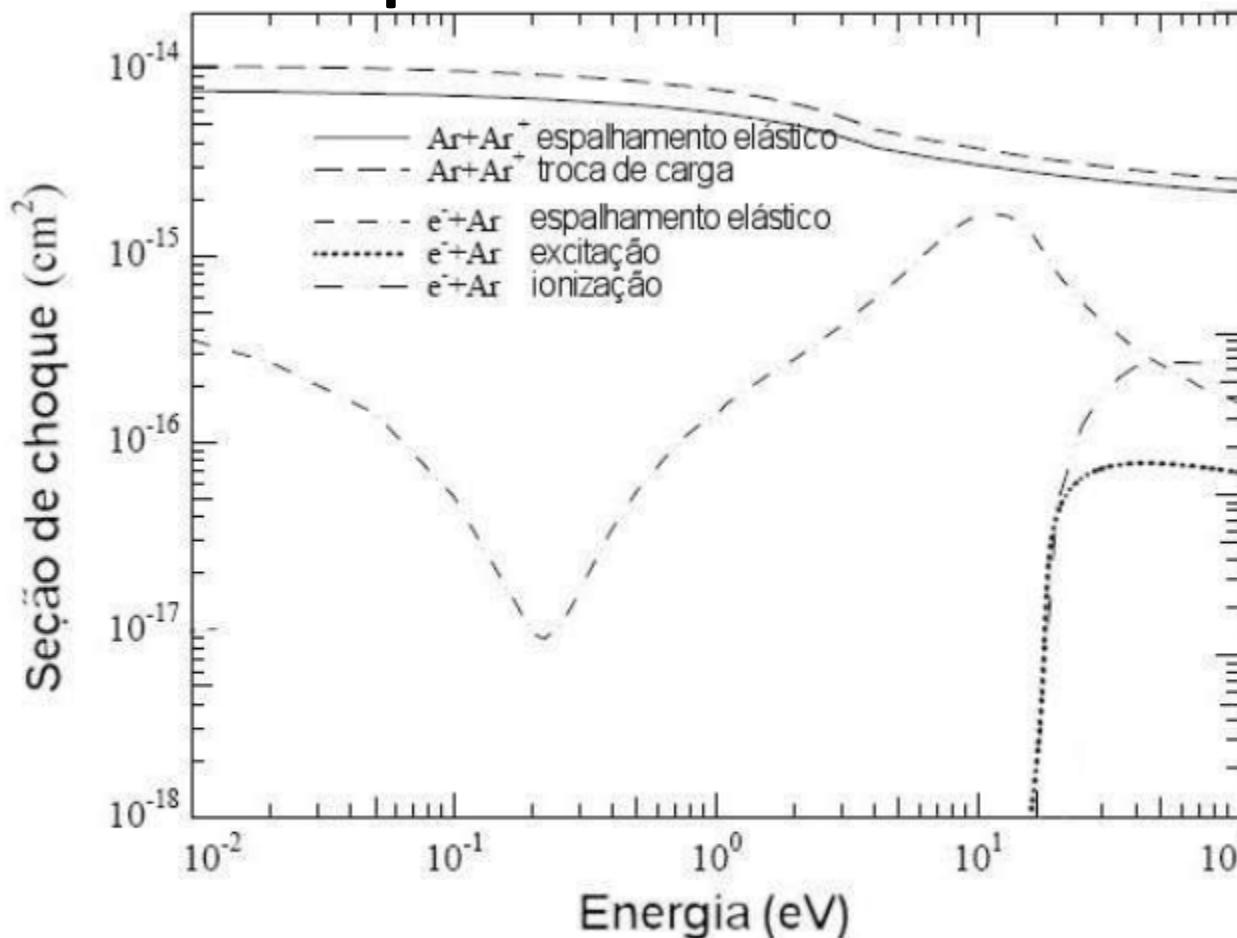


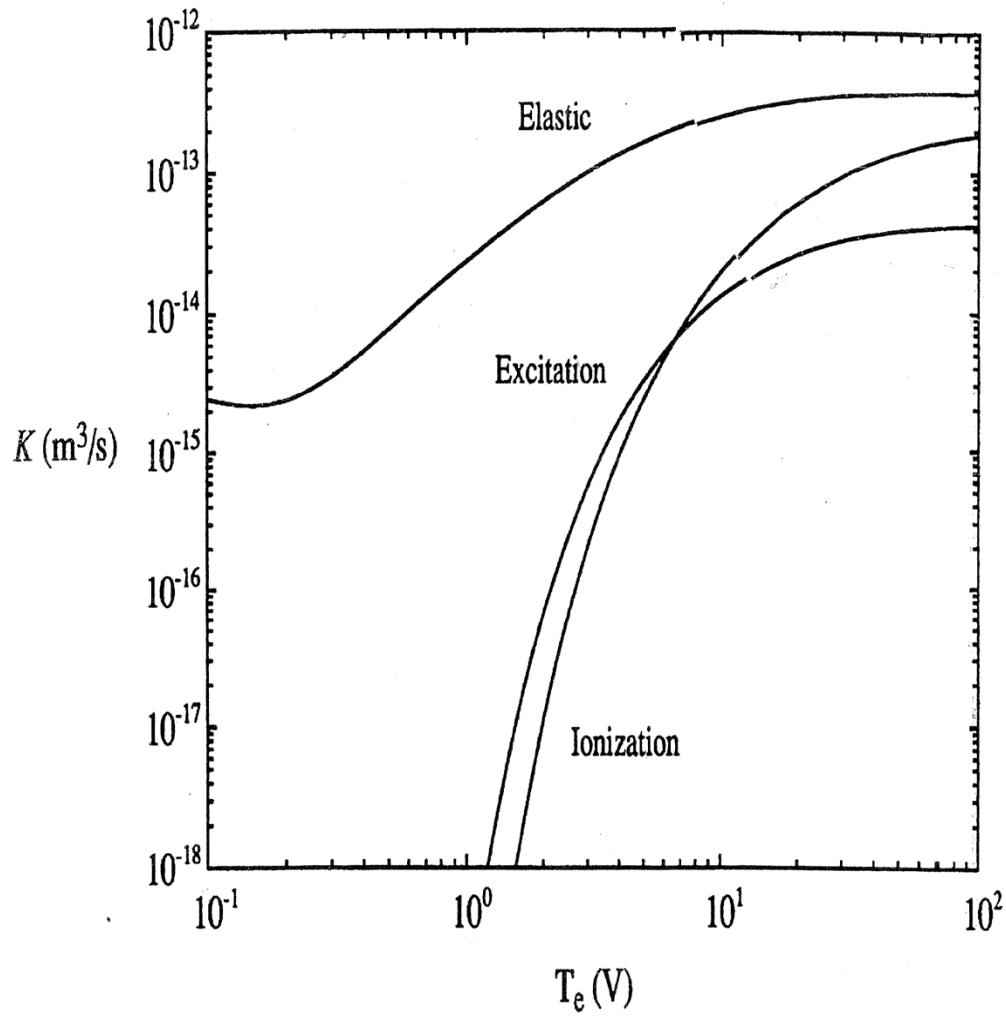
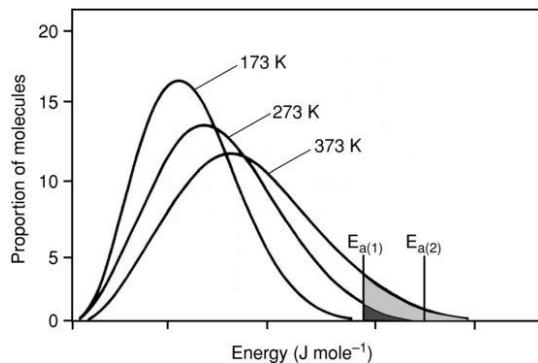
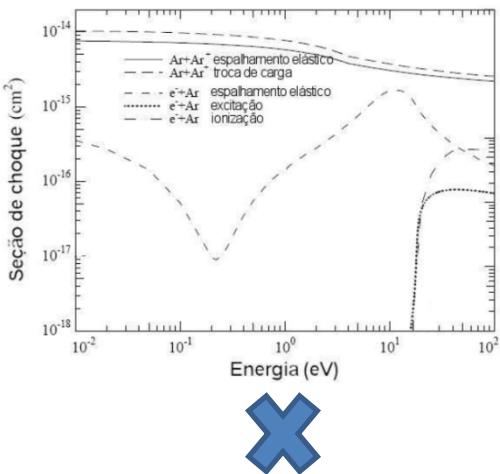
Figura 2 – Seção de choque de algumas partículas e seus efeitos num plasma DC de argônio.

Seção de choque x taxa de reação

ELECTRON-ARGON RATE COEFFICIENTS

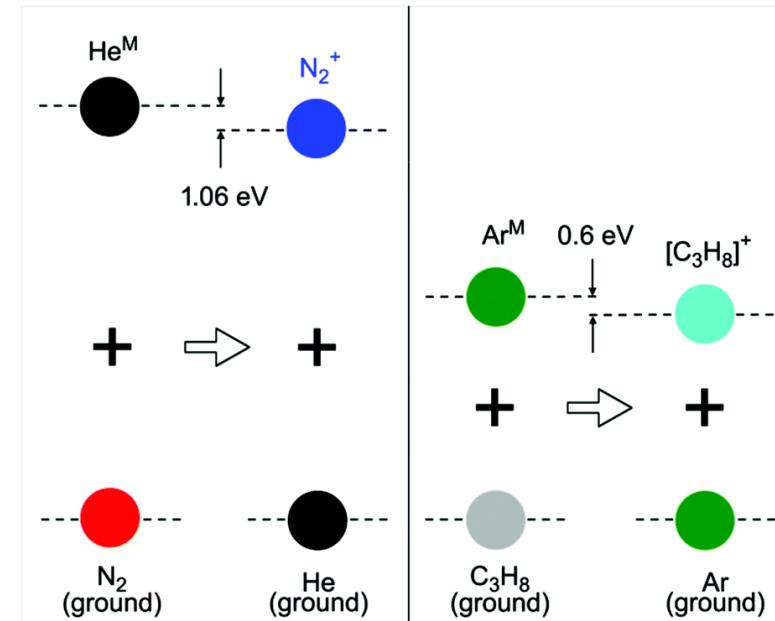
- Rate coefficient $K(T_e)$ is average of cross section σ [m^2] for process, over Maxwellian distribution

$$K(T_e) = \langle \sigma v \rangle_{\text{Maxwellian}}$$



Colisões – outros processos

- Colisões envolvendo íons (ionização, excitação) -> menos provável (função transferência de energia)
- Ionização e/ou excitação por espécies excitadas de maior energia (normalmente metaestáveis)



Níveis acessíveis x colisões

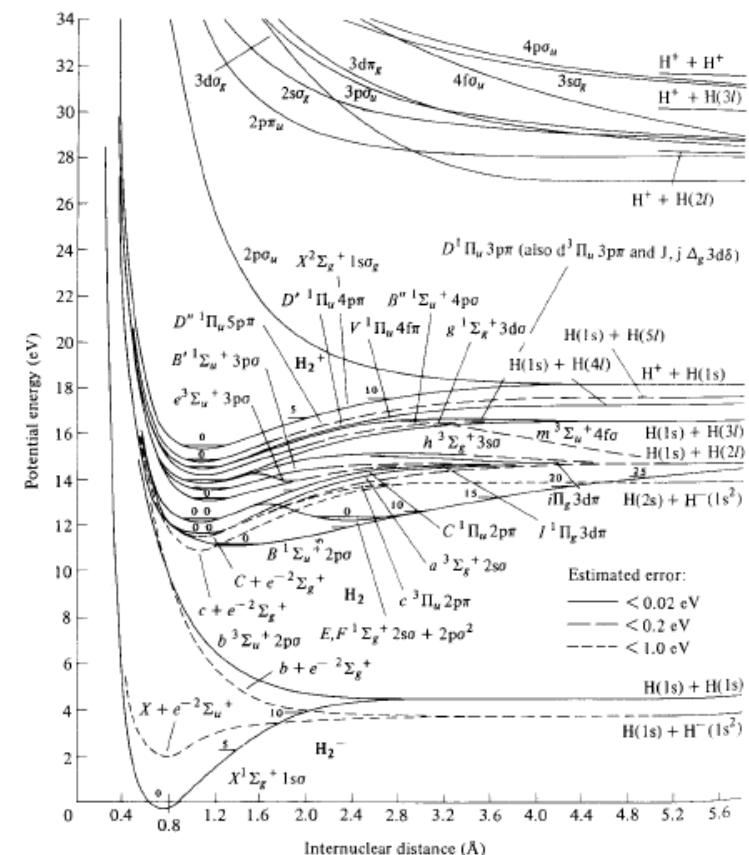
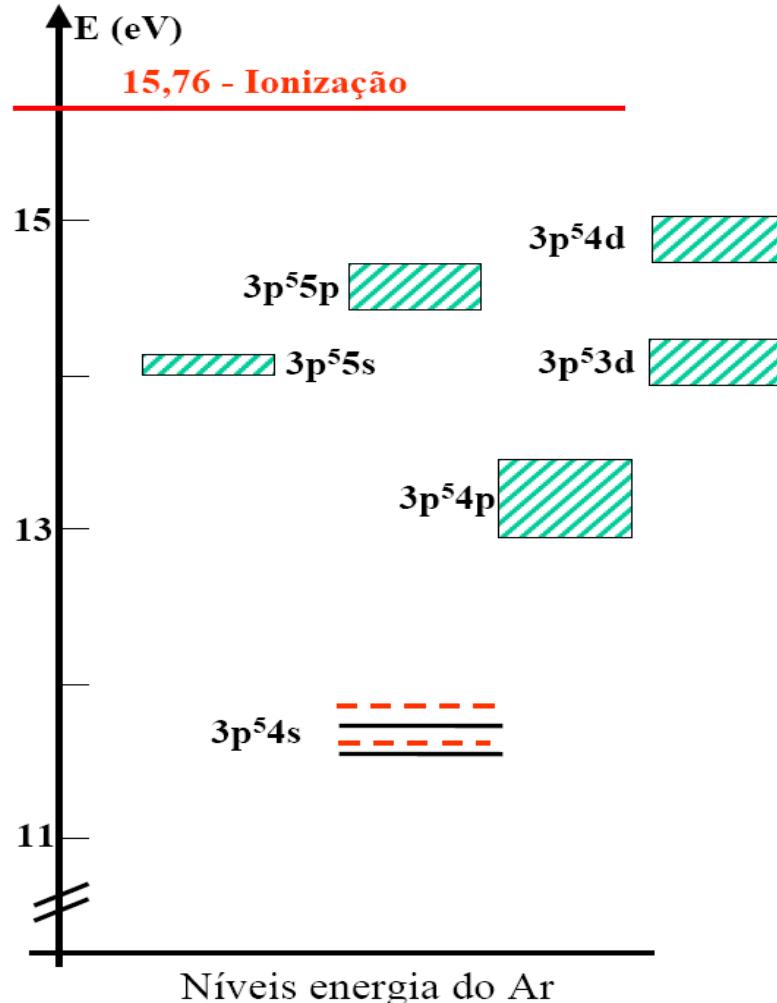
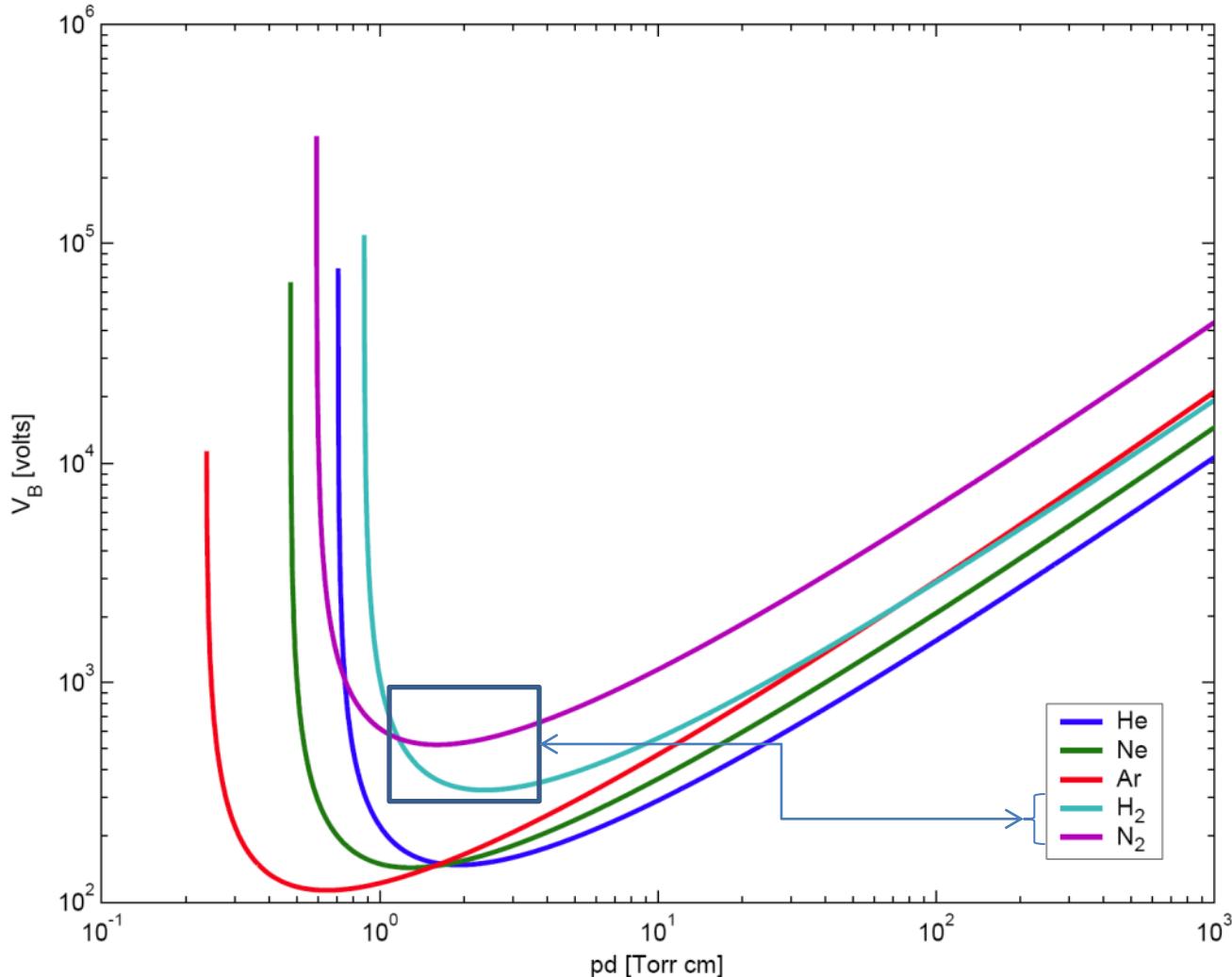


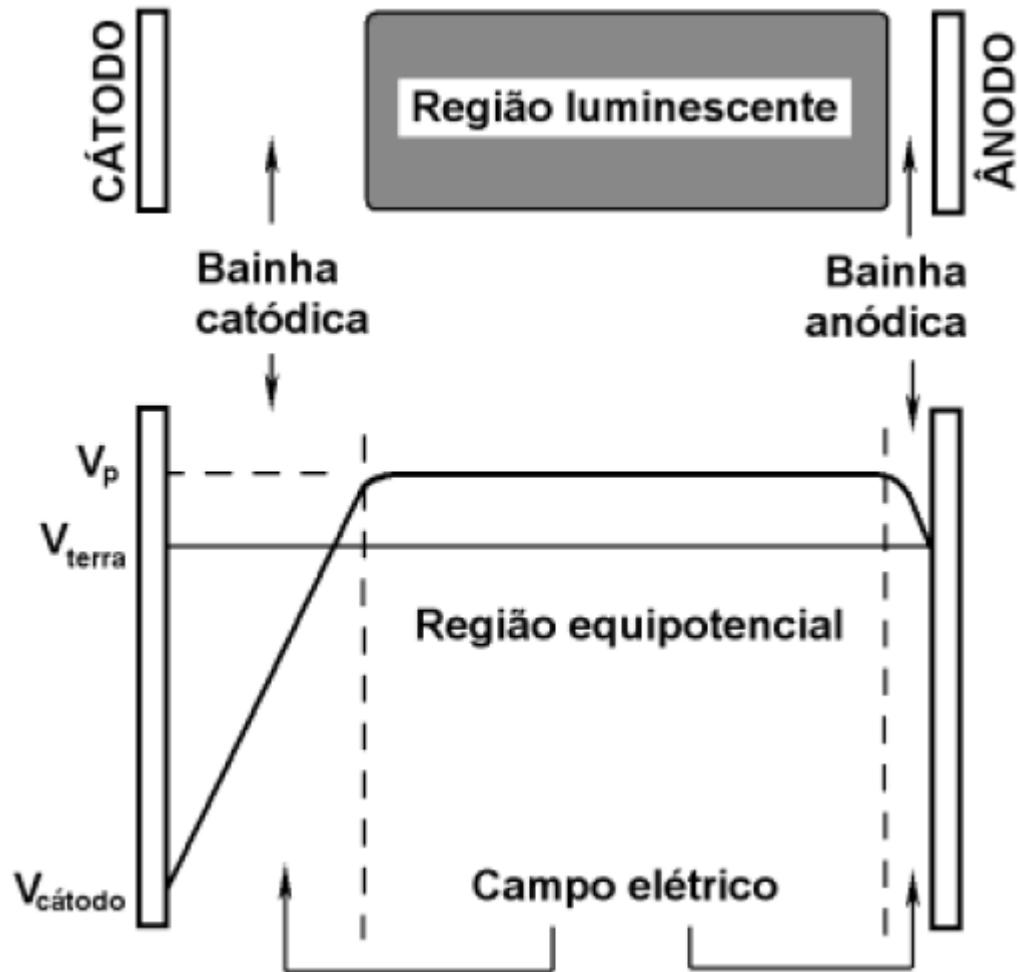
FIGURE 8.3. Potential energy curves for H_2^- , H_2 , and H_2^+ . (From Jeffery I. Steinfeld, *Molecules and Radiation: An Introduction to Modern Molecular Spectroscopy*, 2d ed. © MIT Press, 1985.)

Gás molecular “consome” mais energia dos elétrons sem ionizar

Uma das consequências



Onde ocorrem estas colisões em uma descarga DC



Cronograma

Aula	Data	Atividade
1	01/08/2018	Regras/Introdução
2	08/08/2018	Aspectos gerais
3	15/08/2018	Visita ao LTPP
4	22/08/2018	Noções de vácuo para plasma a baixa pressão
5	29/08/2018	Semana acadêmica de Eng. Mec.
6	05/09/2018	Plasmas quentes e plasmas frios (noções de equilíbrio e distribuição de energia das espécies)
7	12/09/2018	Descargas elétricas
8	19/09/2018	Prova 01
9	26/09/2018	Colisões no plasma
10	03/10/2018	Semana integrada (SIEPE)
11	10/10/2018	Descarga DC
12	17/10/2018	Reações no plasma
13	24/10/2018	Interação plasma superfícies
14	31/10/2018	Exemplos de tratamentos de materiais por plasma (não houve aula – grave caminhoneiros)
15	07/11/2018	Exemplos de tratamentos de materiais por plasma
16	14/11/2018	Exemplos de tratamentos de materiais por plasma
17	21/11/2018	Visita – SDS Plasma (17:30) (http://www.sdsplasma.com.br/)
18	28/11/2018	Prova 02
19	05/12/2018	Semana de estudos
20	12/12/2018	Final

**Dia 03/10 não haverá
aula**

É importante lembra

- Importância as colisões para o plasma (elásticas e inelásticas)
- Noção de seção de choque
- Função de transferências de energia
- Conhecer as principais colisões inelásticas e sua importância (consequência)
- Entender onde ocorre com maior frequência na descarga DC