

# TMEC121

## Introdução a Plasma para Tratamento de Materiais

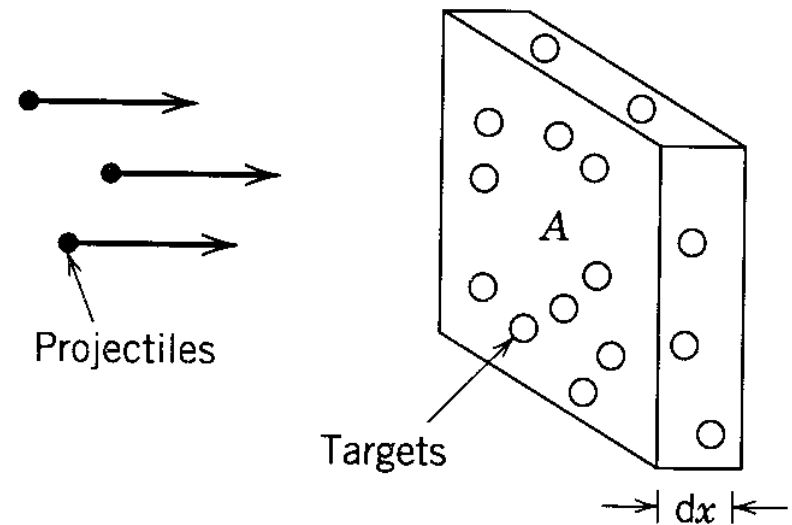
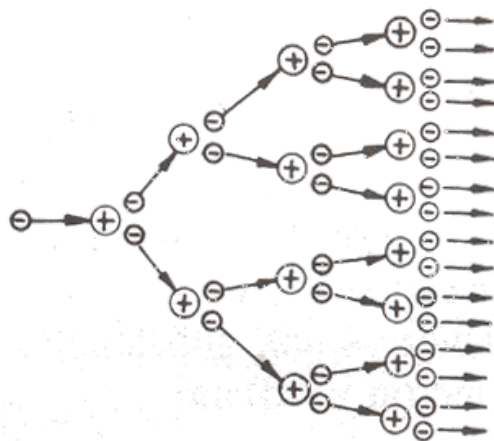
### Colisões

*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

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

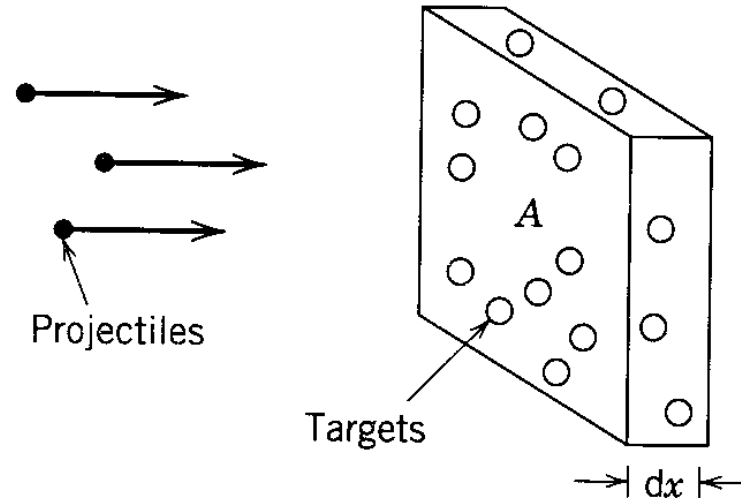
Partículas  
que  
interagem

For a simple interpretation of  $\sigma$ , 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

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

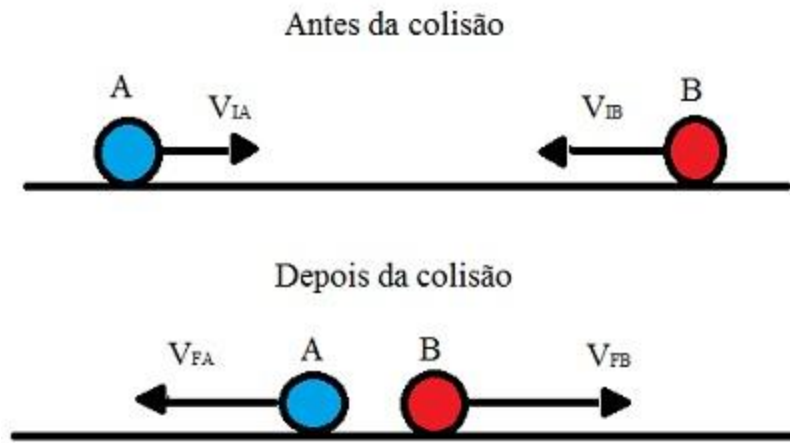


Fluxo incidente

$$\Gamma = nv$$

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

# Colisões elásticas



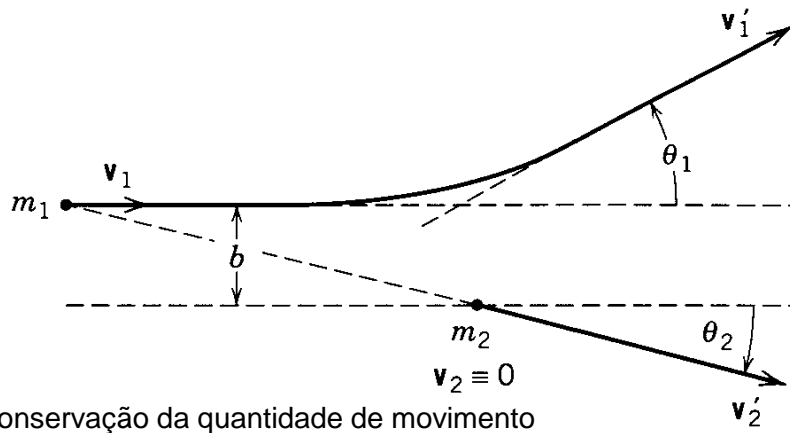
Conservação de:

- 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

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

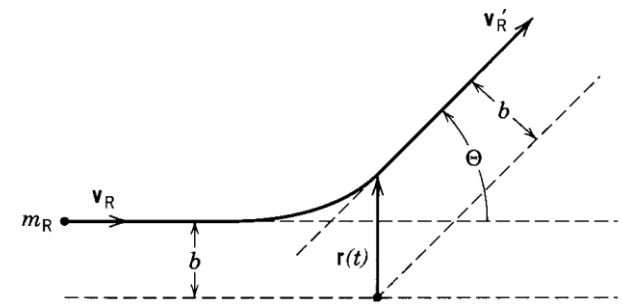
$$\frac{\frac{1}{2} m_2 v'^2_2}{\frac{1}{2} m_1 v_1^2} \Rightarrow$$

$$\zeta_L = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \theta_2$$

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

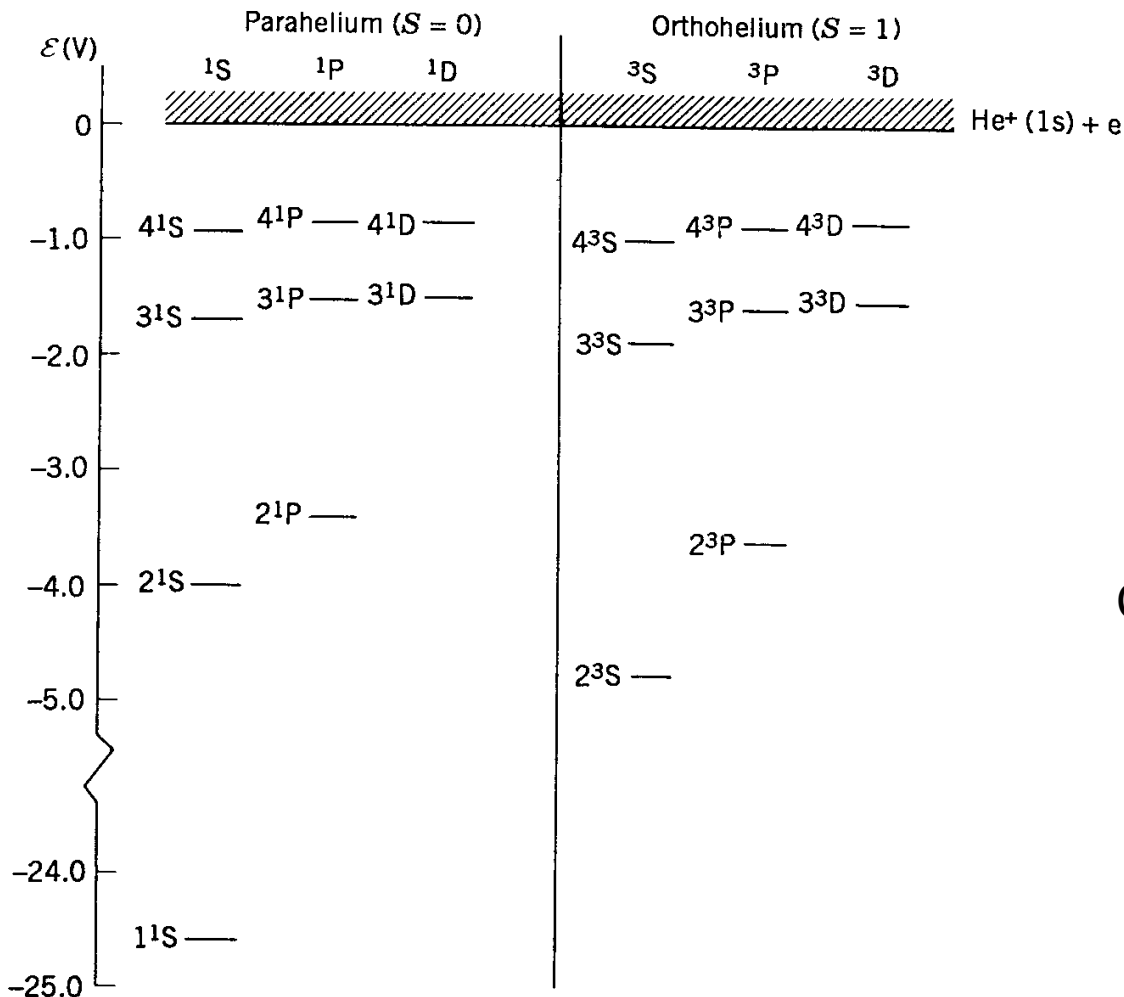
$m_1 = m_2 \rightarrow$  max. transfer.

$m_1 \ll m_2 \rightarrow$  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

$$\frac{1}{2}m_1 v_1^2 = \frac{1}{2}m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2'^2 + \text{parte inelástica}$$

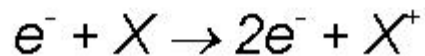
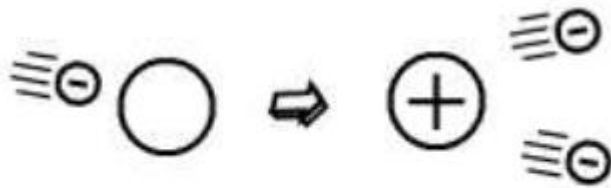
( $\Delta U$ , ex dif. entre níveis)

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  $v$ ,

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

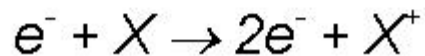
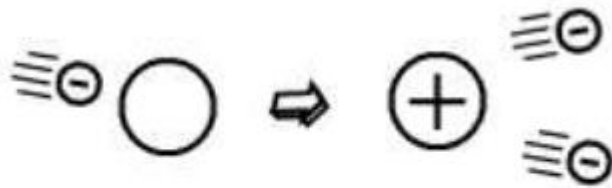
which yields

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

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

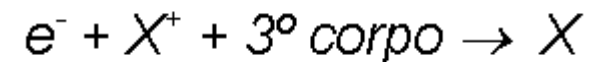
# Colisões inelásticas

Ionização



Porque o elétrons não se recombina rapidamente?

Recombinação a 3 corpos

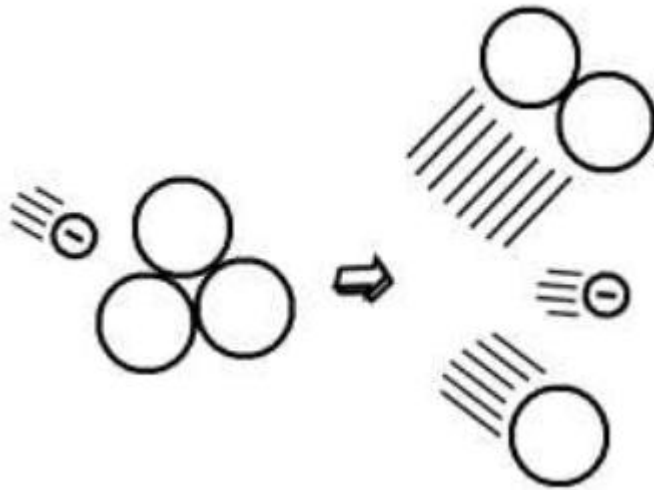


Terceiro corpo pode ser a **parede ou qualquer espécies do plasma**, inclusive um elétron

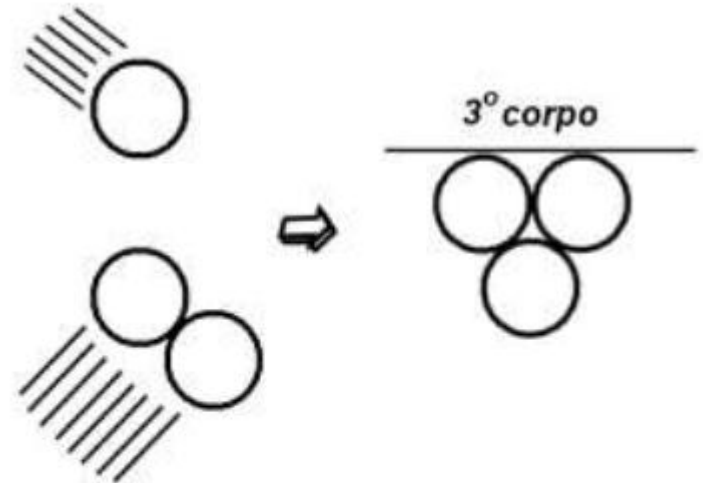


# Colisões inelásticas

## Dissociação

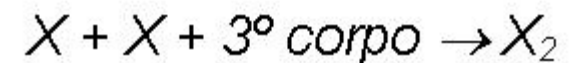


## Recombinação a 3 corpos



Porque os átomos/radicais não se recombina rapidamente?

Novamente a reação a dois corpos é desfavorável energeticamente



# Colisões inelásticas

Excitação



Relaxação



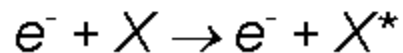
Tempo de vida de espécie emissivas da ordem de nanosegundos (pouca chance de interagir e de atingir elevadas concentrações)

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)

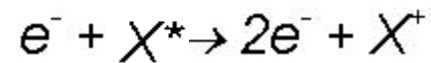
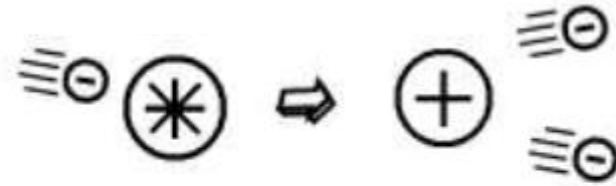
# Colisões inelásticas

Ionização em dois estágios

1



2

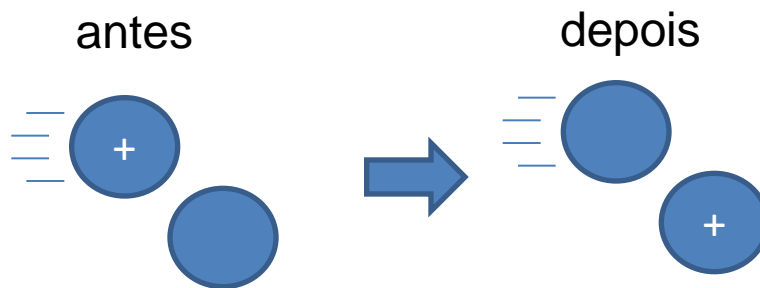


Normalmente importante em pressões maiores e para espécies de maior energia de ionização

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  $\text{Ar} + \text{H}_2$  forma-se  $\text{ArH}^+$ , que ao colidir com o cátodo tem maior energia que o  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{ArH}^+$  não faz troca de carga simétrica.

# Seção de choque de diferentes processos

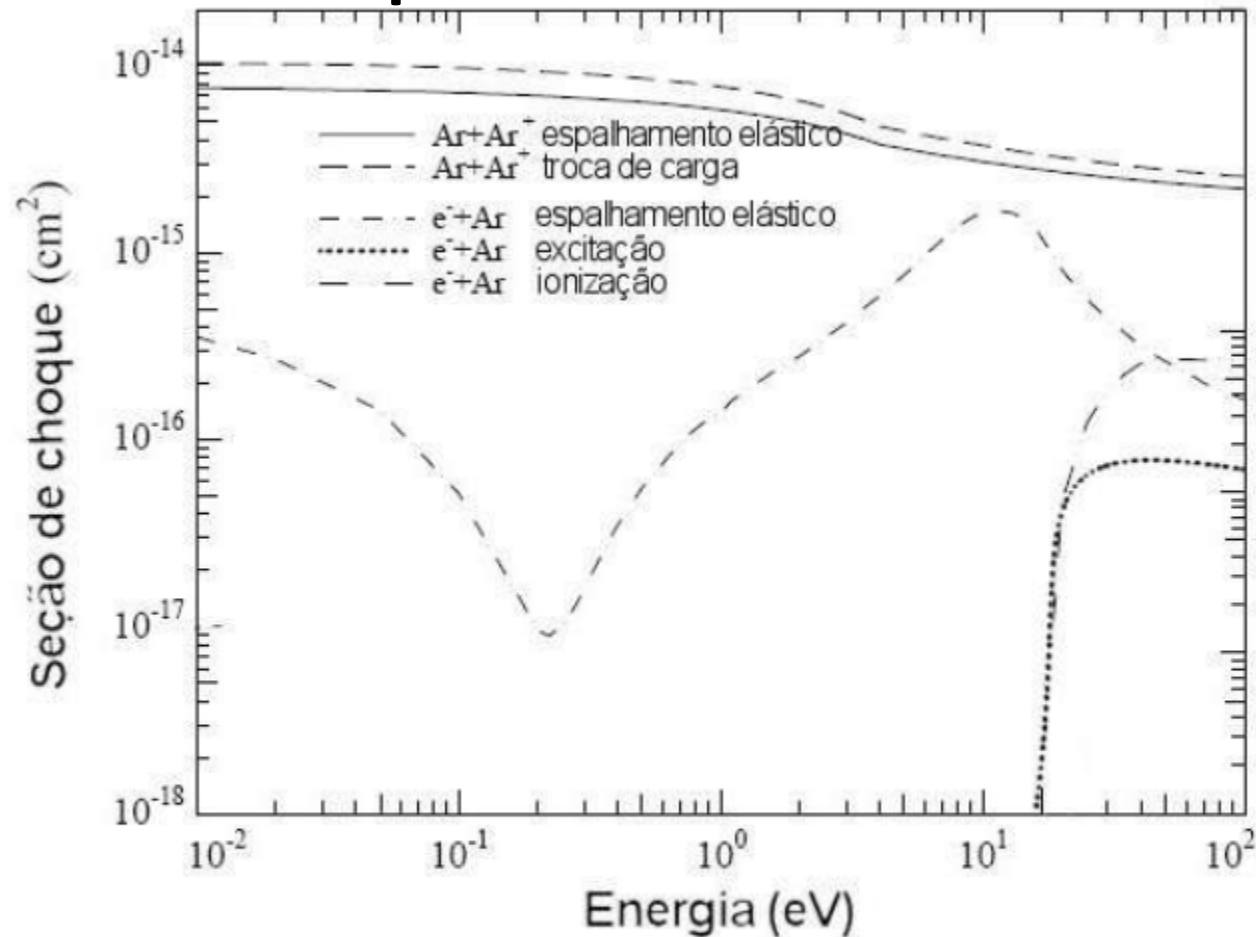


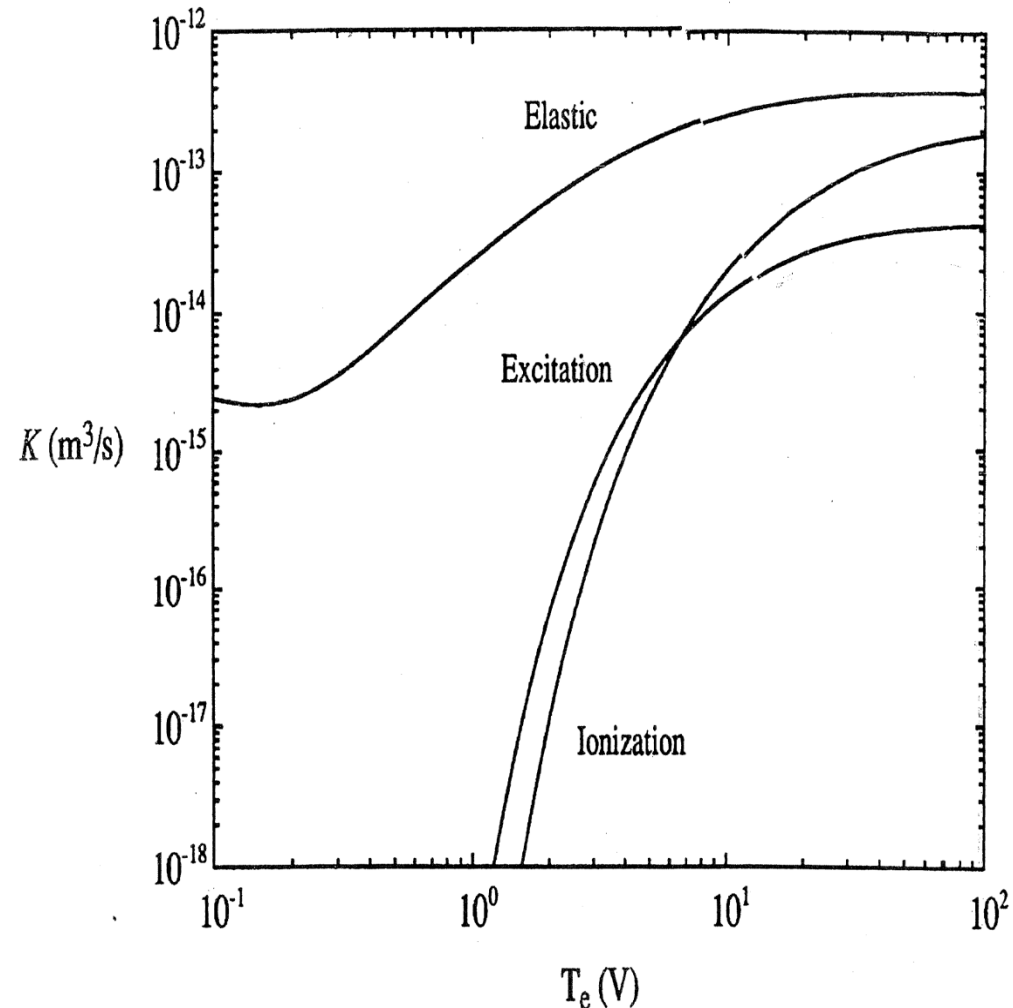
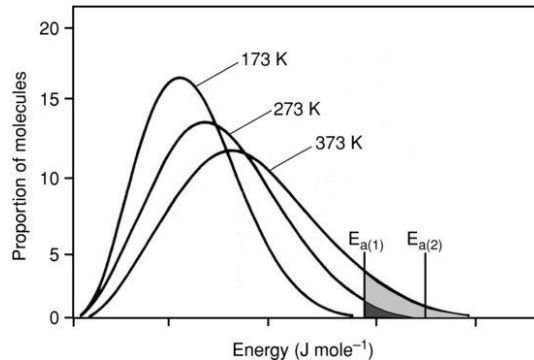
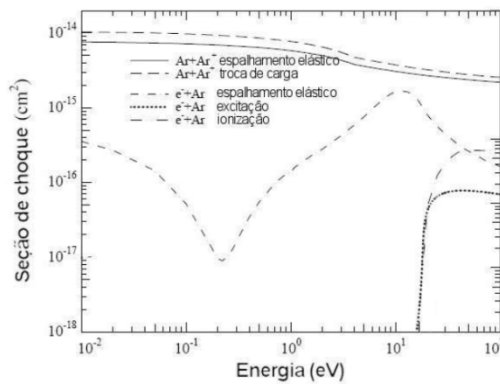
Figura 2 – Seção de choque de algumas partículas e seus efeitos num plasma DC de argônio.

# Seção de choque x taxa de reação

## ELECTRON-ARGON RATE COEFFICIENTS

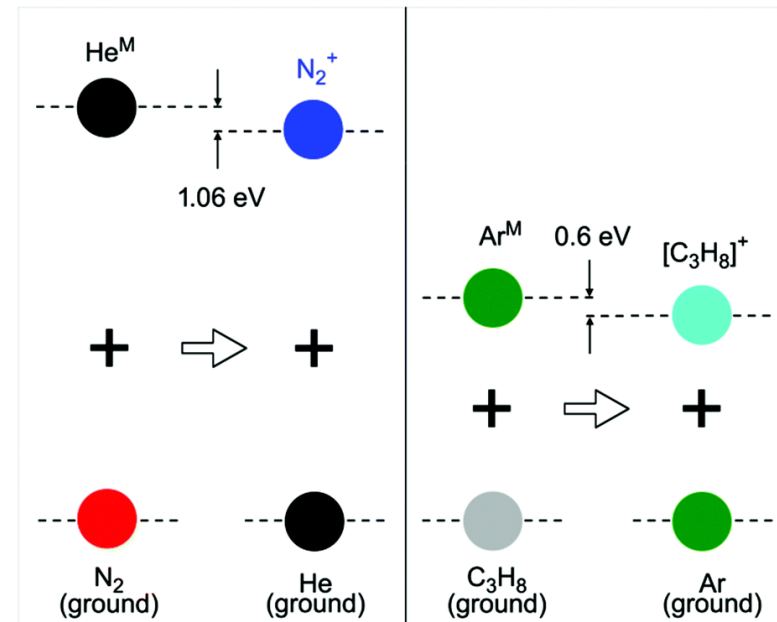
- Rate coefficient  $K(T_e)$  is average of cross section  $\sigma$  [m<sup>2</sup>] for process, over Maxwellian distribution

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



# 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

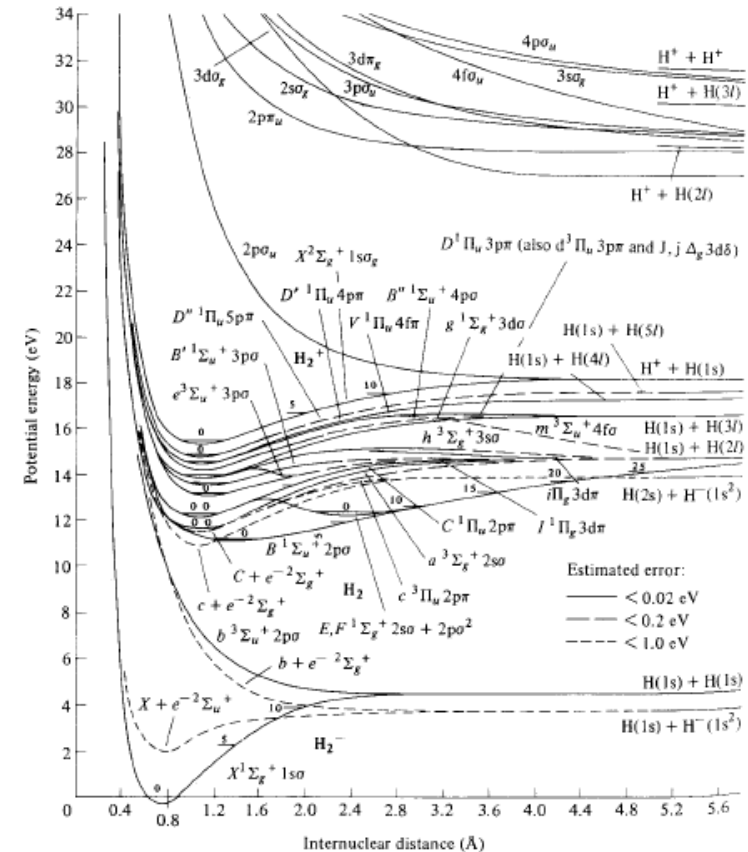
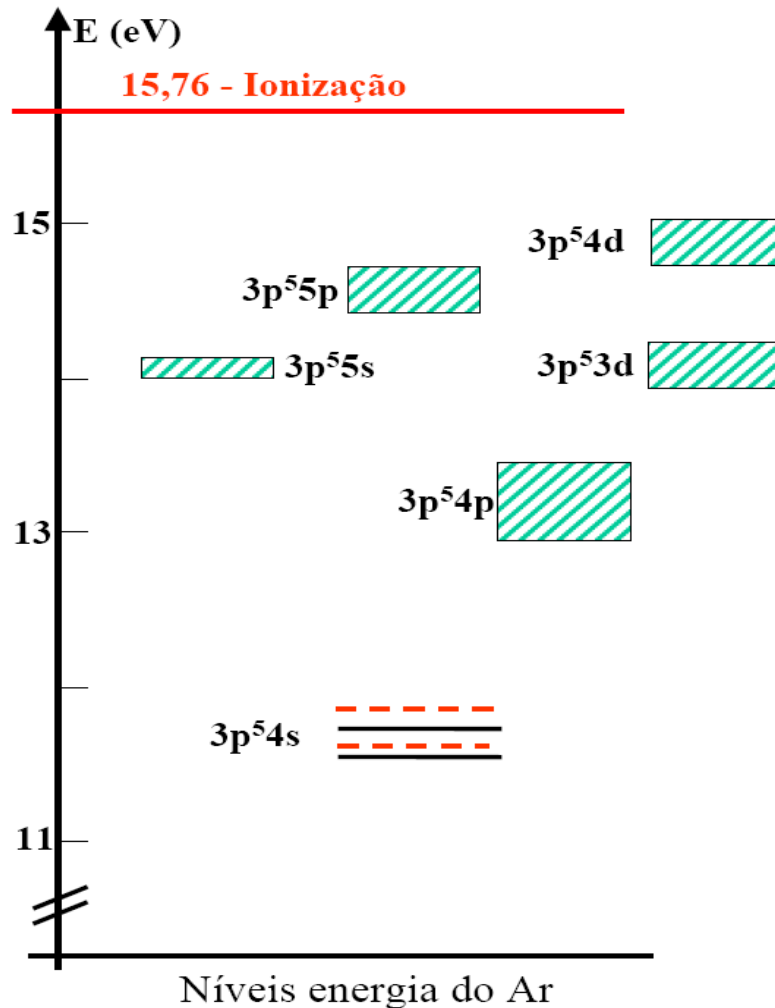
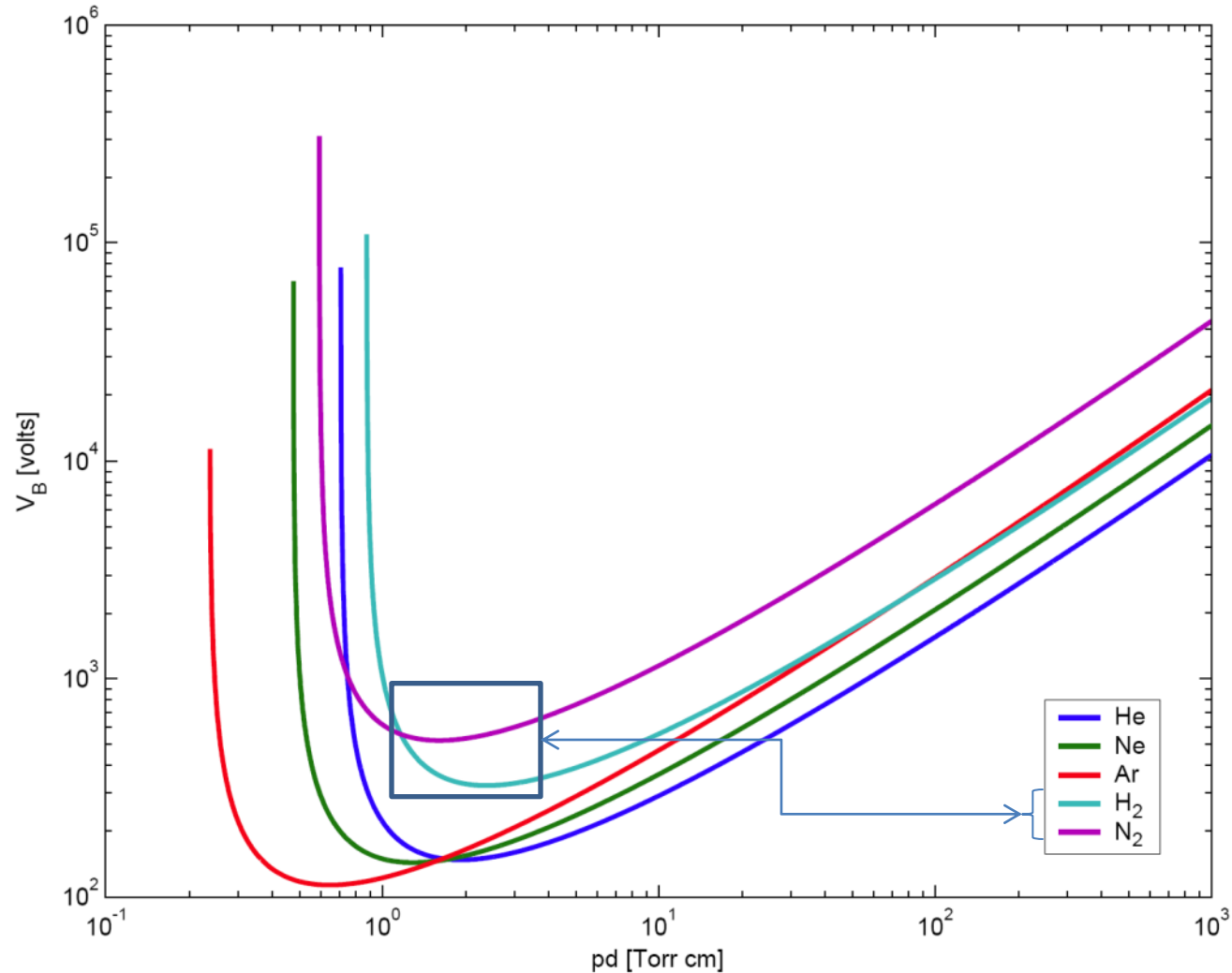


FIGURE 8.3. Potential energy curves for  $H_2^+$ ,  $H_2$ , and  $H_2^-$ . (From Jeffery I. Steinfeld, *Molecules and Radiation: An Introduction to Modern Molecular Spectroscopy*, 2d ed. © MIT Press, 1985.)

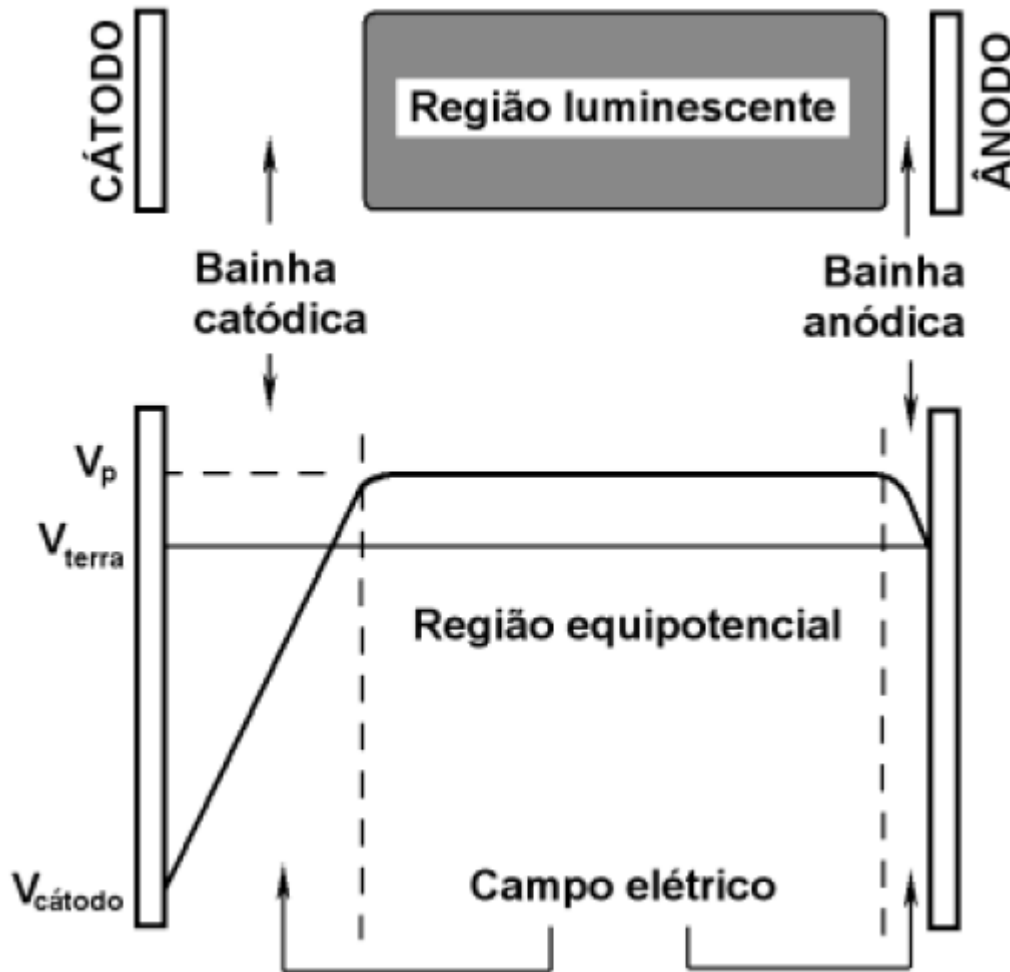
Gás molecular “consome” mais energia dos elétrons sem ionizar



# 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	<b>Semana acadêmica de Eng. Mec.</b>
6	05/09/2018	Plasmas quentes e plasmas frios (noções de equilíbrio e distribuição de energia das espécies)
7	12/09/2018	Descargas elétricas
<b>8</b>	<b>19/09/2018</b>	<b>Prova 01</b>
9	26/09/2018	Colisões no plasma
10	03/10/2018	<b>Semana integrada (SIEPE)</b>
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	<b>Visita – SDS Plasma (17:30)</b> ( <a href="http://www.sdsplasma.com.br/">http://www.sdsplasma.com.br/</a> )
<b>18</b>	<b>28/11/2018</b>	<b>Prova 02</b>
19	05/12/2018	Semana de estudos
<b>20</b>	<b>12/12/2018</b>	<b>Final</b>

**Dia 03/10 não haverá aula**

# É importante lembrar

- 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