

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES ELÁSTICAS E INELÁSTICAS

Colisões podem ser classificadas como *elásticas* e *inelásticas*.

Partículas tem, em geral, dois tipos de energia:

- *energia cinética* devida ao seu movimento de translação;
- *energia interna*, ou potencial, que pode ser na forma vibracional ou rotacional de moléculas com mais de um átomo, energias de ligação elétron-núcleo, etc.

Nas colisões elásticas, apenas energia cinética entre as partículas é trocada. Nas inelásticas, a energia interna muda.

Importantes relações envolvendo energia cinética e mudança de energia potencial, ΔU , num processo de colisão entre duas partículas (ver figura), são desenvolvidas a seguir.

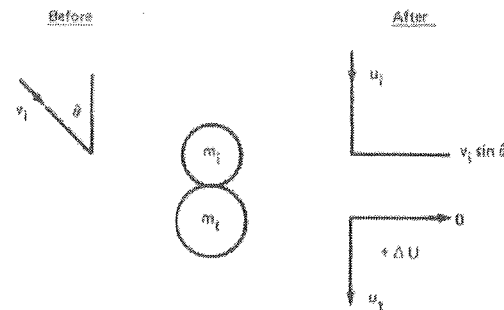


Figure 2-2. Kinetics of an inelastic collision

Momentum conservation

$$m_i v_i \cos \theta = m_i u_i + m_t u_t$$

Energy conservation

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i (u_i^2 + v_i^2 \sin^2 \theta) + \frac{1}{2} m_t u_t^2 + \Delta U \quad (1)$$

Eliminating u_i as before gives

$$m_i v_i^2 = \frac{m_t}{m_i} (m_i v_i \cos \theta - m_t u_t)^2 + m_t u_t^2 + 2\Delta U \quad (2)$$

which simplifies to

$$2m_t u_t v_i \cos \theta = \frac{m_t}{m_i} (m_t + m_i) u_t^2 + 2\Delta U \quad (3)$$

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES ELÁSTICAS

Se considerarmos a colisão elétron-átomo, a transferência de energia é muito pequena, tendo em vista a *função transferência de energia*.

A Fig. 2-4 mostra resultados experimentais da seção de choque em função da energia para a colisão de um elétron com um átomo de argônio.

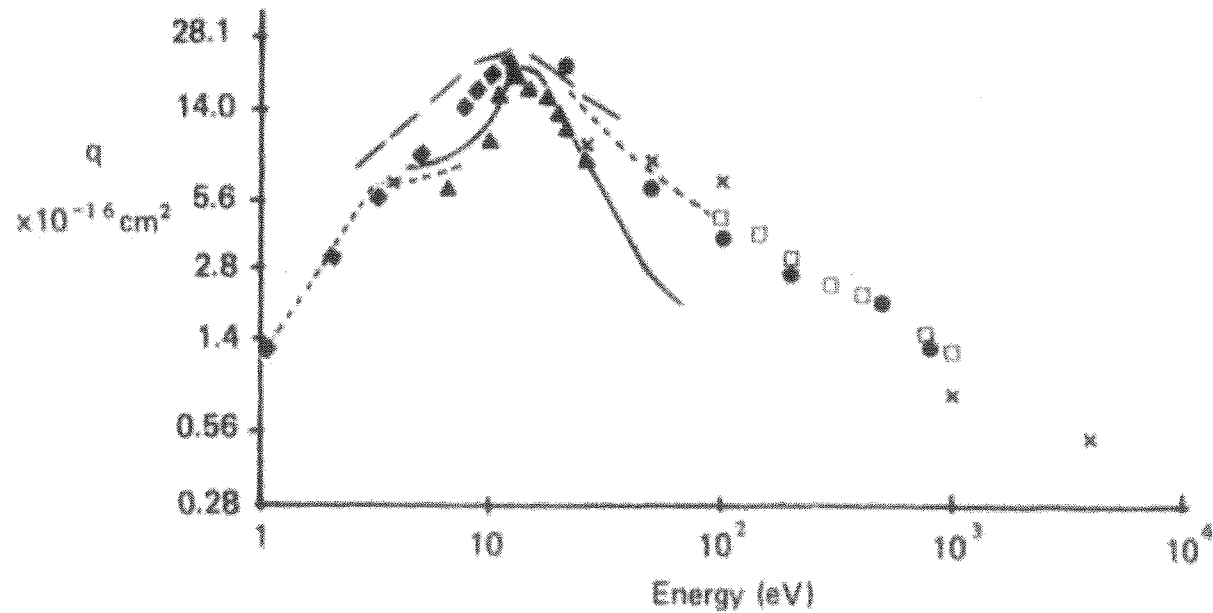


Figure 2-4. Cross-section for elastic scattering of electrons in argon. From DuBois and Rudd 1975; includes data from various authors

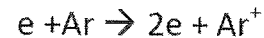
COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Ionização

Nas colisões inelásticas, além de variações tanto das energias cinéticas como das energias internas de uma ou das duas partículas estão envolvidas.

A colisão mais importante para manter uma descarga luminescente é a colisão de ionização por *impacto de elétrons* exemplificada pela reação



Um parâmetro fundamental nos efeitos de colisão em descargas luminescentes é a seção de choque do processo. Para Xe, por exemplo, as duas figuras abaixo mostram a dependência da seção de choque de ionização na energia cinética do elétron incidente. Nota-se na figura da esquerda que existe um limiar de energia que é o *potencial de ionização* do átomo.

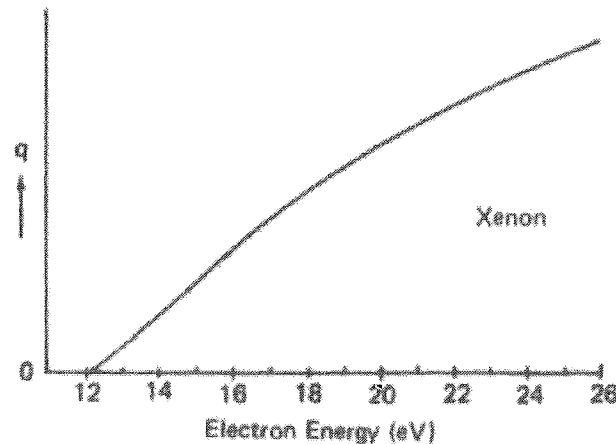


Figure 2-6. Ionization cross-section for xenon near threshold (Rapp and Englander-Golden 1965)

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Ionização (continuação)

Curvas seção de choque de ionização X energia do elétron para gases nobres estão representadas na Fig 2-8 . A forma da curva é típica não só para gases nobres mas para gases em geral.

Note-se que na figura da esquerda a seção de choque está representada em unidades πa_0 onde a_0 é o raio de Bohr ($8,82 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$). Na outra, em pares de íons/cm Torr (grandeza proporcional à seção de choque).

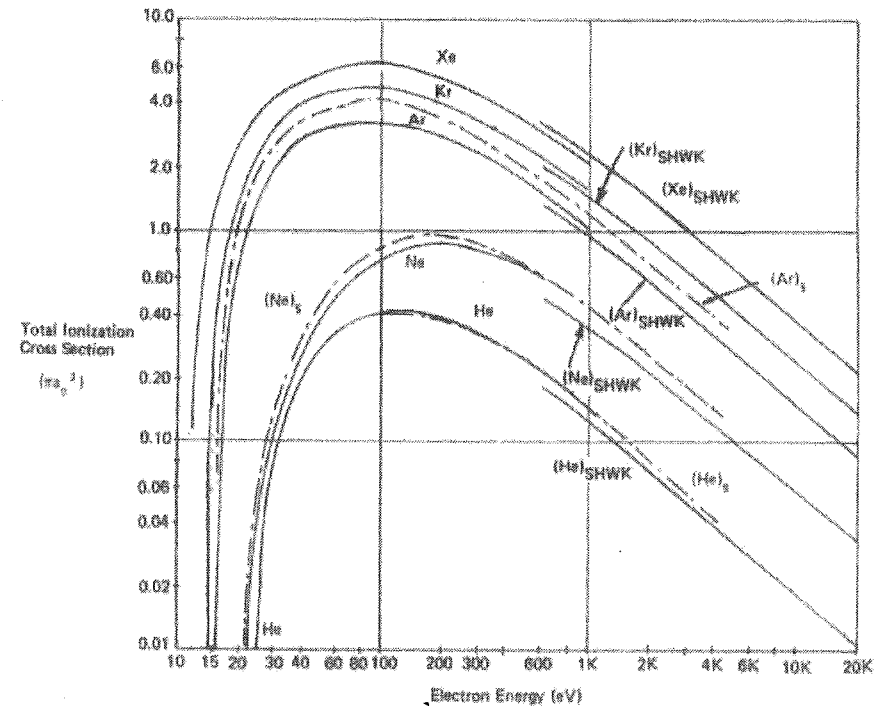


Figure 2-8. Ionization cross-sections of the noble gases (from Rapp and Englander-Golden 1965; includes data from (S) Smith 1930 and (SHWK) Schram et al. 1965. Similar values for Ar, He and Ne have been obtained by Fletcher and Cowling 1973); n.b. $\pi a_0^2 = 8.82 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Ionização (continuação)

Curvas de formação de pares de íons por colisões com elétrons estão apresentadas na Fig. 5-3. (O número de pares de íons/cm Torr é proporcional à seção de choque).

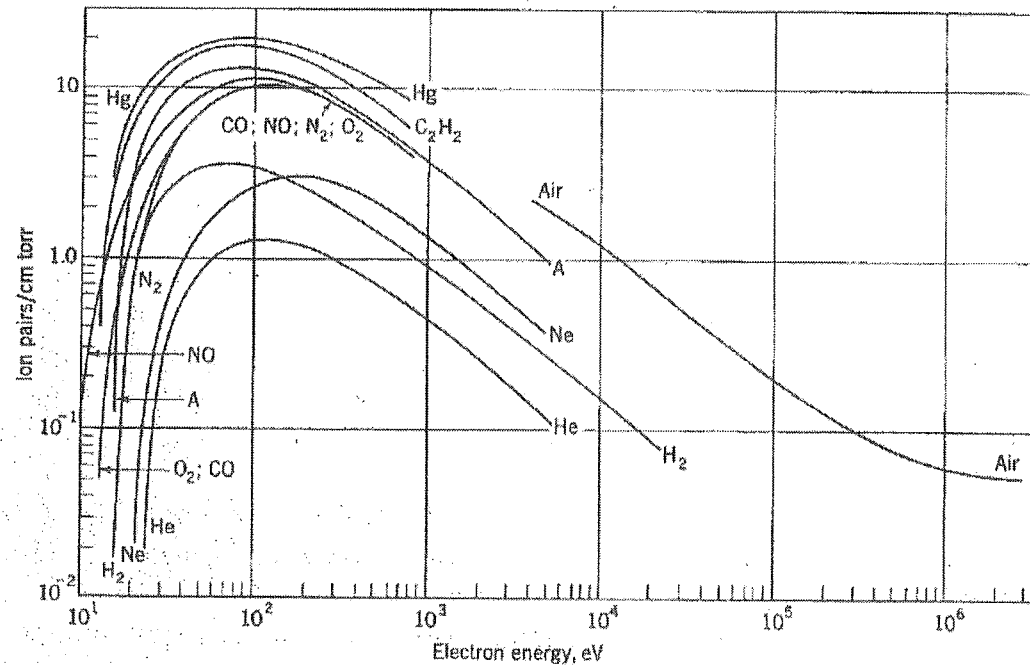


Fig. 5-3 Ionization efficiencies of electrons for some gases as a function of electron energy. (From R. Jaekel, "Encyclopedia of Physics," vol. 12, p. 535, Springer-Verlag OHG, Berlin, 1958.)

PROCESSOS DE COLISÃO NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Ionização (continuação)

Além de impacto por elétrons, a ionização pode ser produzida por

- ativação térmica (colisões com átomos neutros “quentes” na descarga luminescente), pouco importante em plasmas frios;
- *fotoionização*.

A seção de choque de ionização \times comprimento de onda e energia do fóton é mostrada na Fig. 2-9.

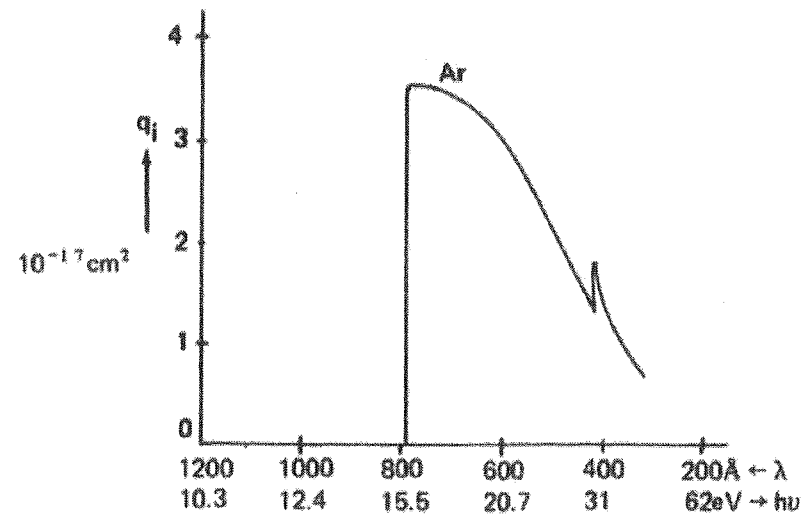


Figure 2-9. Photoionization cross-section of argon (Weissler 1956)

$$1 \text{ eV} \Rightarrow 1234 \text{ nm}, \quad E = h\nu = hc/\lambda$$

A descontinuidade em $\approx 29 \text{ eV}$ é significativa.

COLISÕES NA FASE GASOSA (CONTINUAÇÃO)

COLISÕES INELÁSTICAS

Excitação

Numa colisão inelástica, um elétron ligado a um núcleo pode passar a um nível de energia mais alto mediante absorção de parte da energia do elétron incidente. Este processo chama-se *excitação*.

Para o argônio, por exemplo



onde Ar^* é o átomo excitado.

Para cada nível eletrônico existe um mínimo de energia para excitação: o *potencial de excitação*.

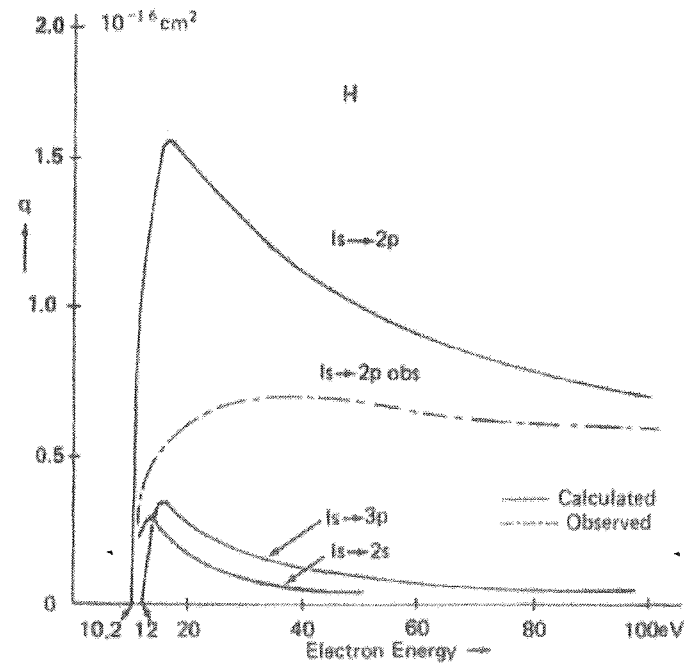


Figure 2-12. Excitation cross-section for electrons in atomic hydrogen (von Engel 1965)

COLISÕES NA FASE GASOSA (CONTINUAÇÃO)

COLISÕES INELÁSTICAS

Excitação

Curva de seção de choque de excitação para hidrogênio molecular.

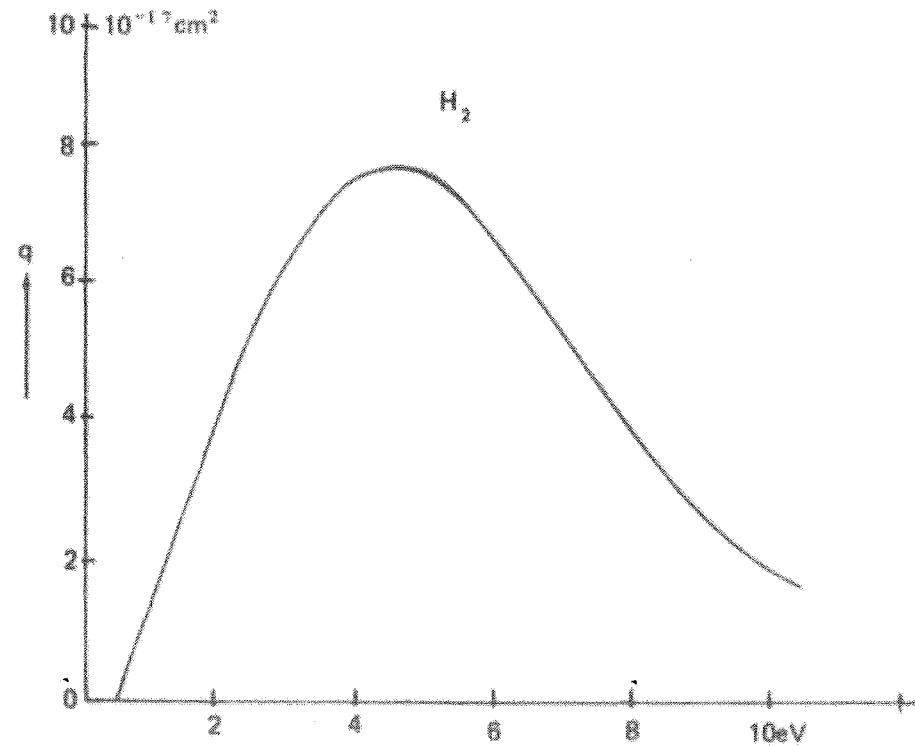


Figure 2-13. Excitation cross-section for electrons in molecular hydrogen (Frost and Phelps 1962)

COLISÕES NA FASE GASOSA

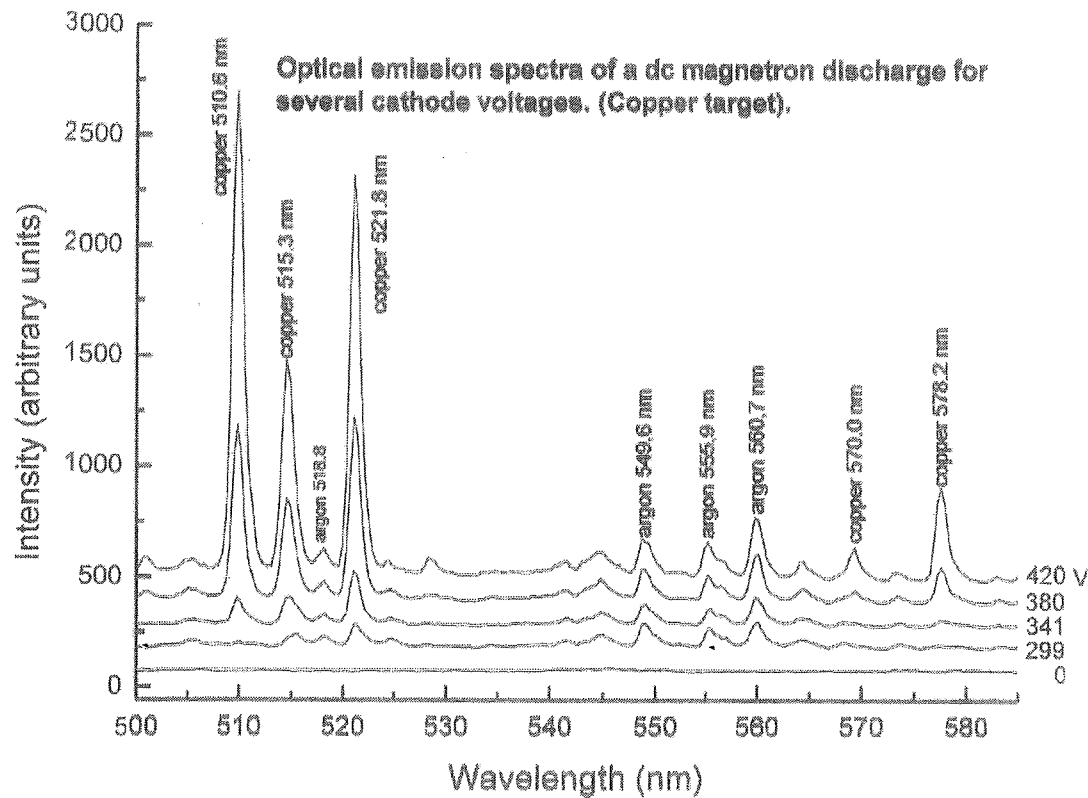
COLISÕES INELÁSTICAS

Relaxação

Os seguintes pontos são fundamentais:

- a luminescência de uma descarga é devida à *relaxação* ou *de-excitação* de átomos ou moléculas eletronicamente excitados;
- os estados excitados são instáveis e a configuração eletrônica volta ao estado fundamental após uma ou mais transições com tempos de vida que variam amplamente entre nanossegundos e segundos.
- cada transição é acompanhada pela emissão de um fóton cuja energia é a diferença de energia ΔE entre os dois níveis envolvidos na transição.

Espectro de uma descarga luminescente de argônio e vapor de cobre:



COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Colisões metaestável-átomo neutro

Metaestáveis são átomos excitados com tempo muito longo (1ms – 1 s)

Todos os gases nobres tem metaestáveis:

Ar⁺ em 11,5 e 11,7 eV

Ne^{*} em 16,6 e 16,7 eV

Efeito Penning

Se a energia de ionização do átomo neutro, G, for menor que a energia de excitação do metaestável, a seguinte reação pode ocorrer



Colisões metaestável-metaestável

A ionização de um metaestável pode ocorrer por impacto de elétron. Para Ar:



Energia mínima do elétron para ionizar um átomo de Ar no estado fundamental: energia de limiar = 15,76 eV.

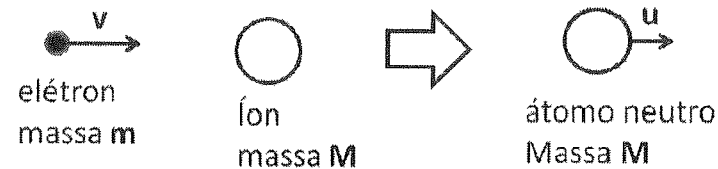
Energia mínima do elétron para ionizar um metaestável de Ar supondo uma energia de metaestável de 11,55 eV: somente 4,21 eV.

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Recombinação

Dinâmica do processo



Por conservação de energia e de momento:

$$u^2 = 2Um/[(m + M)M]$$

U = decaimento da energia potencial do átomo

$U > 0, u > 0, v > 0 \rightarrow$ solução irreal para U !

Como resolver o problema?

Colisão com um terceiro corpo

O excesso de energia no processo de coalescência é eliminado pela colisão com um átomo neutro.

Processo de dois estágios

Formação de um íon negativo e colisão com o íon positivo.

Recombinação radioativa

O excesso de energia no processo de coalescência é eliminado pela emissão de radiação.

COLISÕES NA FASE GASOSA

COLISÕES INELÁSTICAS

Recombinação (continuação)

Como resolver o problema?

Colisão com um terceiro corpo

O excesso de energia no processo de coalescência é eliminado pela colisão com um átomo neutro.

Processo de dois estágios

Formação de um íon negativo e colisão com o íon positivo.

Recombinação radioativa

O excesso de energia no processo de coalescência é eliminado pela emissão de radiação.

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS

Quando uma partícula atinge um sólido, um dos possíveis resultados é a emissão de elétrons secundários.

O número de elétrons ejetados por partícula incidente é o *coeficiente de elétrons secundários*, ou *rendimento*.

Elétrons secundários são observados mediante bombardeamento de elétrons, íons, átomos neutros e fótons. A emissão de secundários em função da energia dos elétrons incidentes para os metais segue o perfil geral da figura, representado aqui para a prata.

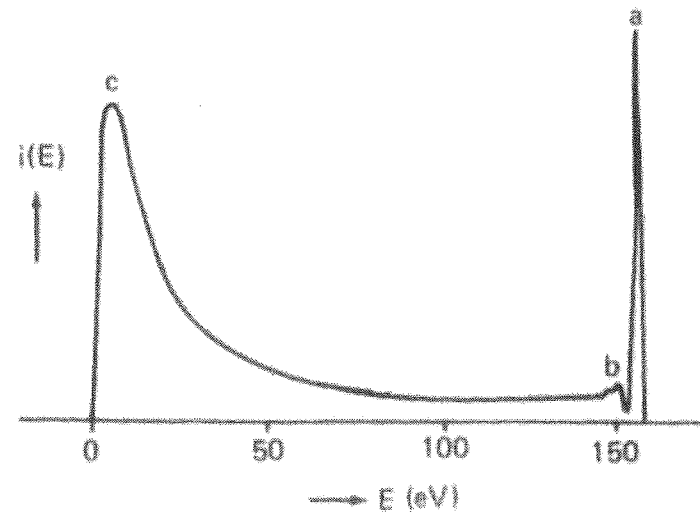


Figure 4-5. The energy distribution of secondary electrons emitted by silver (Rudberg 1930, 1934); a – elastically reflected primaries, b – inelastically reflected primaries, c – ‘true’ secondaries

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

Emissão secundária de elétrons, δ , para impacto de elétrons em vários metais

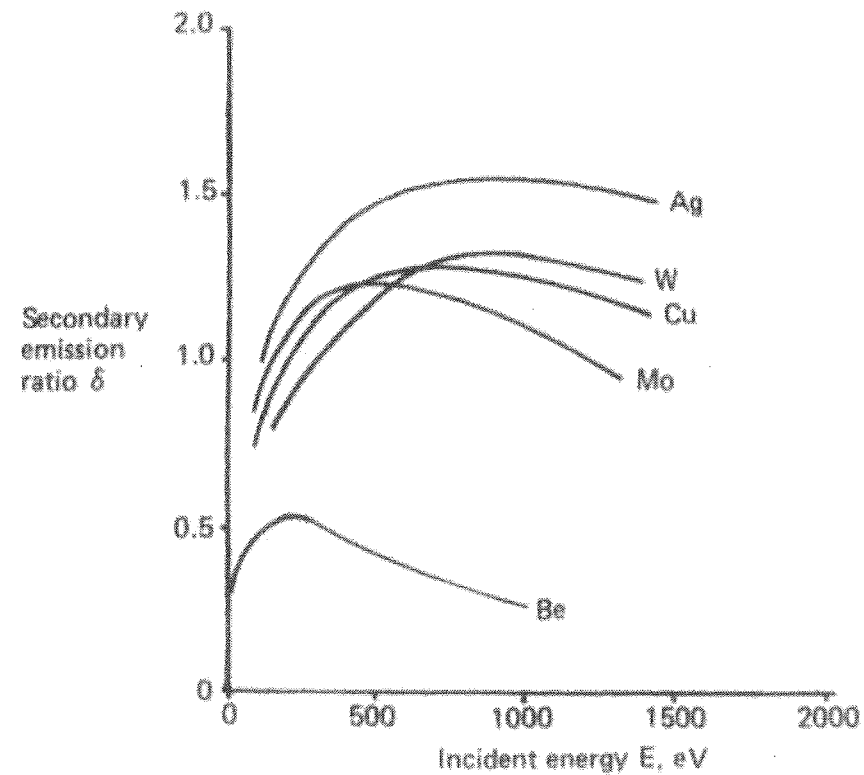


Figure 4-6. Secondary emission coefficient δ of different metals as a function of the energy of incident electrons (Hemenway et al. 1967)

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

Emissão secundária, γ_i , para o impacto de diversos íons em Mo e W.

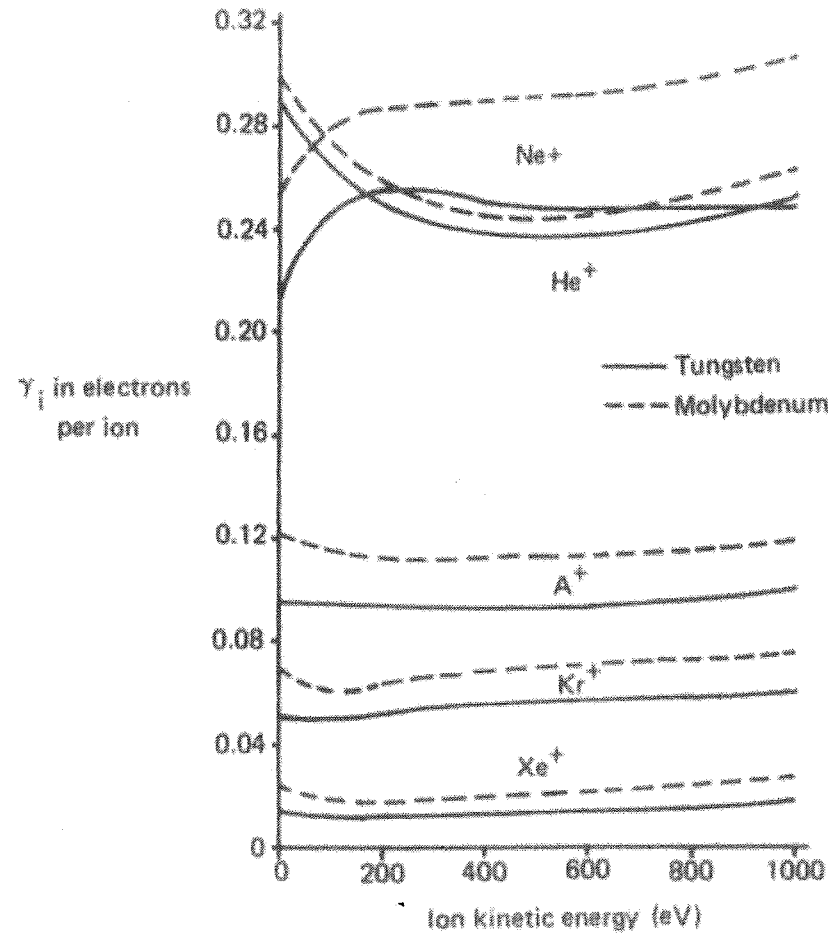


Figure 4-7. Secondary electron yields γ_i for noble gas ions on atomically clean tungsten and molybdenum (Hagstrum 1956b)

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

O rendimento γ_i difere significativamente daquele de uma superfície limpa para o de uma superfície com gases adsorvidos.

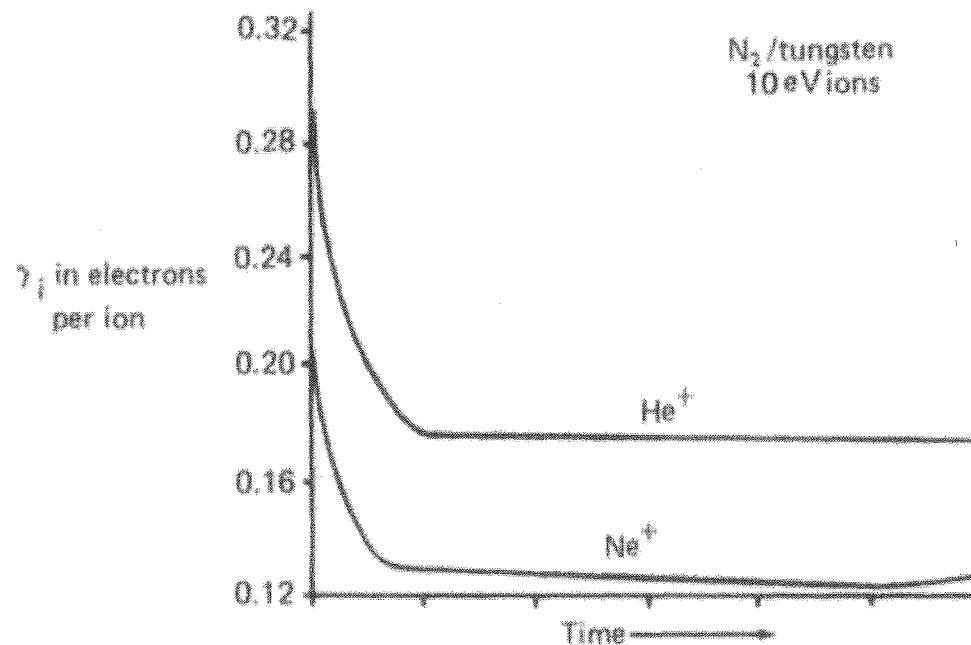


Figure 4-10. Secondary electron yields γ_i for He^+ and Ne^+ ions, as a monolayer of nitrogen forms on tungsten. The break in the plot represents the completion of the first monolayer (from Hagstrum 1956c)

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

O rendimento γ_i difere significativamente daquele de uma superfície limpa para o de uma superfície com gases adsorvidos.

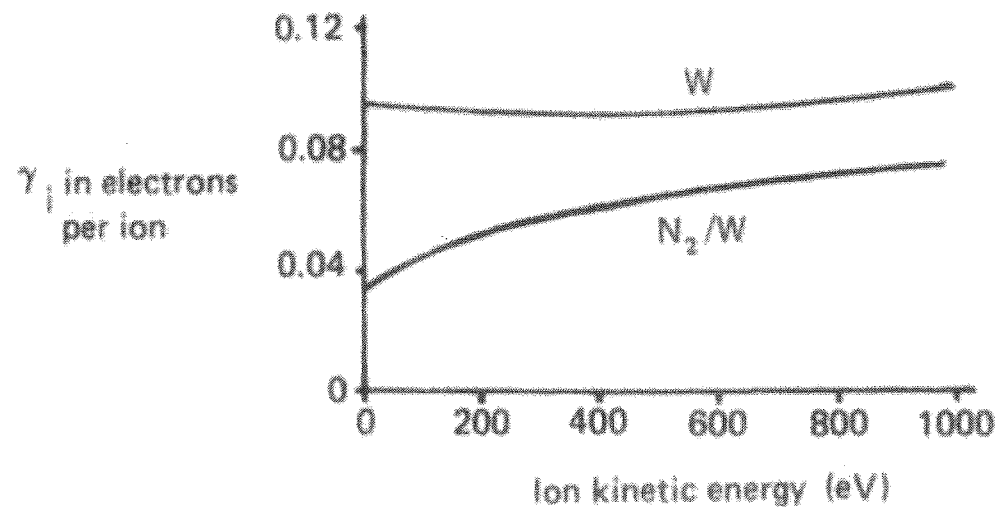


Figure 4-11. Secondary yield γ_i for argon ions on clean tungsten and on tungsten covered with a monolayer of nitrogen (from Hagstrum 1956c)

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

Distribuição de energia de elétrons secundários para incidência de vários íons em Mo

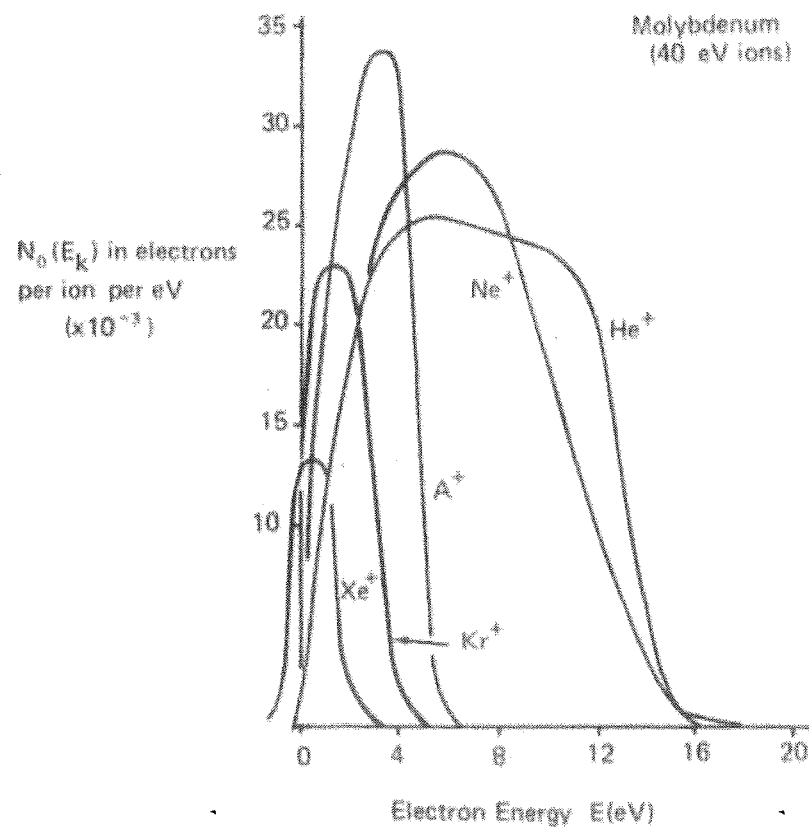


Figure 4-14. Energy distributions of secondary electrons ejected from Mo by 40 eV ions of the noble gases (Hagstrum 1956b)

COLISÕES – EMISSÃO DE ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (CONTINUAÇÃO)

Distribuição de energia de elétrons secundários para incidência de He^+ em diversas energias sobre Mo

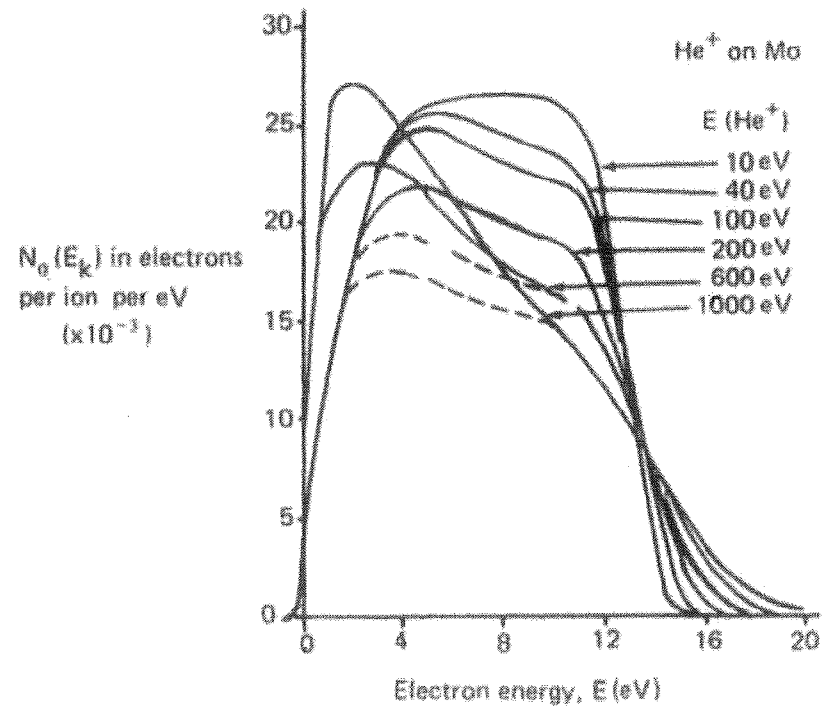


Figure 4-15. Energy distributions of secondary electrons ejected from Mo by He^+ ions of various energies (Hagstrum 1956b)