

Měření účinných průřezů pro excitaci atomu elektrony

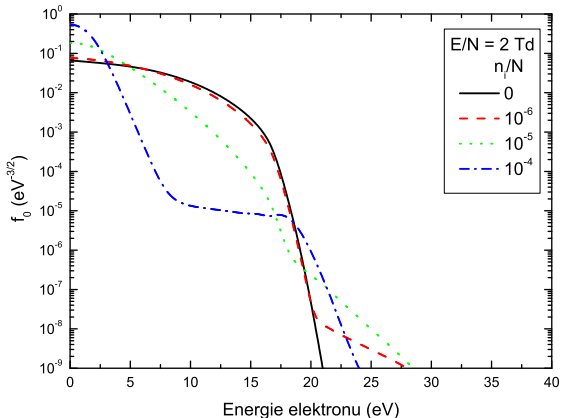
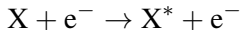
F7390 Elementární srážkové procesy v plazmatu 1

Zdeněk Navrátil

Ústav fyziky a technologií plazmatu PŘF MU, Brno

K čemu jsou potřeba účinné průřezy pro excitaci

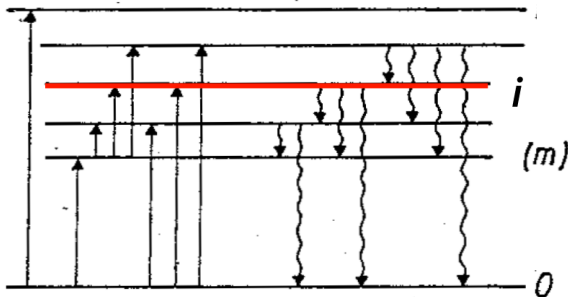
nepružné srážky – vliv na EDF



Srážkově-radiační modelování

koronová rovnováha – populace excitovaných stavů elektrony,
depopulace spontánní emisí

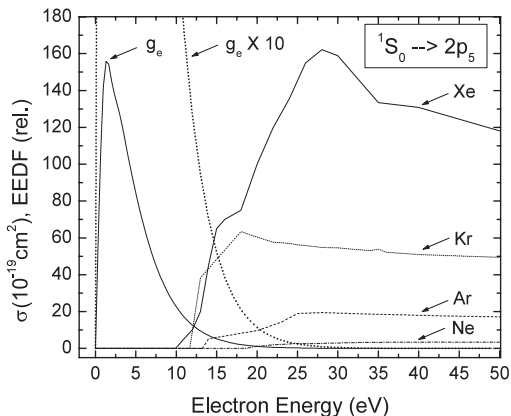
$$k_{0i}^{\text{el}} n_e n_0 + k_{mi}^{\text{el}} n_e n_m + \sum_{j>i} A_{ji} n_j = \sum_{j<i} A_{ij} n_i \quad (1)$$



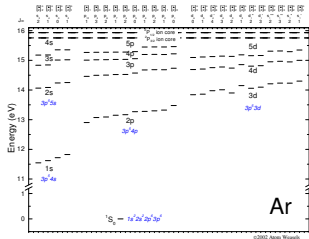
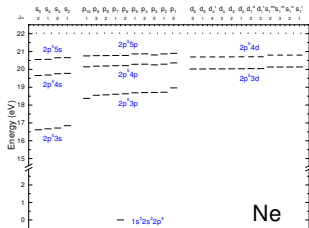
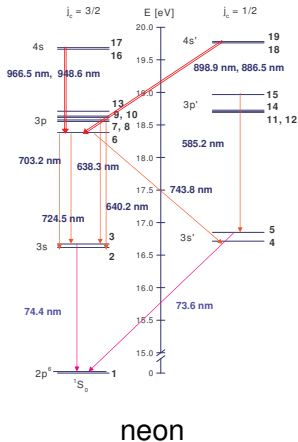
Výpočet rychlostních koeficientů

rychlostní koeficient

$$k = \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int_0^\infty \sigma(\varepsilon) f_0(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$



Stavy Ne, Ar



Optické metody

- měříme intenzitu světla vyzařovaného atomem na konkrétních přechodech v závislosti na energii elektronů v monochromatickém svazku
- použití elektronů s obecnou rozdělovací funkcí nevede k srovnatelným výsledkům

Optické metody

měříme Φ – počet fotonů emitovaných za jednotku času svazkem jednotkové délky, $[\Phi] = \text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$

$$\frac{\sigma}{S}[n_g SL][n_e Sv \Delta t] = [A_i \Delta t][n_i SL]$$

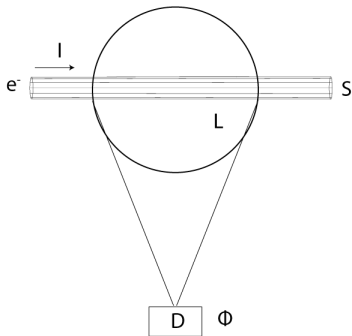
$$n_g n_e \sigma v = A_i n_i$$

$$\Phi = n_i A_i S$$

$$I = e n_e v S$$

$$\sigma = \frac{\Phi}{n_g n_e Sv} = \frac{\Phi}{n_g I / e}$$

komplikace: $A_i = \sum_j A_{ij}$, prostorový úhel



Optické metody

- **Optický účinný průřez** (*optical emission cross section*)

$$\sigma_{i \rightarrow j}^{\text{opt}} = \frac{\Phi_{i \rightarrow j}}{(I/e)n_0}, \quad (2)$$

- **Zdánlivý účinný průřez** (*apparent cross section*)

$$\sigma_i^{\text{app}} = \sum_{j < i} \sigma_{i \rightarrow j}^{\text{opt}}. \quad (3)$$

- **Kaskádní účinný průřez** (*cascade cross section*)

$$\sigma_i^{\text{casc}} = \sum_{k > i} \sigma_{k \rightarrow i}^{\text{opt}}. \quad (4)$$

- **Přímý účinný průřez** (*direct cross section*)

$$\sigma_i^{\text{dir}} = \sigma_i^{\text{app}} - \sigma_i^{\text{casc}}. \quad (5)$$

Kaskádní příspěvky

$$\sigma_{i \rightarrow j}^{\text{opt}} = \frac{\Phi_{i \rightarrow j}}{(l/e)n_0}$$

$$\sigma_i^{\text{app}} = \sum_{j < i} \sigma_{i \rightarrow j}^{\text{opt}}$$

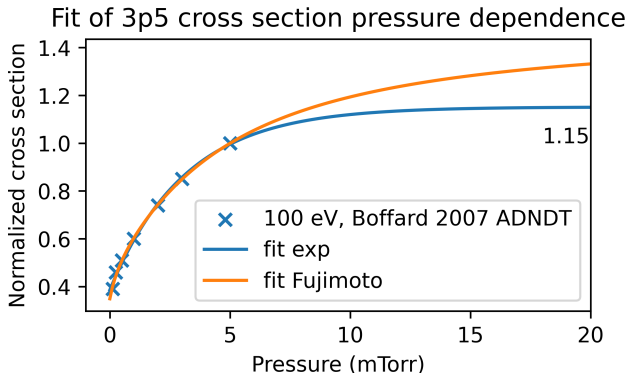
$$\sigma_i^{\text{casc}} = \sum_{k > i} \sigma_{k \rightarrow i}^{\text{opt}}$$

$$\sigma_i^{\text{dir}} = \sigma_i^{\text{app}} - \sigma_i^{\text{casc}}$$

obtížně změřitelné všechny
příspěvky

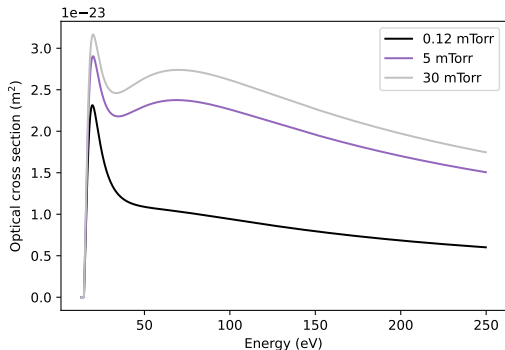


Vliv tlaku



kaskády jsou ovlivněny koncentrací atomů v základním stavu

Vliv tlaku



kaskády jsou ovlivněny koncentrací atomů v základním stavu

Vliv tlaku

Zejména účinné průřezy rezonančních čar a stavů vykazují díky samoabsorpci závislost na tlaku (Heddle & Samuel, 1970)

$$\sigma_{i \rightarrow j}^{\text{opt}} = A_{i \rightarrow j} \frac{\sigma_i^{\text{dir}} + \sigma_i^{\text{casc}}}{A_i + (g(p) - 1)A_{i \rightarrow \text{ground}}}, \quad (6)$$

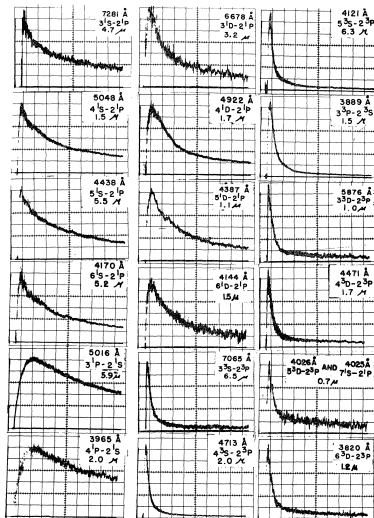
a pro zdánlivý účinný průřez rezonančního stavu

$$\sigma_i^{\text{app}} = A_i \frac{\sigma_i^{\text{dir}} + \sigma_i^{\text{casc}}}{A_i + (g(p) - 1)A_{i \rightarrow \text{ground}}}. \quad (7)$$

A_i je suma Einsteinových koeficientů $A_{i \rightarrow j}$ pro všechny přechody ze stavu i a funkce tlaku $g(p)$ udává pravděpodobnost, že rezonanční foton opustí kolizní nebo výbojový prostor (Gabriel & Heddle, 1960; Phelps, 1958).

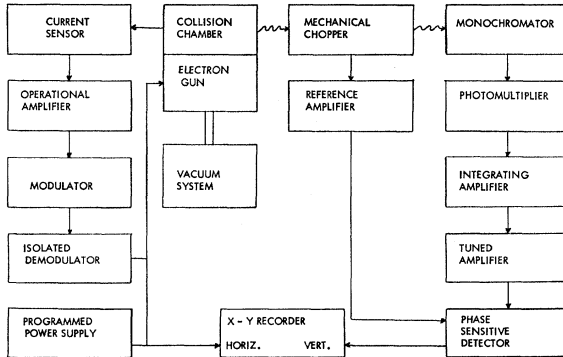
St John *et al.* (1964) – helium

FIG. 1. Apparent excitation functions of 18 helium levels. Cross sections are relative; electron energy varies from 0 to 500 eV.



na ose x – energie elektronů

Anderson *et al.* (1967) – rtut'



Anderson *et al.* (1967)

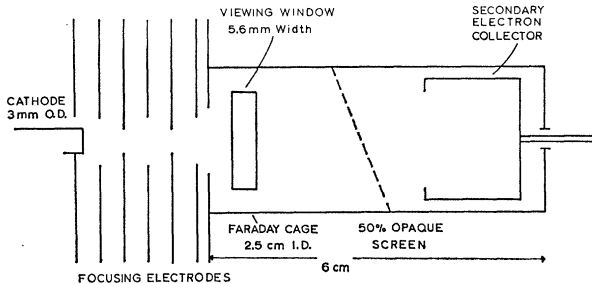


FIG. 2. Schematic diagram of the excitation tube. The spacings between adjacent grids are about 2 mm.

Anderson *et al.* (1967)

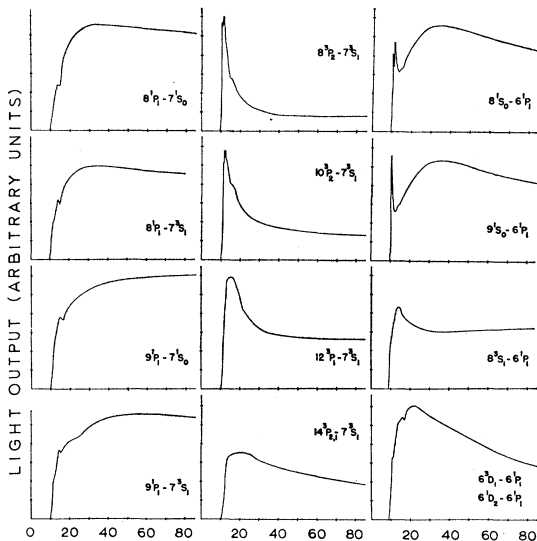
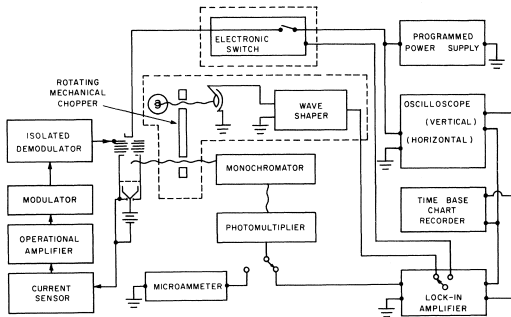


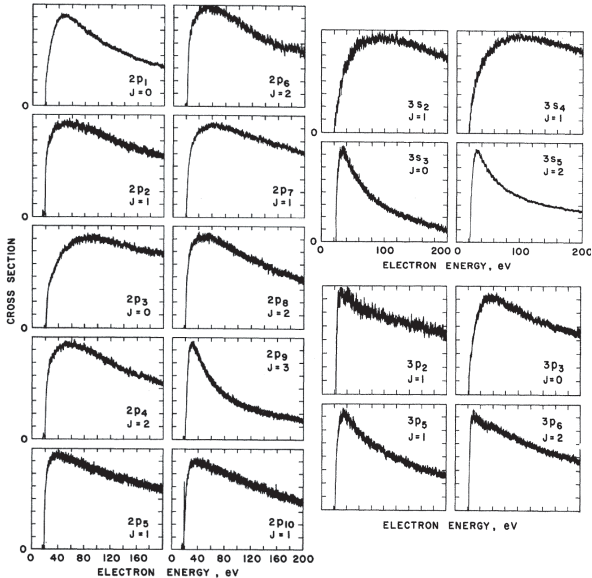
FIG. 5. Typical optical excitation functions of 12 mercury levels. Electron energy ranges from 0 to 80 eV.

Sharpton *et al.* (1970)



- světelný zdroj (wolframový pásek) pro absolutní kalibraci – optická cesta k monochromátoru je stejná
- Tlak plynu v komoře byl pod 30 mTorr.
- monochromatizace, snímání fotonásobičem ve spektrálním rozsahu 330 – 1200 nm

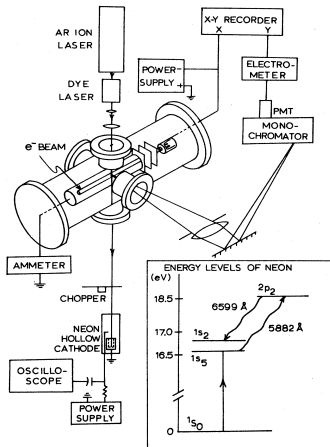
Sharpton *et al.* (1970)



Sharpton *et al.* (1970)

- ns_2 a ns_4 mají široká maxima, obsahují singletový stav 1P_1
- ns_3 , ns_5 úzká maxima, jsou čistě tripletové, excitace se tedy uskutečňuje zejména výměnou elektronů
- ns_5 má poněkud širší maximum ve srovnání se stavem ns_3 díky vyššímu kaskádnímu příspěvku.
- stavy se lichou hodnotou $J + l$ mají větší účinné průřezy než stavy se sudou hodnotou
- Příspěvek kaskádních účinných průřezů $2p_i$ a $3p_i$ stavů je typicky 50 %, pro některé $3p_i$ stavy až 70 %.

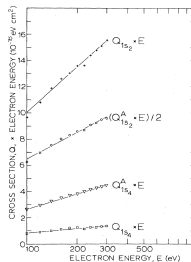
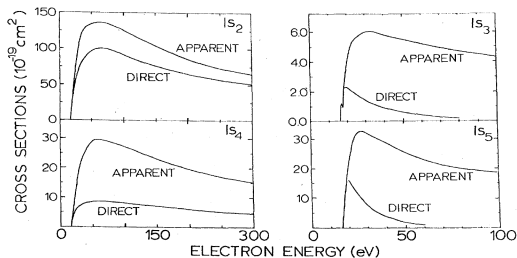
Phillips *et al.* (1981)



Phillips *et al.* (1981)

- přechody z $1s_2$ a $1s_4$ mají λ 73,6 a 74,4 nm, $1s_3$ a $1s_5$ jsou metastabilní stavy
- technika laserem indukované fluorescence (LIF)
- Laserový paprsek byl naladěn na vhodnou vlnovou délku (např. 588,2 nm), aby absorpcí záření docházelo k přechodu ze stavu $1s_i$ do některého ze stavů $2p_j$ (např. $1s_5 \rightarrow 2p_2$).
- Přerušování paprsku s frekvencí 720 Hz, měření rozdílu ve spektrech při zapnutém a vypnutém laseru.
- Tento rozdíl (měřený např. na čáře 659,9 nm přechodu $2p_2 \rightarrow 1s_2$) je v rámci dané přesnosti přímo úměrný zdánlivému účinnému průřezu původního stavu ($1s_5$).
- kalibrace na energii elektronů 90 eV srovnáním s měřením kaskádních příspěvků Sharpton *et al.* (1970). Je-li příspěvek přímého průřezu ve zdánlivém zanedbatelný, je zdánlivý průřez roven kaskádnímu.
- absolutní hodnoty jsou zatíženy chybou 25 % (28 %) pro metastabilní resp. rezonanční stavy.

Phillips *et al.* (1981)



- Bornova-Betheova aproximace – účinný průřez

$$\sigma_{i \rightarrow j}(\varepsilon) = 4\pi a_0^2 f_{ij} \left(\frac{R}{\varepsilon}\right) \left(\frac{R}{\varepsilon_{ij}}\right) \ln \varepsilon \quad (8)$$

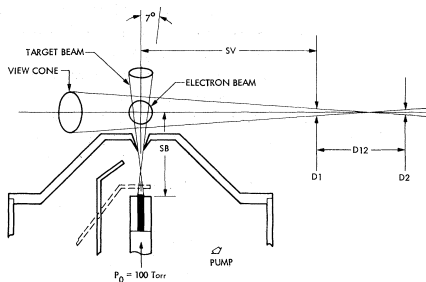
kde a_0 je Bohrov poloměr, f_{ij} síla oscilátoru optického přechodu, R Rydbergova energie (13,6 eV) a ε_{ij} energetický rozdíl hladin

- "Bethe" plot – závislost $\sigma_{i \rightarrow j} \varepsilon$ na $\ln \varepsilon$ je při vyšších energiích (nad 100 eV) lineární a z prokladu naměřenými daty lze stanovit sílu oscilátoru optického přechodu.

Metody měření ztráty energie

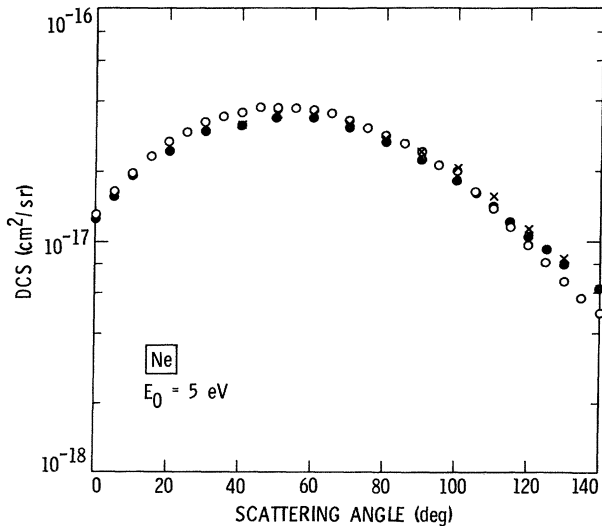
Tento způsob je založen na měření ztráty energie elektronů jako funkce rozptylového úhlu. Elektron, který srážkou s atomem způsobil jeho excitaci, se v energiovém spektru posune k nižším hodnotám energií o stejnou hodnotu, jako je energiový rozdíl počátečního a koncového stavu atomu.

Register & Trajmar (1984)



- Svazek atomů neonu vytvořený polem kapilár a vystupující otvorem sběrače se křížil s elektronovým svazkem.
- Elektrony byly emitovány tenkým wolframovým vláknem, urychleny elektronovým dělem a monochromatizovány dvojitým hemisférickým energiovým selektorem.
- Detektor byl tvořen kuželem vymezujičím vstupní aperturu, mřížkami s napětím zabraňující detekci elektronů podstoupivších nepružnou srážku s atomem a elektronovým násobičem typu *channeltron*.

Register & Trajmar (1984)



Register & Trajmar (1984)

- Elastický diferenciální účinný průřez byl měřen absolutně v intervalu úhlů $-40-145^\circ$ pro elektrony s energií $5-100\text{ eV}$ s chybou $3\%-5\%$.
- kritické hodnoty energie a úhlu, při kterých se v závislosti diferenciálního účinného průřezu na úhlu rozptylu objevuje ostré minimum. Naměřená poloha $(62,5 \pm 2,5)\text{ eV}$; $(101,5 \pm 1,5)^\circ$ je v souladu s jinými pracemi teoretického a experimentálního charakteru (např. Menandez *et al.*, 1980).

Register & Trajmar (1984)

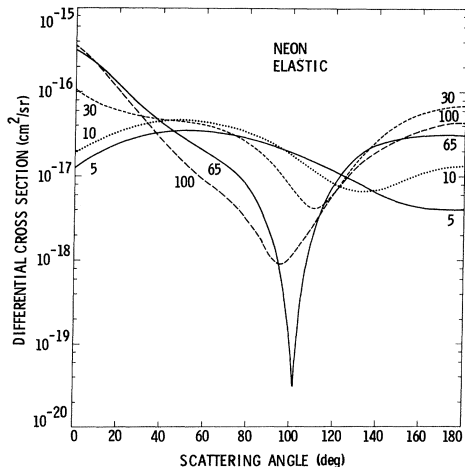
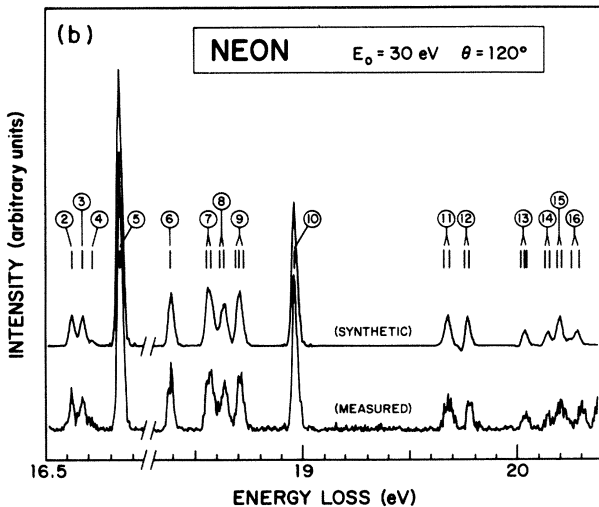
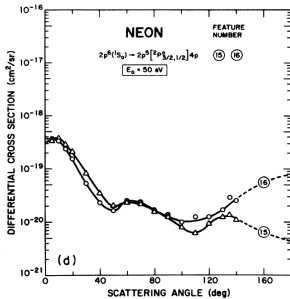
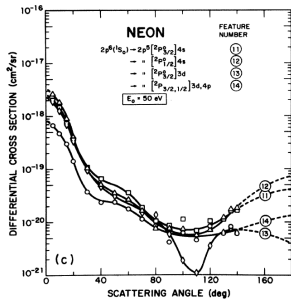
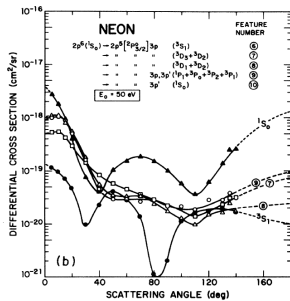
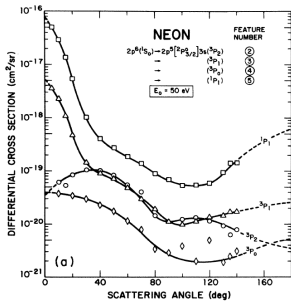


FIG. 7. A comparison of the DCS curves at various impact energies. The low-angle extrapolation is based on the phase-shift values while the high-angle extrapolation is based on phase-shift values and theoretical results of Fon *et al.* (Ref. 3).

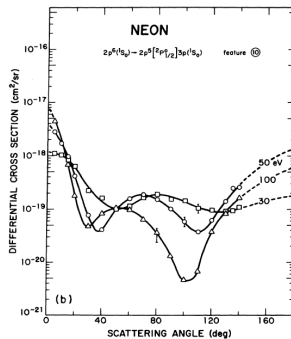
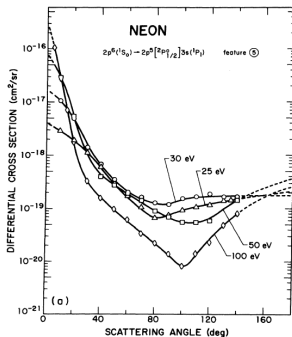
Register *et al.* (1984)



Register et al. (1984)



Register *et al.* (1984)



různé počáteční energie nalétajících elektronů
minima se prohlubují s rostoucí energií

Register *et al.* (1984)

- Šestnáct čar nalezených ve spektru bylo přiřazeno stavům resp. skupinám stavů $1s_5 - 3p_1$.
- Rozlišení energiového rozdělení srážejících se elektronů bylo 60–80 meV (Register *et al.* , 1980).
- Na rozdíl od předešlých prací byly hodnoty diferenciálních průřezů stanoveny absolutně, a to přes hodnoty elastického účinného průřezu.
- Chyba průřezů byla stanovena na 13–40 % v závislosti na konečném stavu atomu a počáteční energii elektronů.

Kanik *et al.* (1996) a Tsurubuchi *et al.* (2000)

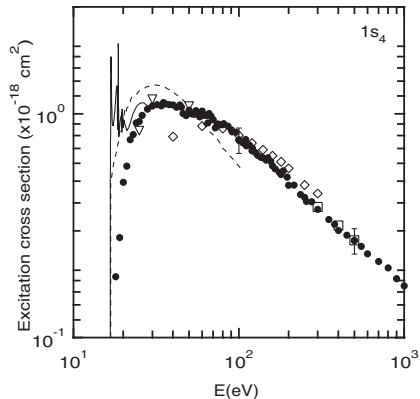
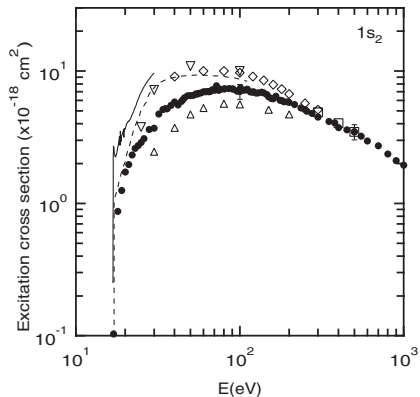
Kanik *et al.* (1996)

- měření optické excitační funkce rezonančních stavů $1s_2$ a $1s_4$ měřením UV záření doprovázejícího zářivé přechody z těchto stavů
- UV spektrometr s channeltronovým PMT, λ 45–80 nm
- tlak plynu 10^{-6} Torr pro potlačení samoabsorpce.
- Celková chyba měření a kalibrace byla odhadnuta na 41 %.

Tsurubuchi *et al.* (2000)

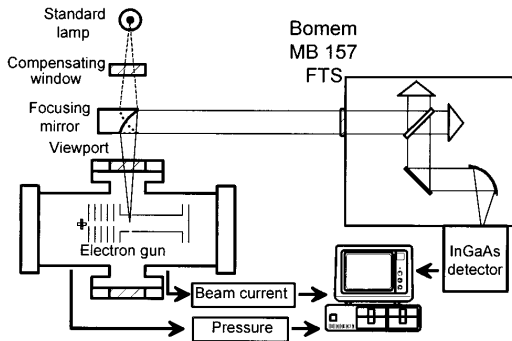
- měření kaskádních příspěvků $2p^53p \rightarrow 2p^53s$ (vliv až 36 % při 40 eV)
- výsledkem přímé účinné průřezu rezonančních stavů $2p^53s$
- Chyba účinných průřezů byla určena na 20,2 %.

Tsurubuchi *et al.* (2000)



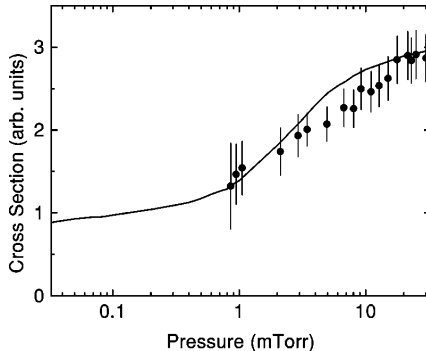
Účinné průřezy pro excitaci stavů $1s_2$ a $1s_4$. ● Tsurubuchi *et al.* (2000), ◇ Phillips *et al.* (1985), ▽ Register *et al.* (1984), □ Suzuki *et al.* (1994), △ deJongh [1971], --- Machado *et al.* (1984), — Zeman & Bartschat (1997). Převzato z práce Tsurubuchi *et al.* (2000).

Chilton *et al.* (1998)



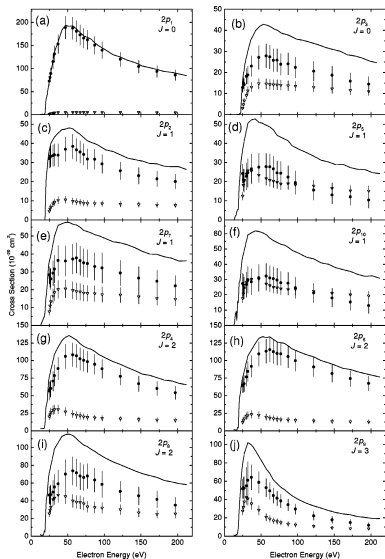
- mřížkový monochromátor konstrukce Czerny-Turner s fotonásobiče pro VIS
- FTIR spektrometr pro přechody v IR oblasti 900 nm – 2 μ m (přechody $2p^53d$, $2p^54s \rightarrow 2p^53p$)

Chilton *et al.* (2000) – neon



- při tlaku 30 mTorr (4 Pa) dochází k saturaci způsobenou úplnou reabsorpcí rezonančního přechodu $3d_2 \rightarrow 1p_0$.

Chilton *et al.* (2000) – neon, základní stav \rightarrow 3p



- pro průřezy do 3p studovány spontánní přechody ze stavů $2p^5 3d$, $2p^5 4s$, $2p^5 4d$ a $2p^5 5s$, příspěvky 4s, 5s ukázaly být zanedbatelné
- analyzovány i stavy 3d, 4s (zdánlivé účinné průřezy)

— zdánlivý, ∇ kaskádní, \bullet přímý

Behnke *et al.* (1985) – neon 3s → 3p

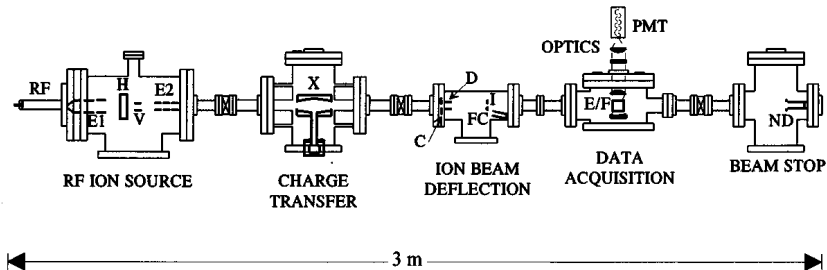
- řešení Boltzmannovy kinetické rovnice pro rozdělovací funkci elektronů
- jednoduchý kolizně-radiační model (zanedbání přímé excitace stavů 3p)

$$\sigma_{ij}(x) = 4\pi a_0^2 \left(\frac{R}{\varepsilon_{ij}}\right)^2 f_{ij} \sqrt{\frac{x-1}{x}} \frac{\ln[2(x + \sqrt{x(x-1)}) - 1/2]}{x+C},$$

kde a_0 je Bohrovův poloměr, R Rydbergova energie (13,6 eV), ε_{ij} prahová energie, f_{ij} síla oscilátoru, x redukovaná energie nalétajícího elektronu $x = \varepsilon/\varepsilon_{ij}$ a C je empirická konstanta.

- účinné průřezy pro excitaci ze všech stavů 3s do jednotlivých stavů 3p.
- absolutní hodnoty jsou však nižší (téměř dvakrát).

Lagus *et al.* (1996)



Lagus *et al.* (1996)

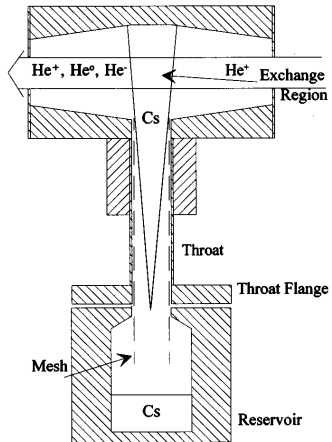
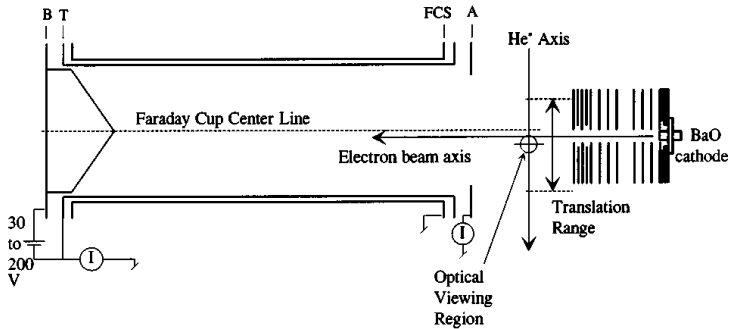


FIG. 2. Detail of charge-transfer cell.

Lagus *et al.* (1996)



Lagus *et al.* (1996) – profily svazků

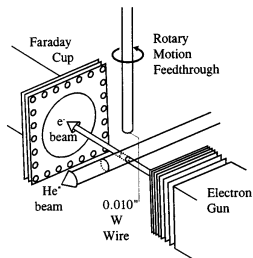


FIG. 7. Schematic diagram of rotating wire assembly.

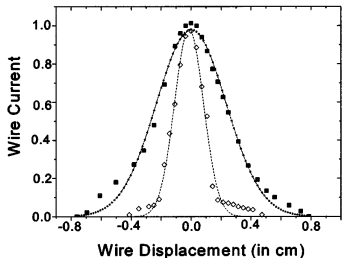


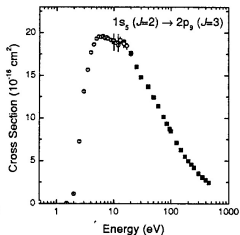
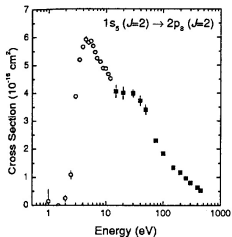
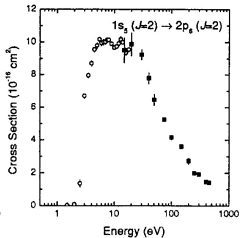
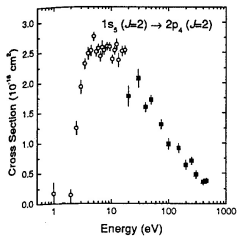
FIG. 8. Profiles of electron beam (\diamond) and neutral beam (\blacksquare) obtained from rotating wire apparatus.

- optický profil – napustí se plyn a posouvá se el. svazkem
- neutrály – atomy vyrážejí sekundární elektrony, ty jsou měřeny
- elektrony – měření proudu

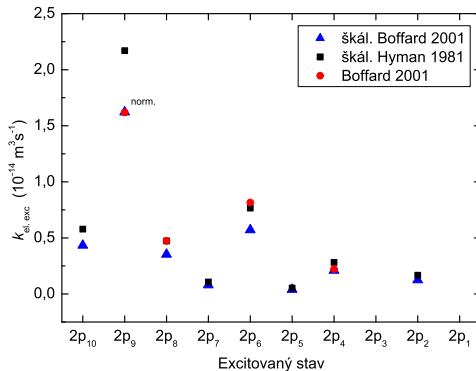
Boffard *et al.* (2001) – neon, excitace z $1s_5$

- aparatura vychází z Lagus *et al.* (1996)
- dutá katoda: $3 \cdot 10^{-6}$ metastabilních atomů na atom v základním stavu
- blízce-rezonanční přenos náboje mezi Ne^+ (1,6 kV) a Cs, produkující metastability Ne v poměru $1s_3:1s_5:1p_0$ rovném 1:5:6.
- určeny přechody $1s_5$ do stavů $2p_4$, $2p_6$, $2p_8$ a $2p_9$
- Chyba kalibrace byla stanovena na 30 %.

Boffard *et al.* (2001) – neon, excitace z $1s_5$



Boffard *et al.* (2001) – škálování průřezů povolených přechodů



Allan 2010

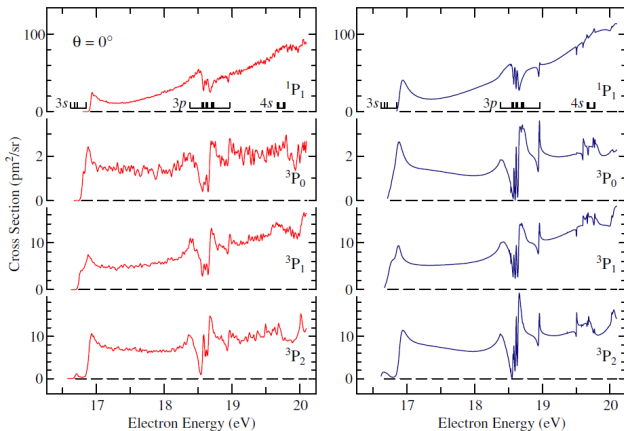


Figure 3. Absolute cross sections for excitation of the Ne ($2p^5 3s$) states at $\theta = 0^\circ$. The experimental data are in the left and the theoretical predictions in the right panel. Thresholds for the 3s, 3p and 4s excitations are indicated below the top spectra.

Zatsarinny 2010

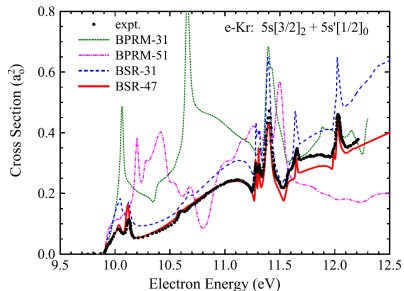


Figure 1. Metastable electron-impact excitation function of the $4p^5 5s$ ($J = 0, 2$) states in Kr. We compare the experimental data of Buckman *et al* [20] with the current BSR-31 and BSR-47 results as well as predictions from previous 31-state (BPRM-31) [21] and 51-state (BPRM-51) [38] standard Breit–Pauli R -matrix calculations. The published experimental data were multiplied by 0.67 in order to obtain a good visual fit to the BSR-47 results. The presented BSR predictions include cascade contributions from all higher-lying states included in the respective models.

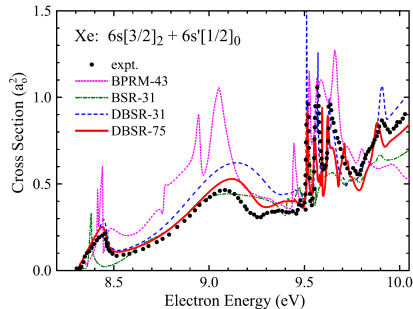
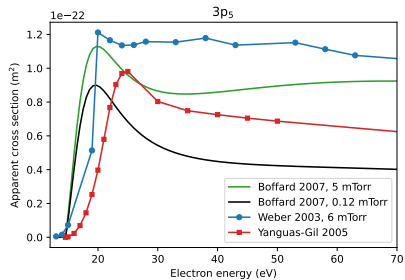
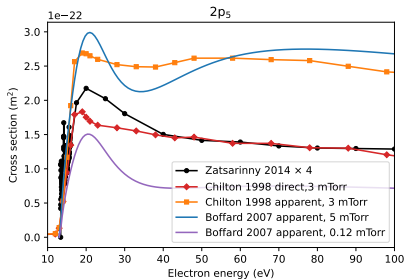
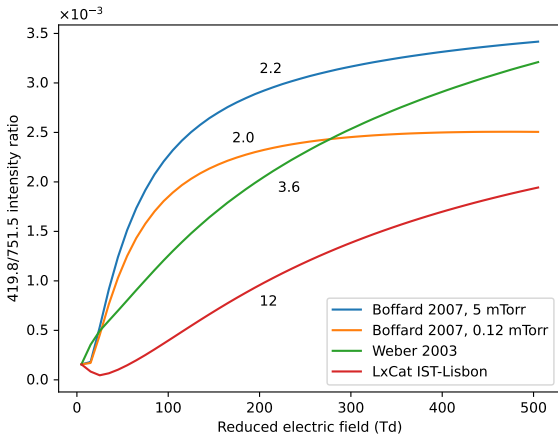


Figure 3. Metastable electron-impact excitation function of the $5p^5 6s$ ($J = 0, 2$) states in Xe. We compare the experimental data of Buckman *et al* [20] with the current BSR-31, DBSR-31 and DBSR-75 results and predictions from a 43-state (BPRM-43) [22] standard Breit–Pauli R -matrix calculation. The relative experimental data were visually normalized to the DBSR-75 results. The presented BSR and DBSR predictions include cascade contributions from all higher-lying states included in the respective models.

Argon 4p a 5p



Vliv na metodu měření el. pole



Literatura I

- Anderson, R.J, Lee, ETP, & Lin, CC. 1967. Electron excitation functions of mercury. *Physical Review*, **157**(1), 31–8.
- Behnke, J. F., Deutsch, H., & Scheibner, H. 1985. Investigation about stepwise excitation cross sections in rare gases. *Contributions to Plasma Physics*, **25**(1), 41.
- Boffard, John B., Keeler, M. L., Piech, Garrett A., Anderson, L. W., & Lin, Chun C. 2001. Measurement of electron-impact excitation cross sections out of the neon 3P_2 metastable level. *Physical Review A*, **64**, 032708–1.
- Chilton, J. Ethan, Boffard, John B., Schappe, R. Scott, & Lin, Chun C. 1998. Measurement of electron-impact excitation into the $3p^5 4p$ levels of argon using Fourier-transform spectroscopy. *Physical Review A*, **57**(1), 267–277.
- Chilton, J. Ethan, Stewart, Jr., M. D., & Lin, Chun C. 2000. Electron-impact excitation cross sections of neon. *Physical Review A*, **61**(5), 052708–1.
- Gabriel, A. H., & Heddle, D. W. O. 1960. *Proc. R. Soc. London A*, **258**, 124.
- Heddle, D. W., & Samuel, M. J. 1970. The effect of the imprisonment of resonance radiation on excitation measurements. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **3**, 1593.
- Kanik, I., Ajello, J. M., & James, G. K. 1996. Electron-impact-induced emission cross sections of neon in the extreme ultraviolet. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **29**(11), 2355–2366.
- Lagus, Mark E., Boffard, John B., Anderson, L. W., & Lin, Chun C. 1996. Cross sections of electron excitation out of metastable helium levels with a fast metastable target produced via charge exchange. *Physical Review A*, **53**(3), 1505–1518.
- Machado, Luiz E., Leal, Emerson P., & Csanak, George. 1984. Electron-impact excitation of some low-lying levels of neon. *Physical Review A*, **29**(4), 1811–1824.
- Menendez, M. J., Rees, J. A., & Beaty, E. C. 1980 (October). *In: Proceedings of the Thirty-Third Annual Gaseous Electronics Conference.*
- Phelps, A. V. 1958. Effect of the imprisonment of resonance radiation on excitation experiments. *Physical Review*, **110**(6), 1362–1368.

Literatura II

- Phillips, M. H., Anderson, L. W., & Lin, C. C. 1985. Electron excitation cross section for the metastable and resonant levels of $\text{Ne}(2p^5 3s)$. *Physical Review A*, **32**, 2117–2127.
- Phillips, Mark H., Anderson, L. W., & Lin, Chun C. 1981. Method for measuring the electron excitation cross section of the metastable $1s_5$ level of Ne. *Physical Review A*, **23**(5), 2751–2753.
- Register, D. F., & Trajmar, S. 1984. Differential, integral, and momentum-transfer cross sections for elastic electron scattering by neon: 5 to 100 eV. *Physical Review A*, **29**(4), 1785–1791.
- Register, D. F., Trajmar, S., & Srivastava, S. K. 1980. Absolute elastic differential electron scattering cross sections for He: A proposed calibration standard from 5 to 200 eV. *Physical Review A*, **21**(4), 1134–1151.
- Register, D. F., Trajmar, S., Steffensen, G., & Cartwright, David C. 1984. Electron-impact-excitation cross sections for electronic levels in neon for incident energies between 25 and 100 eV. *Physical Review A*, **29**(4), 1793–1810.
- Sharpton, Francis A., John, Robert M. St., Lin, Chun C., & Fajen, Fredric E. 1970. Experimental and theoretical studies of electron-impact excitation of neon. *Physical Review A*, **2**(4), 1305–1322.
- St John, R M, Lin, CC, & Miller, F L. 1964. Absolute electron excitation cross sections of helium. *Physical Review A*, **134**(4A), A888–8.
- Suzuki, T. Y., Suzuki, H., & Ohtani, S. 1994. Measurements of cross sections and oscillator strengths for Ne by electron-energy-loss spectroscopy. *Physical Review A*, **49**(6), 4578—4584.
- Tsurubuchi, S., Arakawa, K., Kinokuni, S., & Motohashi, K. 2000. Electron-impact cross sections of Ne. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **33**(18), 3713–3723.
- Zeman, V., & Bartschat, K. 1997. Electron-impact excitation of the $2p^5 3s$ and $2p^5 3p$ states of neon. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **30**(20), 4609–4622.

**MASARYKOVA
UNIVERZITA**