

# JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

## PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



### FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM IV

---

#### 2. Elektrony

Datum: 1. 11. 2023

Jméno: Vavřinec Konečný

Obor: Biofyzika

Hodnocení:

## 1. Úkol

- Změřte specifický náboj elektronu.
- Ze známé hodnoty elementárního náboje vypočtete hmotnost elektronu.
- Pozorujte difrakci elektronového svazku na stínítku baňky
- Určete vzdálenosti mezi rovinami grafitové difrakční mřížky.

## 2. Pomůcky

Thomsonova trubice, Helmholtzovy cívky, vysokonapěťový zdroj, proudový zdroj, posuvné měřítko, luminiscenční deska, propojovací vodiče, elektronová difrakční trubice.

## 3. Teorie

Difrakce elektronů

Difrakce je ohyb vlnění za překážkou (zde krystalovou mřížkou). Difrakce nastává, pokud vzdálenosti mezi rovinami mřížky jsou srovnatelné s vlnovou délkou vlnění. Při difrakci vzniká na krystalové mřížce fázový posun, čímž dochází k interferenci. Na stínítku pak lze pozorovat její maxima. [1]

Specifický náboj elektronu

Pokud elektrony urychlené elektrickým polem vlétnou do magnetického pole kolmého na směr jejich pohybu, dochází k vychýlení jejich trajektorie. Ze znalosti urychlovacího napětí, poloměru zakřivení trajektorie elektronu a intenzity magnetického pole lze určit specifický náboj elektronu. [2]

#### 4. Postup měření

Nejprve byla měřena difrakce elektronu. Vysokonapěťový zdroj byl dle návodu připojen k elektronové difrakční baňce a zapojení bylo zkontrolováno vedoucím praktika. Zdroj byl zapnut a urychlovací napětí nastaveno na 4 kV. Posuvným měřítkem byly změřeny průměry obou prstenců na stínítku a hodnoty zapsány do tabulky. Průměry prstenců byly změřeny ještě při urychlovacím napětí 4,2 kV, 4,4 kV, 4,6 kV, 4,8 kV a 3,8 kV, neboť vedoucí praktika upozornil, že zdroj raději nenastavovat na 5 kV. Zdroj byl následně vypnut a dle návodu připojen k Thompsonově trubici pro měření specifického náboje elektronu. Helmholtzovy cívky byly připojeny k proudovému zdroji a na obou zdrojích nastaveny všechny potenciometry na 0. Zapojení bylo zkontrolováno vedoucím praktika, zdroje zapnuty a po nažhavení katody bylo nastaveno urychlovací napětí na 2 kV. Na proudovém zdroji byl nastaven proud, kdy elektronový svazek na luminiscenční dece neprotínal stupnici v hodnotě 40 mm a hodnota proudu byla zapsána do tabulky. Zvyšováním proudu byl svazek vychylován čím dál více a hodnoty proudu při protnutí 50 mm, 60 mm, 70 mm a 80 mm zapisovány do tabulky. Stejný postup byl zopakován pro urychlovací napětí 3 kV, 4 kV a 4,8 kV. Zdroje byly nastaveny na nulové hodnoty a vypnuty.

## 5. Naměřené hodnoty

Prstence difrakčních maxim byly široké, byl tedy vždy měřen vnitřní a vnější průměr prstence.

Tabulka 1: Průměry prstenců elektronové difrakce při různém urychlovacím napětí

Napětí $U$ [kV]	Průměr $D_{1,in}$ [mm]	Průměr $D_{1,out}$ [mm]	Průměr $D_{2,in}$ [mm]	Průměr $D_{2,out}$ [mm]
4	21	25	35	41
4,2	21	25	35	40
4,4	20	24	35	39
4,6	19	22	33	38
4,8	18	21	33	37
3,8	21	25	37	43

Průměr cívek: 130 mm

Vzdálenost mezi cívkami: 54 mm

Tabulka 2: Hodnoty proudu v cívkách při určitém ohybu elektronového svazku

$U = 2$ kV		$U = 3$ kV		$U = 4$ kV		$U = 4,8$ kV	
Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]
0,04	0,50	0,04	0,62	0,04	0,71	0,04	0,77
0,03	0,69	0,03	0,86	0,03	0,98	0,03	1,08
0,02	0,90	0,02	1,11	0,02	1,25	0,02	1,38
0,01	1,11	0,01	1,37	0,01	1,55	0,01	1,68
0,00	1,30	0,00	1,59	0,00	1,81	0,00	1,97

## 6. Výsledky

### Difrakce elektronu

Z průměrů prstenců byly vypočítány střední hodnoty.

Tabulka 3: Střední hodnoty průměru prstence

Napětí $U$ [kV]	$\bar{D}_1$ [mm]	$\bar{D}_2$ [mm]
4	23	38
4,2	23	37,5
4,4	22	37
4,6	20,5	35,5
4,8	19,5	35
3,8	23	40

Vzdálenosti rovin grafitové mřížky lze získat ze vztahu:

$$2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m_e \cdot U}} \quad (2)$$

kde  $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$  C [5],  $m_e = 9,1093837015 \cdot 10^{-31}$  kg [6],  $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$  J · s [7]

úhel  $\vartheta$  lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$\tan(2\vartheta) = \frac{\frac{D}{2}}{l_1 + l_2} \quad (3)$$

kde  $l_1 = L - R$  a  $l_2 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$ .  $L = 135$  mm a  $R = 65$  mm (parametry difrakční trubice).

Tabulka 4: Vzdálenosti mezi rovinami krystalové mřížky grafitu

Napětí $U$ [kV]	$\bar{D}_1$ [mm]	Vzdálenost rovin v grafitu $d_1$ [pm]
4	23	226,53
4,2	23	221,07
4,4	22	225,90
4,6	20,5	237,24
4,8	19,5	244,25
3,8	23	232,42
Napětí $U$ [kV]	$\bar{D}_2$ [mm]	Vzdálenost rovin v grafitu $d_2$ [pm]
4	38	135,92
4,2	37,5	134,47
4,4	37	133,20
4,6	35,5	135,92
4,8	35	135,00
3,8	40	132,28

Výsledné hodnoty vzdáleností rovin v grafitové mřížce jsou určeny jako střední hodnota. Chyba je střední kvadratická odchylka:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4)$$

kterou je nutné vynásobit koeficientem 1,16 z důvodu nízkého počtu měření.

Výsledné hodnoty vzdáleností rovin krystalové mřížky grafitu:

$$d_1 = (231 \pm 4) \text{ pm}$$

$$d_2 = (134,5 \pm 0,7) \text{ pm}$$

### Specifický náboj elektronu

Naměřené proudy v tabulce 2 je nutné vydělit 2 z důvodu paralelního zapojení cívek.

Tabulka 5: hodnoty proudu pro každou cívku

$U = 2 \text{ kV}$		$U = 3 \text{ kV}$		$U = 4 \text{ kV}$		$U = 4,8 \text{ kV}$	
Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]	Ohyb $e$ [m]	Proud $I$ [A]
0,04	0,25	0,04	0,31	0,04	0,36	0,04	0,39
0,03	0,35	0,03	0,43	0,03	0,49	0,03	0,54
0,02	0,45	0,02	0,56	0,02	0,63	0,02	0,69
0,01	0,56	0,01	0,69	0,01	0,78	0,01	0,84
0,00	0,65	0,00	0,80	0,00	0,91	0,00	0,99

Specifický náboj elektronu lze vypočítat pomocí rovnice:

$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot U}{(B \cdot r)^2} \quad (5)$$

kde  $r$  je poloměr ohybu:

$$r = \frac{(80^2 \text{ mm}^2 + e^2)}{\sqrt{2} \cdot (80 \text{ mm} - e)} \quad (6)$$

a intenzita magnetického pole  $B$  je:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N}{R} \cdot I \quad (7)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $N = 320$  je počet závitů a  $R$  je poloměr cívky.

Tabulka 6: Vypočtené hodnoty specifického náboje elektronu

$U = 2 \text{ kV}$			$U = 3 \text{ kV}$		
Ohyb $e \text{ [m]}$	Proud $I \text{ [A]}$	Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}}\right]$	Ohyb $e \text{ [m]}$	Proud $I \text{ [A]}$	Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}}\right]$
0,04	0,245	1,63300E+11	0,04	0,310	1,59307E+11
0,03	0,335	1,60910E+11	0,03	0,415	1,55373E+11
0,02	0,445	1,56959E+11	0,02	0,545	1,54781E+11
0,01	0,540	1,53713E+11	0,01	0,655	1,51358E+11
0,00	0,635	1,50980E+11	0,00	0,765	1,51392E+11
$U = 4 \text{ kV}$			$U = 4,8 \text{ kV}$		
Ohyb $e \text{ [m]}$	Proud $I \text{ [A]}$	Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}}\right]$	Ohyb $e \text{ [m]}$	Proud $I \text{ [A]}$	Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}}\right]$
0,04	0,360	1,61972E+11	0,04	0,385	1,65256E+11
0,03	0,485	1,59536E+11	0,03	0,525	1,57632E+11
0,02	0,625	1,62735E+11	0,02	0,685	1,60223E+11
0,01	0,765	1,57661E+11	0,01	0,830	1,61046E+11
0,00	0,900	1,55769E+11	0,00	0,970	1,57792E+11

Z hodnot v tabulce byla vypočtena výsledná hodnota specifického náboje jak střední hodnota. Chyba je střední kvadratická odchylka – rovnice (4).

Výsledná hodnota specifického náboje elektronu:

$$\frac{q}{m} = (1,58 \pm 0,09) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Nyní lze vypočítat hmotnost elektronu z rovnice:

$$m_e = \frac{e}{\frac{q}{m}} \quad (7)$$

kde  $e$  je elementární náboj.

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty hmotnosti elektronu

Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[ \frac{C}{kg} \right]$	Hmotnost elektronu $m_e$ [kg]	Specifický náboj $\frac{q}{m} \left[ \frac{C}{kg} \right]$	Hmotnost elektronu $m_e$ [kg]
1.63300E+11	9.89168E-31	1.61972E+11	9.81123E-31
1.60910E+11	1.00427E-30	1.59536E+11	9.95697E-31
1.56959E+11	9.84529E-31	1.62735E+11	1.02076E-30
1.53713E+11	1.01622E-30	1.57661E+11	1.04232E-30
1.50980E+11	1.02856E-30	1.55769E+11	1.06118E-30
1.59307E+11	9.69513E-31	1.65256E+11	1.00572E-30
1.55373E+11	1.01640E-30	1.57632E+11	1.03118E-30
1.54781E+11	9.99967E-31	1.60223E+11	1.03513E-30
1.51358E+11	9.94858E-31	1.61046E+11	1.05853E-30
1.51392E+11	1.01537E-30	1.57792E+11	1.05829E-30

Výsledná hodnota hmotnosti elektronu je určena jako střední hodnota a chyba jako střední kvadratická odchylka (4).

Výsledná hodnota hmotnosti elektronu:

$$m_e = (10,15 \pm 0,06) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Všechny uvedené rovnice byly vzaty z Návod k úloze: Elektrony [4] a Chyby měření [3].



## 7. Diskuze

Úkolem bylo určit vzdálenosti rovin v krystalové mřížce grafitu z difrakce elektronů.

Naměřené hodnoty vzdáleností rovin krystalové mřížky grafitu  $d_1 = (231 \pm 4) \text{ pm}$  a  $d_2 = (134,5 \pm 0,7) \text{ pm}$ . Tabulkové hodnoty [9]  $d_1 = 213 \text{ pm}$  a  $d_2 = 123 \text{ pm}$ . Naměřené hodnoty se od tabulkových liší o přibližně 8 %. Chyba mohla vzniknout při měření průměru prstenců, u kterých nebylo možné přesně rozpoznat kde končí kvůli rozptylu na stínítku.

Nejpřesnější výsledek by dalo měření s co nejvyšším urychlovacím napětím a co nejvyšším proudem v Helmholtzových cívkách. S vyšším napětím a proudem působí větší síla na elektrony a ohyb je tak přesnější.

Dalším úkolem bylo určit specifický náboj elektronu a následně i jeho hmotnost. Naměřená hodnota specifického náboje  $\frac{q}{m} = (1,58 \pm 0,09) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$  se od tabulkové hodnoty [6]  $\frac{q}{m} = 1,759 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$  liší o 11 %. Naměřená hodnota hmotnosti elektronu  $m_e = (10,15 \pm 0,06) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  se od tabulkové hodnoty [6]  $m_e = 9,1093837015 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  liší o 10 %. Chybu mohly způsobit cívky, které nebyly pevně přidělané, tudíž jejich osy nebyly úplně kolmé ke směru letu elektronů.

## 8. Závěr

**Výsledné hodnoty vzdáleností rovin krystalové mřížky grafitu:**

$$d_1 = (231 \pm 4) \text{ pm}$$

$$d_2 = (134,5 \pm 0,7) \text{ pm}$$

**Výsledná hodnota specifického náboje elektronu:**

$$\frac{q}{m} = (1,58 \pm 0,09) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

**Výsledná hodnota hmotnosti elektronu:**

$$m_e = (10,15 \pm 0,06) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

## 9. Zdroje

1. **Záhora, J, Lýsková, Š a Jakubec, T.** Difrakce elektronů v krystalech, zobrazení atomů. *Týden vědy na Jaderce*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.]  
<https://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2012/cd/prispevky/sbpdf/difrel.pdf>.
2. Specifický náboj elektronu. *Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.] <http://physics.ujep.cz/~mackova/nabojelektronu.pdf>.
3. Chyby měření. *elearning.jcu.cz*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.]  
[https://elearning.jcu.cz/pluginfile.php/434322/mod\\_resource/content/1/chyby\\_mereni.pdf](https://elearning.jcu.cz/pluginfile.php/434322/mod_resource/content/1/chyby_mereni.pdf).
4. Návod k úloze: Elektrony. *elearning.jcu.cz*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.]  
<https://elearning.jcu.cz/mod/resource/view.php?id=309651>.
5. **Příspěvatelé Wikipedie.** Elementární náboj. *Wikipedie*. [Online] 10. Říjen 2023. [Citace: 7. Listopad 2023.]  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Element%C3%A1rn%C3%AD\\_n%C3%A1boj&oldid=23258504](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Element%C3%A1rn%C3%AD_n%C3%A1boj&oldid=23258504).
6. **Příspěvatelé Wikipedie.** Elektron. *Wikipedie*. [Online] 13. Září 2023. [Citace: 7. Listopad 2023.]  
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektron&oldid=23166575>.
7. **Příspěvatelé Wikipedie.** Planckova konstanta. *Wikipedie*. [Online] 4. Srpen 2023. [Citace: 7. Listopad 2023.] [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Planckova\\_konstanta&oldid=23028290](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Planckova_konstanta&oldid=23028290).
8. **Příspěvatelé Wikipedie.** Permeabilita. *Wikipedie*. [Online] 19. Duben 2023. [Citace: 7. Listopad 2023.] <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Permeabilita&oldid=22716865>.
9. Electron Diffraction v2.1. *THE UNIVERSITY OF NEW MEXICO*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.]  
[http://www.unm.edu/~mph/307/EDiffraction\\_UNM1.pdf](http://www.unm.edu/~mph/307/EDiffraction_UNM1.pdf).