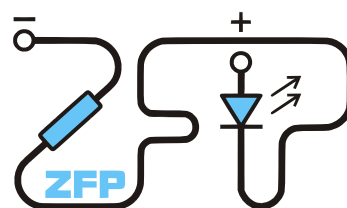


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum IV



### Atomovka



#### Úloha č. A23

**Název úlohy:** Určení měrného náboje elektronu z trajektorie ve zkřížených polích

**Jméno:** Josef Iosephus Kučera

**Datum měření:** 13. 10. 2021

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	1
Výsledky a zpracování měření	0–9	2
Diskuse výsledků	0–4	0,5
Závěr	0–1	0,5
Použitá literatura	0–1	1
<b>Celkem</b>	max. 17	5

Posuzoval: Hanuš

dne: 27/10/21

## Pracovní úkol

1. Pootáčením baňky nastavte elektronový paprsek kolmo k magnetickému poli. Přitom si všimněte, že pokud není elektronový paprsek přesně kolmý k magnetickému poli, tvoří jeho dráha v experimentálním prostoru šroubovici s konstantním stoupáním.
2. Pro celkové urychlovací napětí  $U_c$  elektronového svazku v rozmezí od 150 do 350 V určete magnetizační proudy  $I_m$  potřebné k tomu, aby byl průměr kruhové dráhy svazku 40, 60, 80 a 100 mm. Vhodnou volbou dílčích urychlovacích napětí  $U_1$  a  $U_2$  docilujte co nejlepší fokusaci pozorovaného elektronového svazku. Pro každý průměr dráhy naměřte alespoň 10 hodnot.
3. Sestrojte graf závislosti  $U_c$  na druhé mocnině  $I_m$  pro jednotlivé průměry dráhy svazku. Regresí určete měrný náboj elektronu pro každý průměr dráhy. Diskutujte vliv průměru dráhy svazku na chybu určení  $e/m_e$  s přihlédnutím k nejistotě jejího určení.

## Teorie

### Úvod

Měrným nábojem elektronu  $e/m_e$  rozumíme poměr absolutní hodnoty jeho náboje  $e$  a jeho hmotnosti  $m_e$ . Dnešní užívaná hodnota velikosti elektrického náboje elektronu činí:

$$e = 1,60217733(49) \cdot 10^{-16} \text{ C}$$

### Princip určení $e/m_e$

Aparatura pro studium dráhy elektronového svazku ve zkřížených polích je založena na možnosti sledovat dráhu elektronového svazku ve zředěném plynu (argonu).

Zředěný inertní plyn plní významnou úlohu při fokusaci a zviditelnění elektronového svazku, který se na své dráze sráží s molekulami plynu, ionizuje je a argon při následné rekombinaci vydává luminiscenční záření. Přitom většina pomalých iontů vytváří vlákno podél dráhy elektronového svazku a svým kladným nábojem významně přispívá k jeho fokusaci.

Ve středu baňky jsou na nosnících připevněny příčky. Jejich vzdálenosti od ústí zdroje elektronového svazku jsou 40, 60, 80 a 100 mm a na příčkách jsou nanášeny fluorescenční vrstvy, které při dopadu elektronového paprsku světélkují. A my to pak můžeme pozorovat a jsme šťastní jak blechy.

Díky tomu můžeme měřit u kruhově zakřiveného paprsku vystřelovaného ze zdroje průměr  $d$  jeho dráhy resp. poloměr  $r = d/2$ .

Na elektron, pohybující se rychlostí  $v$  v magnetickém poli s indukcí  $B$  působí síla [1]:

$$\vec{F} = e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Pro úzce zkolimovaný paprsek kolmý na magnetické pole má  $F$  velikost [1]:

$$F = evB \quad (2)$$

Dráha zkolimovaného paprsku dále opisuje kruhovou dráhu o poloměru  $r$  a platí [1]:

$$F = m_e \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

Velikost rychlosti elektronu můžeme vyjádřit ze zákona zachování mechanické energie jako [1]:

$$v = \frac{\sqrt{2eU}}{\sqrt{m_e}} \quad (4)$$

kde  $U$  jest urychlovací napětí přivedené na žhavou katodu. ~~Katoda so hot.~~

Alternativně můžeme vyjádřit rychlost elektronu z rovnic (2) a (3) jako:

$$v = \frac{e}{m_e} Br \quad (5)$$

Porovnáním těchto vzorců pak získáme finální předpis pro měrný elektrický náboj elektronu:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (6)$$

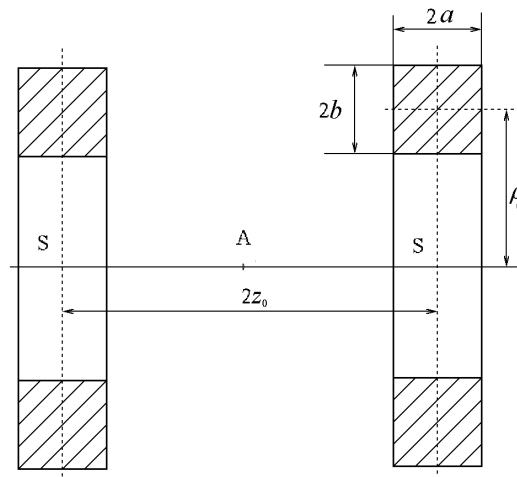
Pro určení specifického náboje elektronu tedy potřebujeme určit urychlující napětí  $U$  potřebné k tomu, aby v magnetickém poli o indukci  $B$  byl poloměr kruhové dráhy elektronového svazku  $r$ .

### ***Vlastnosti zdroje magnetického pole***

Indukci magnetického pole  $B$  vypočítáme dle vzorce

$$B = \frac{8\mu_0}{5\sqrt{5}} \frac{NI_{mag}}{\rho_0} \quad (7)$$

kde  $\mu_0$  jest permeabilita vzduchu (resp. vakua),  $I_{mag}$  je proud protékající cívkou,  $N$  počet závitů u cívky a  $\rho_0$  poloměr vinutí cívky (viz. Obr.1)



**Obr.1: Parametry magnetisačních cívek, přejato z [1]**

### ***Apendix***

$\mu_0$  je známá konstanta,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$N$  známe ze studijního textu,  $N = 154$

$\rho_0$  známe ze studijního textu,  $\rho_0 = 200$  mm

Po vypočítání magnetické indukce  $B$  z naměřeného proudu  $I_{mag}$  jej vyneseme do grafu vůči napětí  $U$  a methodou lineární regrese určíme směrnici této závislosti, což jest náš hledaný měrný elektrický náboj elektronu alias levá strana rovnice (6).

## Výsledky měření

Nastavovali jsme hodnoty napětí v intervalu od 150 do 350 V, se zvoleným rozestupem mezi hodnotami 25 V. Paprsek jsme nastavovali tak, aby protnul vždy jednu příčku ve vzdálenosti 40, 60, 80 nebo 100 mm.

A když zkolimovaný paprsek protnul příčku, tak jsme zapsali hodnotu proudu  $I_{mag}$  procházejícího cívkou a odečteného z ampérmetru.

Z proudu  $I_{mag}$  jsme pak dopočítali hodnotu magnetické indukce  $B$  dle vzorce (7). A pak jsme dopočítali hodnoty  $B^2$ , protože v této mocnině se vyskytuje  $B$  ve vzorci (6), ~~který jest pro naše měření svatým grálem.~~

Hodnoty  $U$ ,  $I_{mag}$ ,  $B^2$  a jsme vynesli pro  $r \in \{40, 60, 80, 100\}$  do následující čtyřtabulky:

r = 40 mm						r = 60 mm					
U [V]	±€ [V]	I [A]	±€ [A]	B <sup>2</sup> [mT <sup>2</sup> ]	±€ [mT <sup>2</sup> ]	U [V]	±€ [V]	I [A]	±€ [A]	B <sup>2</sup> [mT <sup>2</sup> ]	±€ [mT <sup>2</sup> ]
150,00	0,01	2,94	0,51	4,2	0,1	150,00	0,01	1,83	0,50	1,6	0,1
175,00	0,01	3,22	0,51	5,0	0,1	175,00	0,01	2,05	0,51	2,0	0,1
200,00	0,01	3,59	0,51	6,2	0,1	200,00	0,01	2,23	0,51	2,4	0,1
225,00	0,01	3,74	0,51	6,7	0,1	225,00	0,01	2,40	0,51	2,8	0,1
250,00	0,01	3,91	0,51	7,3	0,1	250,00	0,01	2,53	0,51	3,1	0,1
275,00	0,01	4,10	0,51	8,1	0,1	275,00	0,01	2,70	0,51	3,5	0,1
300,00	0,01	4,28	0,51	8,8	0,1	300,00	0,01	2,79	0,51	3,7	0,1
325,00	0,01	4,49	0,51	9,7	0,1	325,00	0,01	2,91	0,51	4,1	0,1
350,00	0,01	4,66	0,51	10,4	0,1	350,00	0,01	3,04	0,51	4,4	0,1

r = 80 mm						r = 100 mm					
U [V]	±€ [V]	I [A]	±€ [A]	B <sup>2</sup> [mT <sup>2</sup> ]	±€ [mT <sup>2</sup> ]	U [V]	±€ [V]	I [A]	±€ [A]	B <sup>2</sup> [mT <sup>2</sup> ]	±€ [mT <sup>2</sup> ]
150,00	0,01	1,34	0,50	0,9	0,1	150,00	0,01	1,04	0,50	0,5	0,1
175,00	0,01	1,50	0,50	1,1	0,1	175,00	0,01	1,18	0,50	0,7	0,1
200,00	0,01	1,63	0,50	1,3	0,1	200,00	0,01	1,29	0,50	0,8	0,1
225,00	0,01	1,73	0,50	1,4	0,1	225,00	0,01	1,37	0,50	0,9	0,1
250,00	0,01	1,87	0,50	1,7	0,1	250,00	0,01	1,48	0,50	1,0	0,1
275,00	0,01	1,98	0,50	1,9	0,1	275,00	0,01	1,56	0,50	1,2	0,1
300,00	0,01	2,06	0,51	2,0	0,1	300,00	0,01	1,63	0,50	1,3	0,1
325,00	0,01	2,15	0,51	2,2	0,1	325,00	0,01	1,71	0,50	1,4	0,1
350,00	0,01	2,24	0,51	2,4	0,1	350,00	0,01	1,77	0,50	1,5	0,1

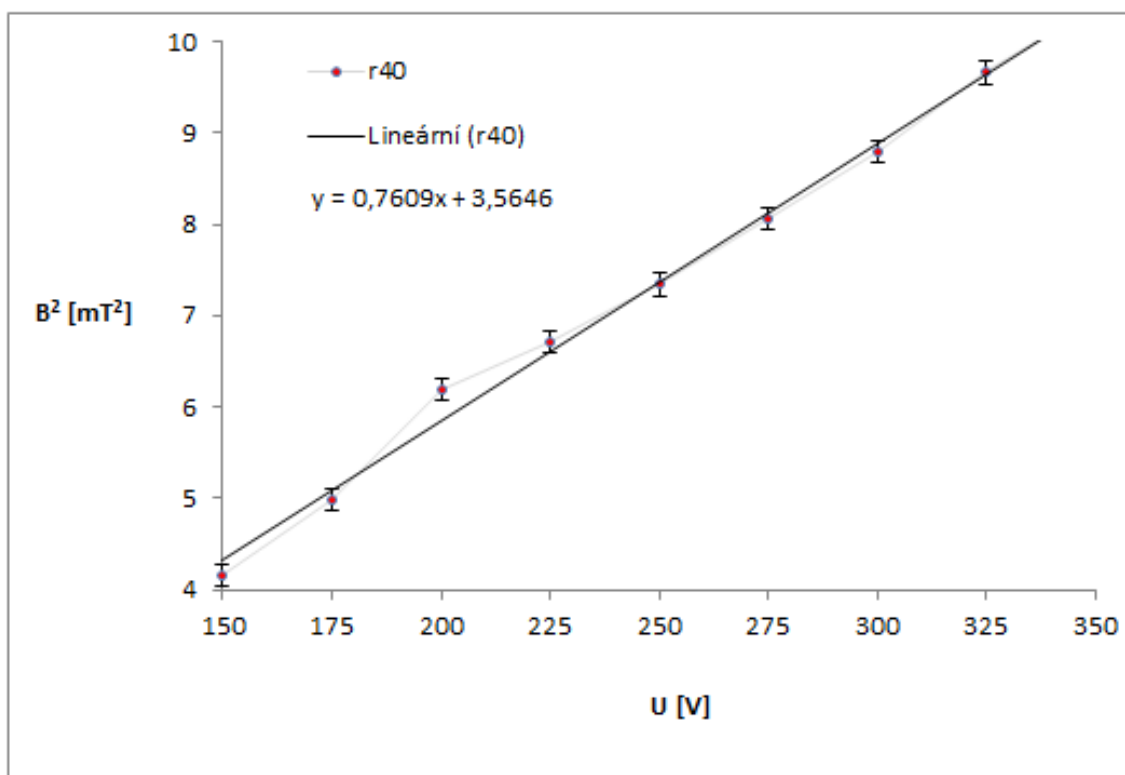
**Tabulka 1: Čtyřtabulka hodnot pro  $r \in \{40, 60, 80, 100\}$**

Chybu napětí  $U$  jsme určili z dat výrobce voltmetru, pro naše měření s rozsahem 1000 V činil chybový rozsah  $(20 + 6)$  ppm.

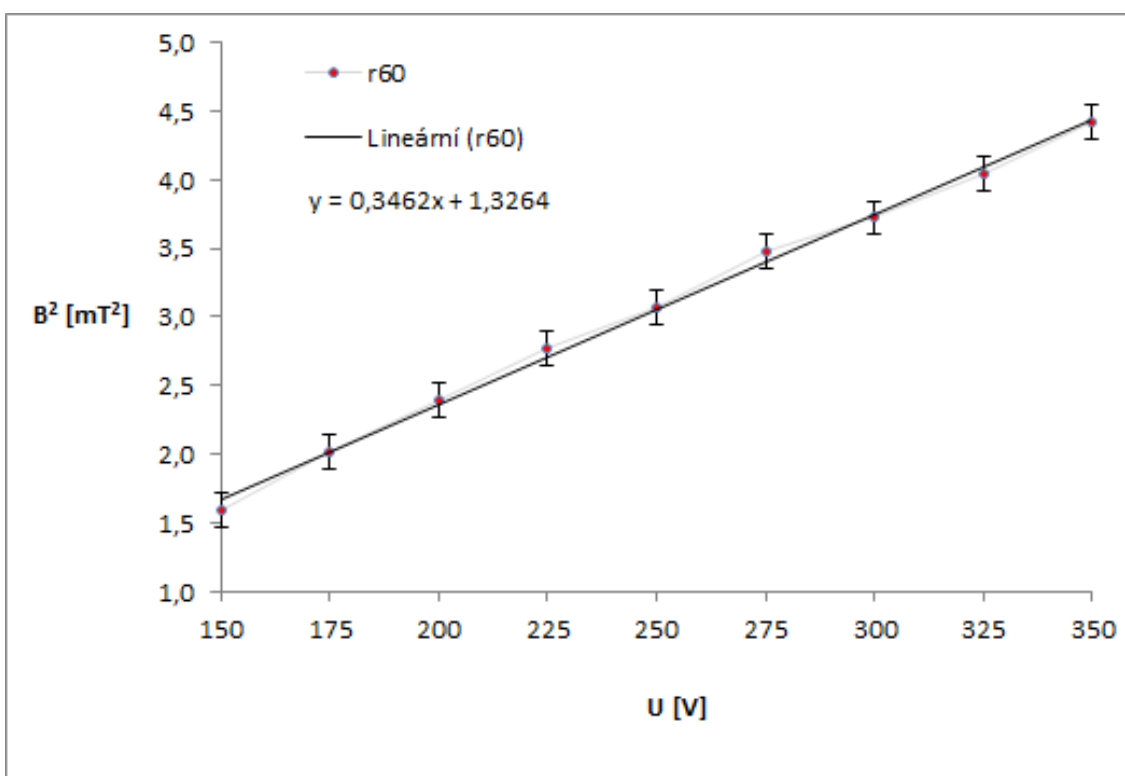
Chybu proudu  $I_{mag}$  jsme určili z dat výrobce ampérmetru, pro naše měření s rozsahem 10A činil chybový rozsah  $0,25\% \times \text{naměřená hodnota} + 0,05 \times \text{rozsah}$ .

Chybu magnetické indukce jsme určili dle vzorečku pro výpočet chyby nepřímého měření (přes parciální derivace, kde k chybě  $B$  počítané dle vzorce (6) přispívá pouze chybový člen proudu  $I_{mag}$ ).

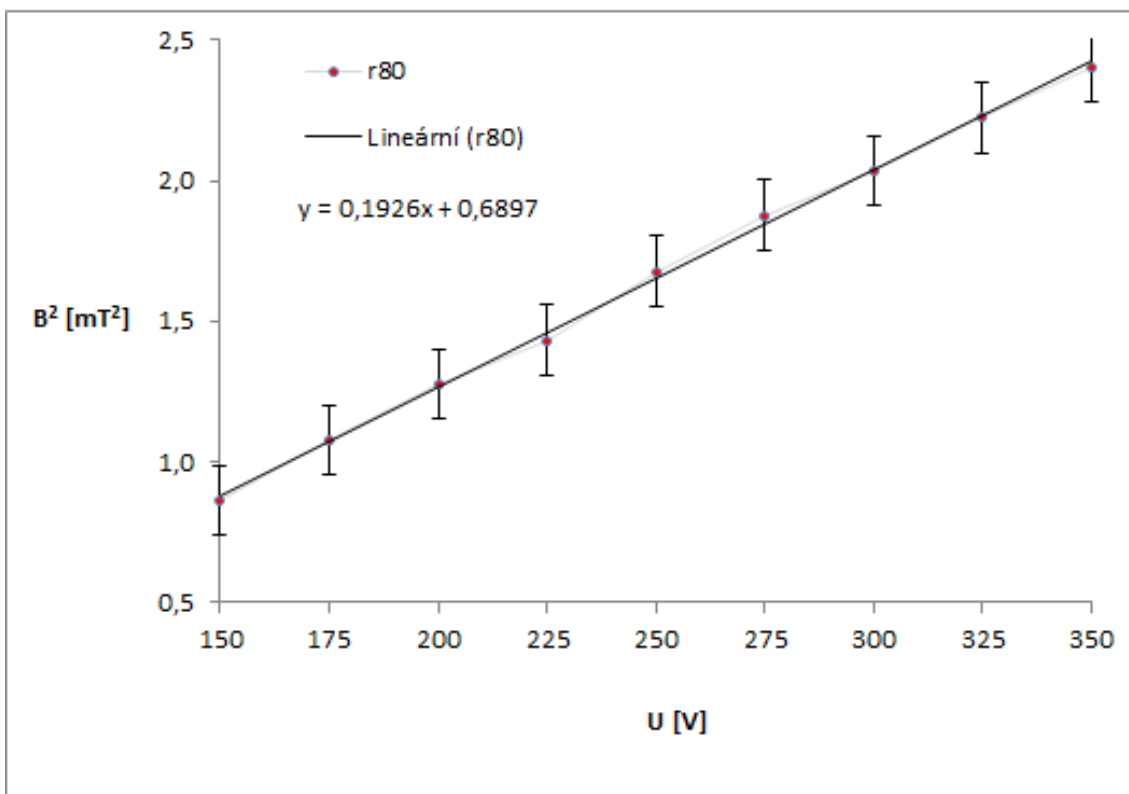
Hodnoty z Tabulky 1 jsme vynesli do následujících 4 grafů:



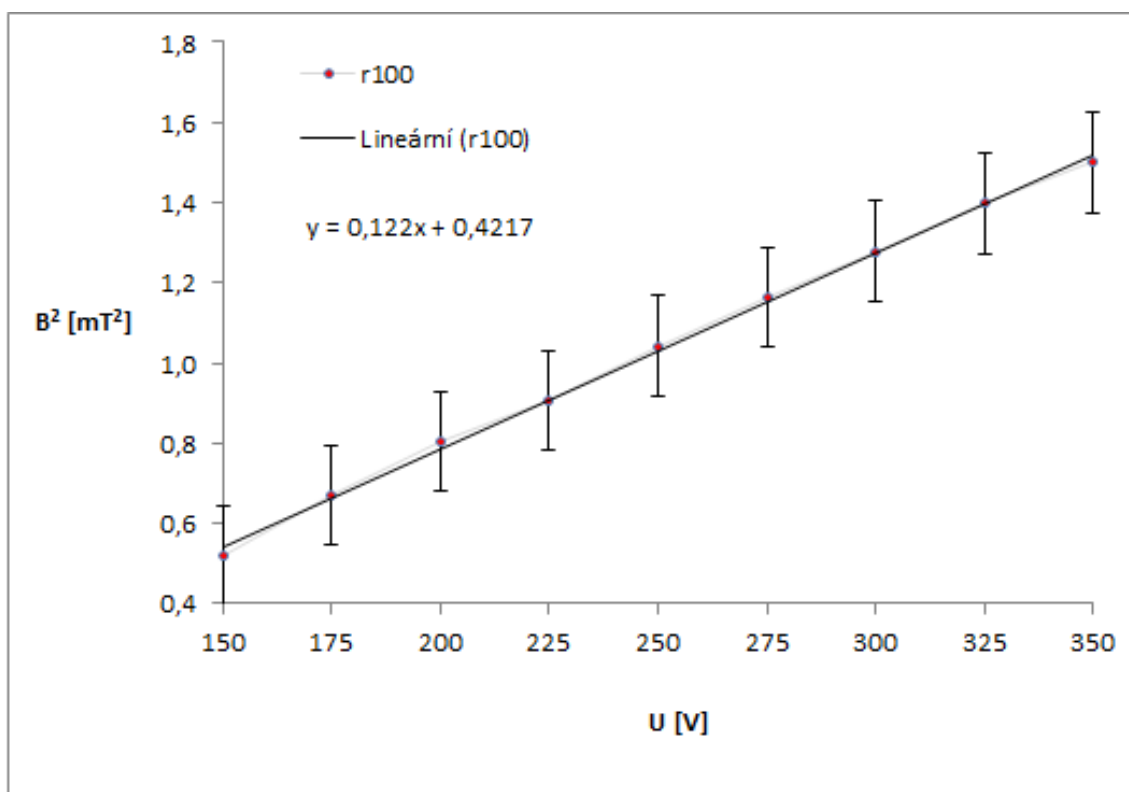
Graf 1: Závislost kvadrátu mag. indukce  $B^2$  na napětí  $U$  pro  $r = 40$  mm



Graf 1: Závislost kvadrátu mag. indukce  $B^2$  na napětí  $U$  pro  $r = 60$  mm



Graf 1: Závislost kvadrátu mag. indukce  $B^2$  na napětí  $U$  pro  $r = 80$  mm



Graf 1: Závislost kvadrátu mag. indukce  $B^2$  na napětí  $U$  pro  $r = 100$  mm

Na všechny grafy 1-4 jsme použili lineární regraci a získali jsme tak směrnice přímk s posunutím, ale posunutí nás zde konkrétně nezajímá. Tedy dostali jsme vlastně vztah  $\frac{B^2}{U}$ . Takže abychom byli v souladu s rovnicí (6) musíme získané hodnoty převrátit.

Výsledné hodnoty uvádíme v tabulce 2:

$B^2/U$	$U/B^2$	$e/m_e$ [C/kg]
7,609E-09	1,31E+08	1,64E+11
3,4622E-09	2,89E+08	1,60E+11
1,9264E-09	5,19E+08	1,62E+11
1,2195E-09	8,20E+08	1,64E+11
		1,63E+11

Tabulka 2: Výsledky měření a jejich aritmetický průměr (žlutě)

## Diskuze

Rešerší na internetu se můžeme dozvědět, že tabulková hodnota pro měrný elektrický náboj elektronu činí [2]:

$$\frac{e}{m_e} = 1,7588047 \cdot 10^{11} C/kg$$

Nám vyšlo zhruba

$$\frac{e}{m_e} = 1,63 \cdot 10^{11} C/kg$$

Takže jsme rozjaření jako slunce v březnu, neboť alespoň řády se nám shodují, když už nic jiného.

Obecně je vidět z grafů a chybových úseček, že měření byla nepřesnější pro vyšší hodnoty  $r$  bylo to způsobeno tím, že paprsek byl zkolimovanější blíže ke zdroji a dále od něj se rozprskával, navzdory heroické snaze kationtů o opak.

Vzdejme jim nyní minutou ticha čest.

Tam vznikala největší chyba!



## Závěr

Experi-mentálně jsme stanovili hodnotu měrného elektrického náboje elektronu jako:

$$\frac{e}{m_e} = 1,63 \cdot 10^{11} C/kg$$

~~za což nám nikdo nezaplatí.~~

## Reference

- [1] [https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_423.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_423.pdf)
- [2] <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2008/cd/prispevky/sbpdf/edm.pdf>