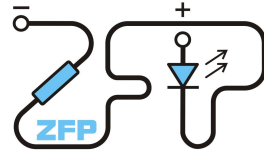


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum ...



Úloha č. ....

Název úlohy: .....

Jméno: ..... Obor: FOF FAF FMUZV

Datum měření: ..... Datum odevzdání: .....

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 3	
Teoretická část	0 - 2	
Výsledky a zpracování měření	0 - 9	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval: .....

dne: .....

# 1 Pracovná úloha

1. Nájdite a preštudujte dostupnú literatúru týkajúcu sa merania rýchlosti svetla.
2. Popíšte a vysvetlite princíp merania rýchlosti svetla metódou rotujúceho zrkadla.
3. Zostavte aparatúru.
4. Zmerajte rýchlosť svetla.

## 2 Historický úvod

### 2.1 Prvé merania

Základným problémom merania rýchlosti svetla je jeho veľká rýchlosť. Ako prvý sa rýchlosť svetla pokúšal merať Galileo Galilei vizuálnym pozorovaním zažínania a zhasínania kahancov medzi kopcami. Výsledok jeho meraní však bol len spodný odhad, nevyučoval, že sa svetlo putuje okamžite nekonečnou rýchlosťou.

Prvé úspešné meranie vykonal v roku 1676 Ole Christensen Rømer z rozdielu medzi pozorovanými a predpovedanými časmi zatmení Jupiterovho mesiaca Io úvahou, že tento rozdiel spôsobuje zmena vzdialenosti od Jupiteru k Zemi, ktorú musí svetlo prekonať. Z meraní vyplývalo, že svetlo urazí priemer zemskej dráhy za asi 22 minút, čo pre dnešnú hodnotu astronomickej jednotky dáva rýchlosť svetla  $c \approx 2,3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [1].

V roku 1729 James Bradley určil rýchlosť svetla z aberácie svetla, ktorú sám ako prvý zmeral. Určil, že na prekonanie astronomickej jednotky svetlo potrebuje 8 minút a 12 sekúnd, t.j.  $c = 3,01 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [2].

### 2.2 Merania v laboratóriu

V laboratórnych podmienkach ako prvý zmeral rýchlosť svetla v roku 1849 Hyppolyte Fizeau. Zdroj svetla bol prerušovaný rotujúcim ozubeným kolesom s premennou rýchlosťou a po odraze od 8 km vzdialeného zrkadla prechádzajúci tým istým miestom. Za čas letu svetla sa ale koleso pootočilo, svetlo teda pri vhodnej frekvencii dopadalo na zub prilahlý medzere, cez ktorú pôvodne prešlo. Z určenia obvodovej rýchlosti kola, veľkosti zubov a vzdialenosti k zrkadlu bol schopný určiť rýchlosť svetla ako  $c = 3,15 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [3].

Inú metódu použil v rokoch 1850 a 1862 Léon Foucault, keď použil rotujúce zrkadlo. Na základni podobnej ako v našom prípade určil rýchlosť svetla ako  $c = 2,98 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Metóda bola neskôr zdokonalená Albertom Michelsonom, ktorý v roku 1926 určil rýchlosť svetla ako  $c = (2,997\,96 \pm 0,000\,04) \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [4]. Princíp merania je popísaný v nasledujúcej kapitole.

### 2.3 Spresňovanie hodnoty a definícia metra

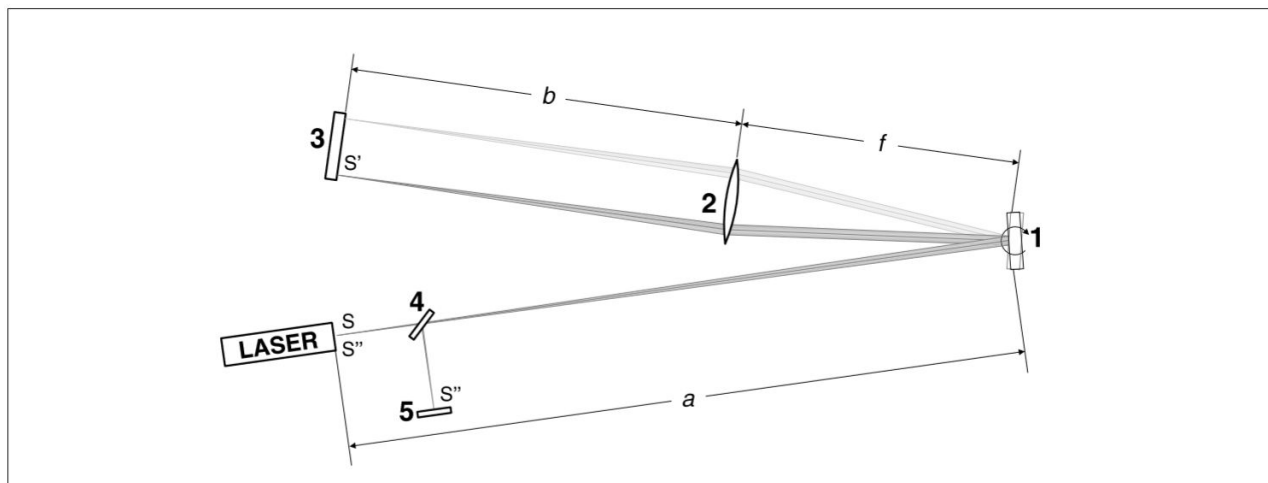
Rýchlosť svetla sa dá určiť nezávisle meraním elektromagnetických konštánt – permitivity  $\varepsilon$  a permeability  $\mu$  vákua, pričom platí  $\mu\varepsilon c^2 = 1$ . To že by sa svetlo malo pohybovať vo vákuu práve touto rýchlosťou plynie z Maxwellových rovníc. Zhoda medzi rýchlosťou svetla určenou z kinematických experimentov a z elektromagnetických konštánt teda ukázala pravú povahu svetla. V roku 1907 E. B. Roas a N. E. Dorsey ako  $c = 2,9961 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [5].

V roku 1950 Louis Essen a A. C. Gordon-Smith určili rýchlosť svetla z merania vlnovej dĺžky a frekvencie stojateho mikrovlnného žiarenia, čím čo do presnosti predčili dovtedajšie merania a dosiahli hodnotu  $c = (2\,997\,925 \pm 30) \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [6].

Pomocou laserovej interferometrie v roku 1972 určila skupina pri US National Bureau of Standards v Boulderi, Colorado rýchlosť svetla ako  $c = (2,997\,924\,562 \pm 0,000\,000\,011) \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [7]. Najväčšiu chybu spôsobovala presná definícia metru, čo malo za následok, že v roku 1983 bol meter definovaný pomocou zafixovanej hodnoty rýchlosti svetla  $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3 Princíp merania a experimentálna zostava

Meranie sme vykonali Foucaultovou metódou rotujúceho zrkadla. Experimentálna zostava je znázornená na obrázku 1. Laserové svetlo prechádza polopriepustným zrkadlom 4 a dopadá na obojstranné rotujúce zrkadlo 1, od ktorého sa odráža a prechádza šošovkou 2. Po odraze od rovinného zrkadla 3 a opätovnom prechode cez šošovku 2 sa odráža od pootočeného zrkadla 1 a polopriepustného zrkadla 4 na matnicu 5. Šošovka ohniskovej vzdialenosti  $f$  je umiestnená tak, aby jej ohnisko ležalo na zrkadle 1 pre maximalizáciu intenzity pozorovaného svetla.



Obrázok 1: Experimentálna zostava, prevzaté[8]

Svetlo medzi jednotlivými odrazmi od zrkadla 1 urazí dráhu  $s = 2(b + f)$ , medzi odrazmi od zrkadla teda uplynie čas  $t = \frac{2(b+f)}{c}$ . Za tento čas sa zrkadlo rotujúce s frekvenciou  $\nu$  otočí o uhol  $\phi = 2\pi\nu t$ . Uhol, o ktorý sa odchýli druhý krát odrazený lúč od prvého dopadajúceho je dvojnásobný, pre malú výchylku  $\Delta l$  stopy na matnici teda máme  $\Delta l = 2\phi a'$ , kde  $a'$  je vzdialenosť matnice od zrkadla 1 pozdĺž lúča. Z toho pre rýchlosť svetla

$$c = \frac{8\pi\nu(f + b)a'}{\Delta l}. \quad (1)$$

Frekvencia rotácie zrkadla  $\nu$  bola meraná pomocou optického čítača snímajúceho odraz od zrkadla ako  $\nu_c = 2\nu$ , keďže zrkadlo je obojstranné. Jednotlivé vzdialenosti boli určené ako:

- ohnisková vzdialenosť šošovky  $f = 500$  cm (uvedené na štítku),
- vzdialenosť šošovky od rotujúceho zrkadla  $f' = (505,5 \pm 0,8)$  cm<sup>1</sup>,
- vzdialenosť zrkadiel 1 a 3  $(f + b) = (12,078 \pm 0,010)$  m<sup>1</sup>,
- vzdialenosť matnice 5 od zrkadla 4  $s = (22 \pm 1)$  cm<sup>2</sup>,
- vzdialenosť výstupu laseru od zrkadla 4  $s' = (15 \pm 1)$  cm<sup>2</sup>,
- vzdialenosť matnice od rotujúceho zrkadla  $a' = (12,15 \pm 0,02)$  m<sup>3</sup>.

Na matnici bola položená stupnica s dielikom o veľkosti 1 mm a nad ňou bol na statíve upevnený telefón, ktorým sme zhotovovali trojicu fotografií pre každú zmeranú frekvenciu rotujúceho zrkadla. Fotoaparát

<sup>1</sup>Laserovým meradlom

<sup>2</sup>Odhad s pomocou pravítka

<sup>3</sup>Dopocítané z  $(f + b)$ ,  $s$ ,  $s'$  a vzájomnej polohy lasera a zrkadla 3

telefónu bol nastavený na manuálny režim. V prvej sade bol expozičný čas 1/1000. To sa ukázalo ako suboptimálne – pretože frekvencia rotujúceho zrkadla bola rádovo podobná, vo fotografiách sme zachytili artefakty, ktoré znemožňovali presné určenie polohy svetlého bodu. V druhej sade bol expozičný čas nastavený na 1/30, čím sa podarilo artefakty odstrániť. Konštantné osvetlenie matnice bolo zaistené lampou umiestenou vedľa statívu, čo zabezpečilo osvetlenie stupnice.

## 4 Spracovanie a výsledky merania

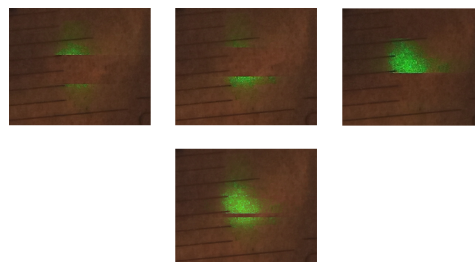
### 4.1 Spracovanie fotografií

Fotografie sme exportovali z telefónu a použili skript, ktorý ich orezal na relevantnú oblasť, vyexportovali z nich intenzitu zelenej zložky<sup>4</sup> jednotlivých pixelov a spoločne s ich súradnicami  $x$  a  $y$  ich uložil do textového súboru. Potom skript zavolał program *gnuplot* a nechal ho vykonať least-squares fit funkcie:

$$f(x, y) = a \exp\left(\frac{-1}{2d^2}\left((x-b)^2 + (y-c)^2\right)\right) + e, \quad (2)$$

kde  $x, y$  sú súradnice pixelu,  $f(x, y)$  je intenzita a  $a, b, c, d, e$  sú parametre fitu. Výsledky fitovania jednotlivých fotiek a im zodpovedajúce frekvencie nájdete v tabuľke 2.

V prípade fotografií z merania 1 sme ešte pred fitovaním vykonali post-processing, aby sme odstránili artefakty príliš krátkej expozície. K tomu bol opäť použitý skript, ktorý tentoraz vzal trojicu fotografií pre danú frekvenciu a vytvoril novú fotografiu tak, že vzal pre každú farbu každého pixelu maximálnu intenzitu z oných troch fotografií, viď obrázok 2. Dáta získané z týchto nových fotografií nájdete v tabuľke 1.



Obrázok 2: Porovnanie pôvodných fot. z merania 1 a procesovanej výslednej fotografie.

Tabuľka 1: Odčítané polohy bodov, časť 1

Meranie 1, proces.					
$f$ [Hz]		$x$ [px]		$y$ [px]	
433,0	±1,0	1422,9	±0,1	654,2	±0,1
467,4	±0,8	1423,4	±0,1	661,7	±0,1
504,5	±0,5	1431,7	±0,2	690,1	±0,2
542,3	±0,5	1424,7	±0,1	685,1	±0,1
578,2	±0,5	1429,0	±0,1	703,6	±0,1
615,7	±0,5	1427,8	±0,1	709,0	±0,1
667,0	±0,5	1429,7	±0,1	720,2	±0,1
700,7	±0,5	1432,9	±0,1	730,9	±0,1
741,5	±0,5	1429,4	±0,1	737,4	±0,1
787,0	±2,0	1433,7	±0,1	746,0	±0,1
786,0	±0,8	1431,7	±0,1	746,0	±0,1
823,9	±0,4	1431,1	±0,1	756,4	±0,1
861,8	±0,5	1433,5	±0,1	765,5	±0,1
898,4	±0,2	1434,4	±0,1	772,2	±0,1

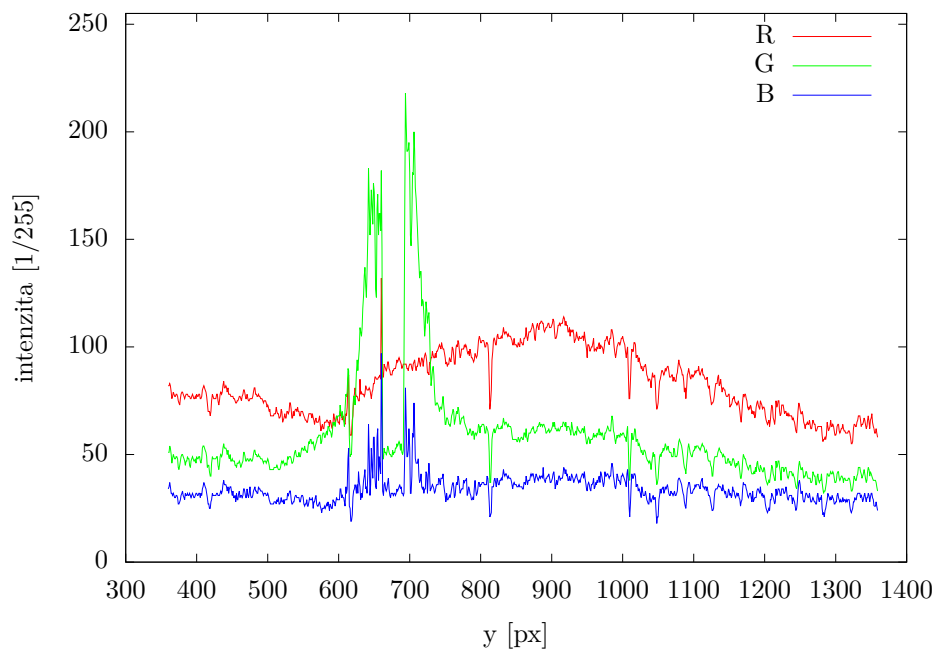
<sup>4</sup>Prečo bola použitá iba zelená zložka je zrejme z grafov 3 a 4 – zatiaľ čo zelená zložka pomerne verne kopíruje tvar peaku, v modrej je poznať predovšetkým zvýšený šum a červená dokonca v oblasti maxima v zelenom kanále poklesne. Tento pokles je pravdepodobne spôsobený automatickým post-processingom fotografií v softvéri telefónu.

Tabuľka 2: Odčítané polohy bodov, časť 2

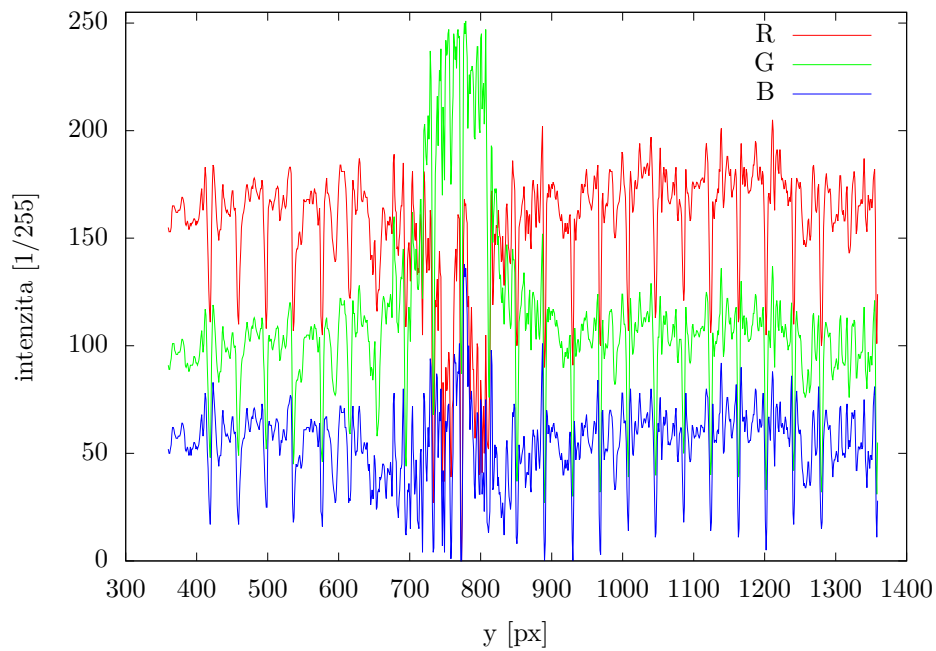
Meranie 1, neproces.			Meranie 2		
$f$ [Hz]	$x$ [px]	$y$ [px]	$f$ [Hz]	$x$ [px]	$y$ [px]
433,0	±1,0	1415,8 ±0,1	631,4	±0,1	565,4 ±0,1
433,0	±1,0	1424,8 ±0,1	657,0	±0,1	566,1 ±0,1
433,0	±1,0	1421,6 ±0,1	652,9	±0,1	561,7 ±0,1
467,4	±0,8	1425,2 ±0,1	663,3	±0,1	770,7 ±0,1
467,4	±0,8	1457,3 ±0,5	720,9	±0,4	771,5 ±0,1
467,4	±0,8	1441,2 ±0,8	722,3	±0,5	771,0 ±0,1
504,5	±0,5	1430,3 ±0,2	737,1	±0,2	762,3 ±0,1
504,5	±0,5	1433,1 ±0,1	711,0	±0,1	762,1 ±0,1
504,5	±0,5	1446,0 ±0,7	744,5	±0,6	761,8 ±0,1
542,3	±0,5	1420,2 ±0,1	675,1	±0,1	756,7 ±0,1
542,3	±0,5	1434,3 ±0,1	729,7	±0,1	755,7 ±0,1
542,3	±0,5	1451,2 ±0,4	682,5	±0,3	755,7 ±0,1
578,2	±0,5	1424,3 ±0,1	685,8	±0,1	746,1 ±0,1
578,2	±0,5	1428,3 ±0,1	713,8	±0,1	747,0 ±0,1
578,2	±0,5	1433,4 ±0,1	725,5	±0,1	746,9 ±0,1
615,7	±0,5	1440,8 ±0,4	752,6	±0,4	739,2 ±0,1
615,7	±0,5	1428,9 ±0,1	710,7	±0,1	739,2 ±0,1
615,7	±0,5	1430,8 ±0,1	723,4	±0,1	739,0 ±0,1
667,0	±0,5	1434,4 ±0,1	735,6	±0,1	731,9 ±0,1
667,0	±0,5	1428,9 ±0,1	718,1	±0,1	731,8 ±0,1
667,0	±0,5	1429,3 ±0,1	722,7	±0,1	732,3 ±0,1
700,7	±0,5	1435,9 ±0,1	748,4	±0,1	724,8 ±0,1
700,7	±0,5	1433,6 ±0,2	736,6	±0,2	725,4 ±0,1
700,7	±0,5	1436,8 ±0,2	721,2	±0,2	724,3 ±0,1
741,5	±0,5	1436,3 ±0,1	757,4	±0,1	716,1 ±0,1
741,5	±0,5	1433,4 ±0,1	748,8	±0,1	716,0 ±0,1
741,5	±0,5	1427,3 ±0,1	734,1	±0,1	716,0 ±0,1
787,0	±2,0	1434,8 ±0,1	750,7	±0,1	708,4 ±0,1
787,0	±2,0	1432,4 ±0,1	736,9	±0,1	708,3 ±0,1
787,0	±2,0	1436,4 ±0,1	753,0	±0,1	707,8 ±0,1
786,0	±0,8	1430,3 ±0,1	743,4	±0,1	700,1 ±0,1
786,0	±0,8	1430,5 ±0,2	737,2	±0,1	699,2 ±0,1
786,0	±0,8	1433,9 ±0,1	752,1	±0,1	699,1 ±0,1
823,9	±0,4	1426,8 ±0,1	746,9	±0,1	691,1 ±0,1
823,9	±0,4	1432,3 ±0,1	745,4	±0,1	690,8 ±0,1
823,9	±0,4	1434,2 ±0,1	765,7	±0,1	690,2 ±0,1
861,8	±0,5	1432,6 ±0,1	764,7	±0,1	685,5 ±0,1
861,8	±0,5	1434,5 ±0,1	768,1	±0,1	685,0 ±0,1
861,8	±0,5	1433,9 ±0,1	766,5	±0,1	686,2 ±0,1
898,4	±0,2	1436,2 ±0,1	772,7	±0,1	676,7 ±0,1
898,4	±0,2	1434,3 ±0,1	774,2	±0,1	676,1 ±0,1
898,4	±0,2	1433,8 ±0,1	769,5	±0,1	677,3 ±0,1
0,0	±0,0	1417,6 ±0,1	565,4	±0,1	
0,0	±0,0	1417,2 ±0,1	566,1	±0,1	
0,0	±0,0	1422,6 ±0,1	561,7	±0,1	
898,4	±0,1	1420,9 ±0,1	770,7	±0,1	
898,4	±0,1	1419,5 ±0,1	771,5	±0,1	
898,4	±0,1	1420,6 ±0,1	771,0	±0,1	
862,8	±0,3	1420,9 ±0,1	762,3	±0,1	
862,8	±0,3	1420,4 ±0,1	762,1	±0,1	
862,8	±0,3	1421,4 ±0,1	761,8	±0,1	
838,4	±0,5	1420,5 ±0,1	756,7	±0,1	
838,4	±0,5	1420,6 ±0,1	755,7	±0,1	
838,4	±0,5	1420,8 ±0,1	755,7	±0,1	
798,7	±0,3	1420,8 ±0,1	746,1	±0,1	
798,7	±0,3	1420,3 ±0,1	747,0	±0,1	
798,7	±0,3	1420,2 ±0,1	746,9	±0,1	
767,9	±0,4	1420,1 ±0,1	739,2	±0,1	
767,9	±0,4	1419,1 ±0,1	739,2	±0,1	
767,9	±0,4	1419,6 ±0,1	739,0	±0,1	
739,1	±1,0	1418,6 ±0,1	731,9	±0,1	
739,1	±1,0	1419,4 ±0,1	731,8	±0,1	
739,1	±1,0	1418,3 ±0,1	732,3	±0,1	
702,7	±0,3	1418,2 ±0,1	724,8	±0,1	
702,7	±0,3	1418,7 ±0,1	725,4	±0,1	
702,7	±0,3	1418,4 ±0,1	724,3	±0,1	
671,1	±1,0	1418,2 ±0,1	716,1	±0,1	
671,1	±1,0	1418,6 ±0,1	716,0	±0,1	
671,1	±1,0	1418,8 ±0,1	716,0	±0,1	
636,8	±0,8	1417,5 ±0,1	708,4	±0,1	
636,8	±0,8	1417,4 ±0,1	708,3	±0,1	
636,8	±0,8	1417,7 ±0,1	707,8	±0,1	
600,2	±0,5	1417,0 ±0,1	700,1	±0,1	
600,2	±0,5	1417,6 ±0,1	699,2	±0,1	
600,2	±0,5	1417,6 ±0,1	699,1	±0,1	
559,7	±1,0	1416,0 ±0,1	691,1	±0,1	
559,7	±1,0	1416,5 ±0,1	690,8	±0,1	
559,7	±1,0	1416,5 ±0,1	690,2	±0,1	
533,5	±0,2	1415,5 ±0,1	685,5	±0,1	
533,5	±0,2	1416,9 ±0,1	685,0	±0,1	
533,5	±0,2	1415,6 ±0,1	686,2	±0,1	
503,3	±0,3	1416,3 ±0,1	676,7	±0,1	
503,3	±0,3	1415,9 ±0,1	676,1	±0,1	
503,3	±0,3	1416,9 ±0,1	677,3	±0,1	

Grafy intenzity jednotlivých farieb na reze typickou fotografiou z merania 1, resp. 2.

Obrázok 3: Rez fotografiou z merania 1



Obrázok 4: Rez fotografiou z merania 2



## 4.2 Kalibrácia dĺžky

Kalibrácia stupnice bola vykonaná tak, že sme z obrázku ručne odčítali súradnice rysiek stupnice na matnici pomocou programu GIMP. Odčítané hodnoty súradníc so zodpovedajúcou skutočnou vzdialenosťou  $d$  sú v tabuľkách 3 a 4. Z týchto dát bola vykonaná lineárna regresia:

$$x(d) = Ad + x_0 \quad (3)$$

$$y(d) = Bd + y_0 \quad (4)$$

Prevodný faktor potom bol

$$D = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (5)$$

a jeho chyba

$$\sigma_D = \frac{1}{D} \sqrt{(A\sigma_A)^2 + (B\sigma_B)^2}. \quad (6)$$

Po dosadení sme získali ( $D_1$  pre 1. meranie,  $D_2$  pre druhé):

$$D_1 = (39,05 \pm 0,02) \text{ px} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (7)$$

$$D_2 = (38,96 \pm 0,01) \text{ px} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (8)$$

Potom sme porovnali presné pozície rysiek medzi obrázkami, aby sme kvantifikovali možné posunutie fotoaparátu. V prvom meraní došlo k priemernému posunu 1,25 px medzi prvou a siedmou fotografií a 0,39 px medzi siedmou a trinástu. V druhom meraní boli posuny 0,78 px a 0,53 px. V oboch prípadoch je teda systematická chyba spôsobená posunom telefónu v rádu 1 px.

Tabuľka 3: Kalibrácia stupnice v meraní 1

Foto 1			Foto 7			Foto 13		
$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]	$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]	$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]
3	1218	557	3	1219	556	3	1223	558
4	1222	594	4	1224	597	4	1225	596
5	1225	636	5	1226	636	5	1228	636
6	1228	672	6	1230	674	6	1233	675
7	1236	712	7	1234	714	7	1234	713
8	1240	751	8	1239	753	8	1238	752
9	1242	790	9	1243	791	9	1242	792
10	1248	828	10	1249	830	10	1248	830
11	1250	868	11	1250	869	11	1251	869
12	1254	907	12	1254	908	12	1254	908
13	1258	946	13	1258	946	13	1256	947
14	1261	984	14	1262	986	14	1260	986
15	1264	1024	15	1266	1026	15	1267	1024
16	1268	1063	16	1269	1064	16	1270	1063
17	1272	1102	17	1274	1102	17	1273	1103
18	1276	1140	18	1276	1140	18	1279	1140
19	1280	1178	19	1281	1179	19	1280	1179
20	1284	1218	20	1284	1218	20	1284	1217

Tabuľka 4: Kalibrácia stupnice v meraní 2

Foto 1			Foto 24			Foto 48		
$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]	$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]	$d$ [mm]	$x$ [px]	$y$ [px]
0	1283	425	0	1284	424	0	1284	425
6	1295	660	6	1296	660	6	1295	660
8	1298	739	8	1296	740	8	1297	739
10	1302	817	10	1302	816	10	1302	818
12	1304	894	12	1305	895	12	1305	895
14	1309	973	14	1306	972	14	1308	973
16	1313	1052	16	1312	1051	16	1312	1051
18	1316	1129	18	1317	1129	18	1317	1129
20	1320	1206	20	1319	1207	20	1319	1207
22	1326	1284	22	1325	1284	22	1324	1284
24	1327	1361	24	1327	1362	24	1326	1362
26	1329	1439	26	1331	1439	26	1329	1439
28	1333	1517	28	1334	1517	28	1332	1517
30	1335	1594	30	1337	1595	30	1335	1595
32	1337	1673	32	1340	1673	32	1338	1672
34	1343	1751	34	1344	1751	34	1343	1751
36	1345	1828	36	1346	1828	36	1345	1828
38	1340	1905	38	1348	1905	38	1349	1906

### 4.3 Regresie

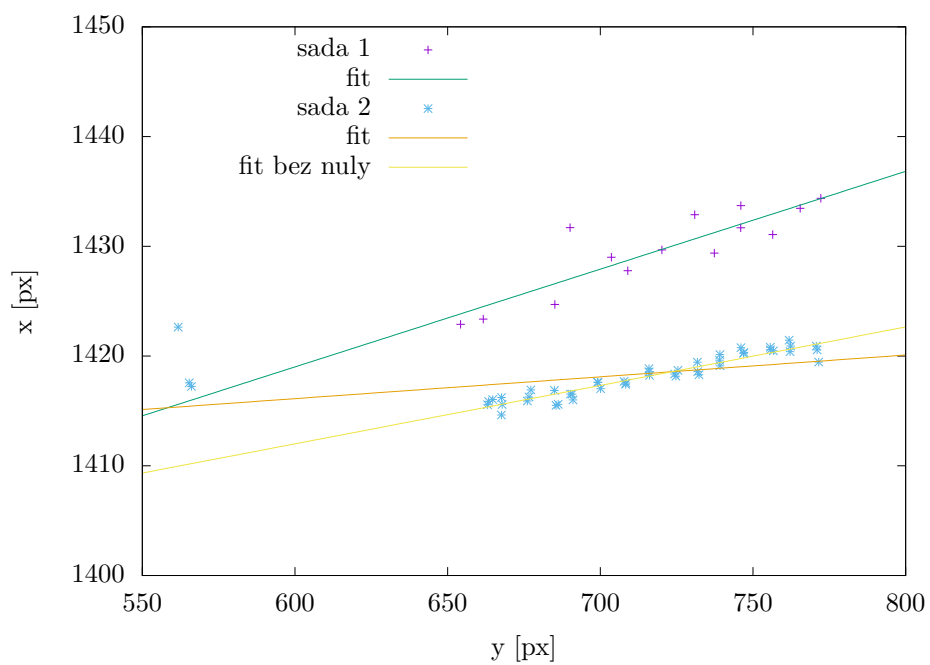
Získané polohy maxim intenzity a príslušné frekvencie zaznamenané na čítači sú uvedené v tabuľkách 1 a 2. Závislosť súradníc (v pixeloch) bola pre obe merania vynesená do grafu a preložená priamkou 5. V druhej sade meraní bolo zahrnuté aj meranie v nule, ktoré však v závislosti súradníc neleží na spoločnej priamke, čo je spôsobené posunom v x-ovom smere spôsobené asymetrickým flare-om v x-ovom smere (viď obrázok 7), preto bola priamkou preložená aj závislosť bez tohto bodu. Získané boli hodnoty koeficientov závislosti  $x = ay + b$  uvedené v tabuľke 5. Následne bola vynesená a priamkou preložená závislosť y-ovej súradnice a frekvencie pre obe sady meraní 6. Získané hodnoty koeficientov závislosti  $y = Av_c + B$  sú uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka 5: Regresné parametre

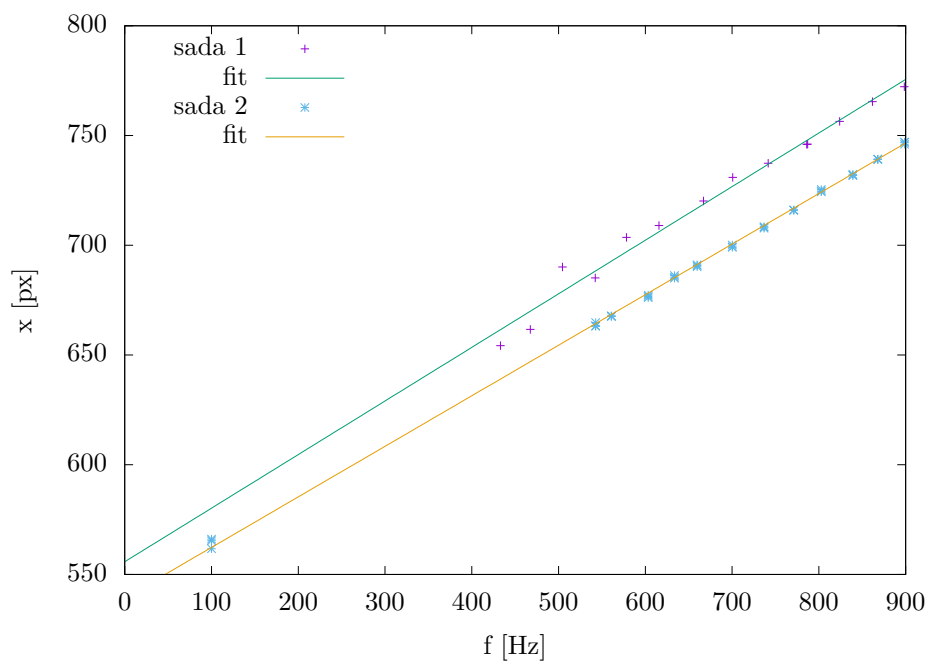
	$x = ay + b$	$y = Av_c + B$
1. sada meraní	$a = 0,089 \pm 0,014$ $b = (1365 \pm 10) \text{ px}$	$A = (0,212 \pm 0,010) \text{ px} \cdot \text{s}$ $B = (580 \pm 6) \text{ px}$
2. sada meraní	$a = 0,020 \pm 0,005$ $b = (1404 \pm 4) \text{ px}$	$A = (0,2344 \pm 0,0019) \text{ px} \cdot \text{s}$ $B = (559,1 \pm 1,3) \text{ px}$
s vylúčením bodu	$a = 0,053 \pm 0,003$ $b = (1380 \pm 2) \text{ px}$	



Obrázok 5: Fit prímky na ktoré leží body



Obrázok 6: Fit závislosti na frekvencii



#### 4.4 Určenie $c$

Z určených regresných parametrov môžeme určiť podiel  $\frac{\nu_c}{\Delta l}$  v jednotkách  $s^{-1} \cdot px^{-1}$ .

$$\frac{\nu_c}{\Delta l} = \frac{\nu_c}{\Delta y} \frac{\Delta y}{\Delta l} = \frac{1}{A} \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} = \frac{1}{A\sqrt{1+a^2}}. \quad (9)$$

Prevod na zvyčajné jednotky uskutočníme pomocou kalibračného faktoru  $D$  ako

$$\frac{\nu_c}{\Delta l} = \frac{1}{A\sqrt{1+a^2}} D. \quad (10)$$

Po dosadení do vzťahu 1 dostávame pre rýchlosť vzťah

$$c = \frac{4\pi(f+b)a'}{A\sqrt{1+a^2}} D. \quad (11)$$

Pre chybu určenia rýchlosti svetla z toho máme

$$\sigma_c = c \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{(f+b)}}{(f+b)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a'}}{a'}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{a\sigma_a}{1+a^2}\right)^2}. \quad (12)$$

Po dosadení nám vychádzajú hodnoty

$$c = (338 \pm 15) \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13)$$

pre prvé meranie a

$$c = (307 \pm 3) \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14)$$

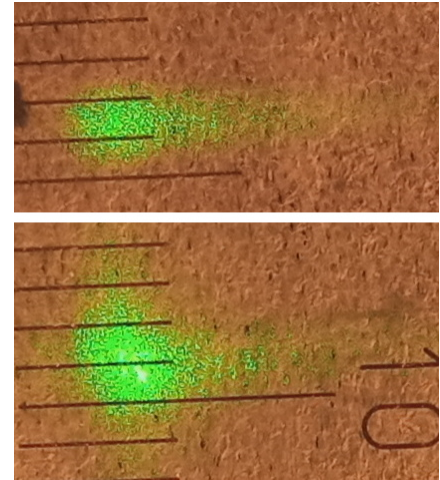
pre druhé.

## 5 Diskusia výsledkov

Pretože je celá použitá aparátúra citlivá na jemné posuny, mohlo byť meranie ovplyvnené deformáciou podlahy. Toto sme sa snažili minimalizovať tým, že počas merania sme stáli na jednom mieste. Vo všeobecnosti by tento jav spôsobil náhodné zmeny v posunutí stopy laseru na matnici, čo by hodnotu určenej rýchlosti svetla nemalo systematicky ovplyvniť, keďže je určená zo smernice závislosti.

Pri meraní bol pozorovaný viacnásobný odraz laserového zväzku medzi zrkadlami, čo malo za následok už spomínaný flare v meraní so statickým zrkadlom. Celá prvá sada meraní je znehodnotená príliš krátkym expozičným časom, pozorované stopy obsahovali defekty, ktoré ovplyvnili ďalšie spracovanie. Použitie fotografií môže mať nepríjemný dôsledok v podobe zkrasenia poľa, tento jav sme dokázali kvantifikovať pomocou premerania rôznych vzdialeností pri kalibrácii aspoň v jednom smere ako chybu určenia faktoru  $D$ .

V získaných závislostiach môžeme z grafického znázornenie súradníc polohy stopy vidieť, že prvá sada má z už spomínaných dôvodov veľkú štatistickú odchýlku od regresnej priamky, prvá sada sedí na priamke lepšie, s výnimkou merania pri statickom zrkadle. Túto odchýlku spôsobil už spomenutý flare na fotografii. V grafoch nevynášame chybové úsečky, chyby určenia z regresie sú približne 0,1 px, posunutie medzi jednotlivými snímkami je do približne 1 px. V závislosti frekvencie a y-ovej súradnice opäť vidíme vyššiu štatistickú chybu prvej sady meraní, druhá sada regresnej priamke dobre odpovedá. Meranie pre statické zrkadlo sme pri regresii použili tiež, z fotografie predpokladáme, že posun určenia polohy stopy nastal len v x-ovom smere.



Obrázok 7: Flare pozorovaný na dvoch rôznych fotografiách

Chyba, ktorú sa nám nepodarilo kvantifikovať, bola systematická chyba určenie stredu svetlých bodov. Hoci súčasťou výstupu programu gnuplot bola odhadovaná chyba parametrov, táto chyba bola určená za predpokladu, že intenzita v závislosti na polohe tvorí Gaussovu krivku. Je zrejmé, že niektoré predpoklady (napríklad stredová symetria) naplnené neboli. Chyba, ktorú uvádzal gnuplot (rádovo 0,1 px) bude teda výrazne podhodnotená, chyba výsledné hodnoty  $c$  bude preto vyššia, než akú uvádzame. Skutočnú chybu by bolo možné kvantifikovať tak, že by sme fit vykonali všeobecnejší krivkou, prípadne rôznymi druhmi kriviek, toto však nebolo vykonané z dôvodu výpočtovej náročnosti.

## 6 Záver

Určili sme rýchlosť svetla metódou rotujúceho zrkadla ako

$$c = (307 \pm 3) \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

, tedy o 2,4% (tj. o dve a pôl smerodatné odchyľky) väčšia ako v skutočnosti.

## Použitá literatúra

- [1] *A Demonstration Concerning the Motion of Light, Communicated from Paris, in the Journal Des Scavans, and Here Made English.* Philosophical Transactions (1665-1678), vol. 12, 1677, strany 893–894, dostupné online [www.jstor.org/stable/101779](http://www.jstor.org/stable/101779), 25.5.2019
- [2] Bradley, J.: *A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars.*, Philosophical Transactions (1683-1775), vol. 35, 1727, strany 637–661. dostupné online [www.jstor.org/stable/103725](http://www.jstor.org/stable/103725), 25.5.2019
- [3] Fizeau, H.: *Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière.* Comptes Rendus Acad. Sci., Paris, 1849, strany 90-92  
skeny dostupné online <https://skullsinthestars.com/2008/03/31/fizeaus-experiment-the-original-paper/>, 25.5.2019
- [4] Michelson, A. A.: *Measurement of the Velocity of Light Between Mount Wilson and Mount San Antonio*, Astrophysical Journal, vol. 65, jan, 1927,  
dostupné online <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1927ApJ....65....1M>, 25.5.2019
- [5] Rosa, E. B. and Dorsey, N. E. *The Ratio of the Electromagnetic and Electrostatic Units*, Physics Review Letters (Series I), vol. 22, iss. 6, Jun 1906, strany 367-368,  
dostupné online <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSeriesI.22.367>, 25.5.2019
- [6] Essen, L. *The Velocity of Propagation of Electromagnetic Waves Derived from the Resonant Frequencies of a Cylindrical Cavity Resonator*, Proceedings of the Royal Society of London Series A, vol. 204, Dec 1950, strany 260-277  
dostupné online <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1950RSPSA.204..260E>, 25.5.2019
- [7] Evenson, K. M. at al.: *Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser* Physics Review Letters, vol. 29, iss 19, Nov 1972, strany 1346-1349  
dostupné online <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.29.1346>, 25.5.2019
- [8] *Determining the velocity of light by means of the rotating-mirror method according to Foucault and Michelson*, LD Physics Leaflets, P5.6.1.1, LD DIDACTIC GmbH,  
dostupné online [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p5/p5611\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p5/p5611_e.pdf), 25.5.2019