

1 Pracovní úkoly

1. Pomocí fotometrického luxmetru okalibrujte normální žárovku (stanovte její svítivost). Pro určení svítivosti normální žárovky (a její chyby) vynesete do grafu závislost osvětlení na převrácené hodnotě kvadrátu vzdálenosti luxmetru od žárovky a provedte lineární regresi.
2. Lummerovým - Brodhunovým fotometrem proměřte fotometrické diagramy žárovky 12 V/35 W v horizontální i vertikální rovině. Jako normál použijte žárovku okalibrovanou v bodě 1. Naměřené výsledky zpracujte graficky. V grafu vyznačte chyby nepřímého měření.
3. Lummerovým - Brodhunovým fotometrem změřte směrovou závislost svítivosti plošného zdroje světla a ověřte platnost Lambertova zákona. Stanovte jas zdroje s relativní chybou výsledku.

2 Teoretický úvod

Vycházím se studijního textu k fyzikálnímu praktiku [1]. Existují různé možnosti, jak měřit svítivost J světelných zdrojů. Jednak můžeme použít objektivní metody, ale také můžeme použít metody subjektivní.

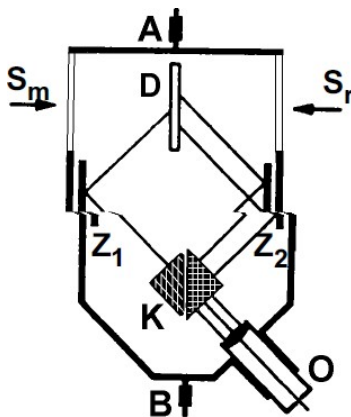
Objektivní metodou je například využití luxmetru, který funguje tak, že převádí dopadající světelný tok na fotodiodu na elektrický proud. Měří tak osvětlení E v luxech. Pro zjištění svítivosti využijeme vztahu

$$J = Er^2, \quad (1)$$

kde r je vzdálenost zdroje záření od luxmetru.

Subjektivní metody jsou založené na srovnávání zdroje se známou svítivostí a porovnávání s neznámým zdrojem, přičemž je měněna alespoň jedna vzdálenost od stínítka, na kterém srovnání probíhá. Za tímto účelem se používá například Lummerův–Brodhunův fotometr. Porovnávání probíhá okem a je tedy ovlivněno subjektivním vnímáním osvětlené pozorovatelem. Pokud se nastaví taková vzdálenost a mezi normálem (zdrojem se známou svítivostí J) a fotometrem a vzdálenost b mezi fotometrem a měřeným objektem, tak pro svítivost měřeného zdroje J' platí

$$J' = \frac{b^2}{a^2} J. \quad (2)$$



Obrázek 1: Schema Lummerova–Brodhunova fotometru, převzato z [2]

Pro svítivost plošných zdrojů platí Lambertův zákon

$$J = J_0 \cos \vartheta. \quad (3)$$

Právě pro tento vztah se zářiče, pro které platí, nazývají kosinové zářiče. Jas plošného zdroje je pak dán jako

$$B = \frac{J}{S \cos \vartheta}, \quad (4)$$

kde S je plocha zdroje. Jas tedy pak není závislý na směru a platí pro něj

$$B = \frac{J_0}{S}. \quad (5)$$

Fotometrický diagram je vlastně svítivost zdroje v závislosti na směru.

3 Měření

3.1 Kalibrace normálové žárovky

Nejprve byla proměřena závislost osvětlení na vzdálenosti žárovky od luxmetru za účelem určení svítivosti žárovky, která pak v dalších měřeních posloužila jako normál. Naměřené hodnoty osvětlení jsou v tabulce č. 1 a jsou pak graficky zpracovávána v grafech 2 a 3. Chybu určení osvětlení u jednotlivých měření σ_E jsem odhadl jako $1\% + 2 \text{ lx}$. Chyby určených vzdáleností za předpokladu, že zdroje a optické prvky jsou přesně nad místy upevnění nad optickou lištou, odhaduji na 1 mm.

Provedl jsem jednak lineární regresi v grafickém zpracování obr. č. 3, ale vzhledem k tomu, že proložená přímka neprochází dobře počátkem (a navíc proložená přímka zcela dobře neodpovídá datům), tak jsem se rozhodl proložit graf 2 funkcí

$$E(r) = \frac{J}{(r - r_0)^2}, \quad (6)$$

kde r_0 fyzikálně odpovídá špatně určené vzdálenosti mezi zdrojem a luxmetrem. Výsledné hodnoty fitu jsou $J = (32,9 \pm 0,8) \text{ lx}$ a $r_0 = (1,50 \pm 0,12) \text{ cm}$, pokud vyjdeme ze statistických chyb. Pokud započteme i chybu luxmetru, pak vychází

$$J = (32,9 \pm 2,5) \text{ lx}.$$

Z hodnoty, kde r_0 je přibližně 1,5 cm a ze statistické chyby určení J můžeme usuzovat, že jsem opravdu nejspíše určil nesprávně hodnotu vzdálenosti mezi luxmetrem a zdrojem, když jsem předpokládal, že vzdálenost je přesně určena polohou předmětů na optické liště.

3.2 Fotometrické diagramy žárovky

Pro měření fotometrických diagramů a posléze i ověření Lambertova zákona byl využit fotometr. Pro minimalizaci chyby bylo měření pro každé nastavení úhlu žárovky provedeno dvakrát - pro fotometr natočený v jednom smyslu a posléze otočený o 180° , kde se prohodily zdroj a měřený objekt.

Pro měření fotometrického diagramu v horizontální rovině byla využita žárovka na napětí 12 V. Naměřená data pro horizontální fotometrický diagram jsou v tabulce 2 a graficky je pak fotometrický diagram v obr. č. 4. Vzdálenost a byla pro toto měření $a = 40 \text{ cm}$.

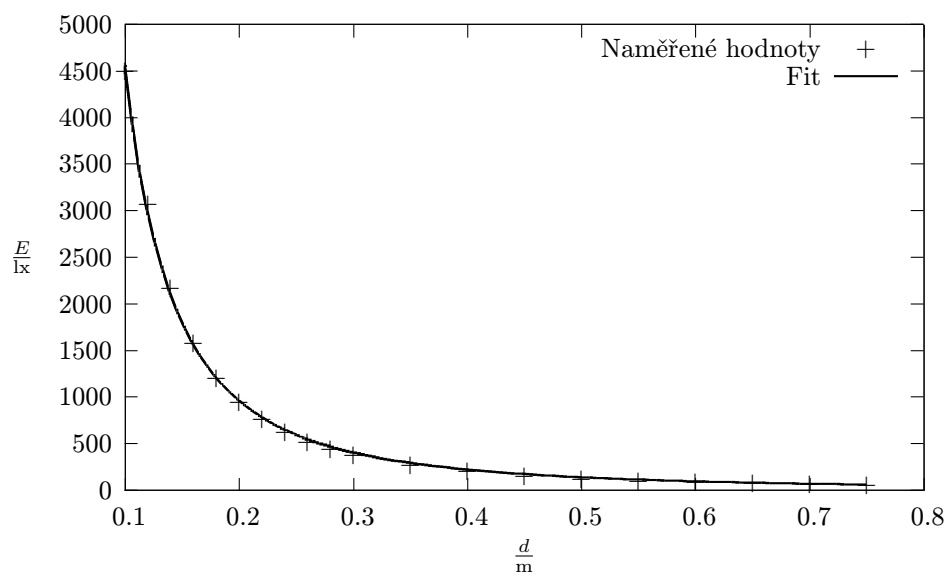
Pro měření v horizontální rovině byla žárovka nastavena tak, že při úhlu 0° byla vlákna vůči fotometru v zákrytu. A na fotometrickém diagramu opravdu pozorujeme jev, který je dobře známý u zákrytových dvojhvězd - pokles naměřeného osvětlení v okamžiku, kdy se takto hvězdy, či v našem případě vlákna, zakrývají.

Pro měření vertikálního fotometrického diagramu pak byla využita jiná žárovka, která měla maximální doporučené napětí 8 V, při kterém také probíhalo měření. Naměřené hodnoty jsou v tabulce č. 3 a graficky znázorněny jsou v obr. č. 5. Vzdálenost a byla pro toto měření $a = 60 \text{ cm}$.

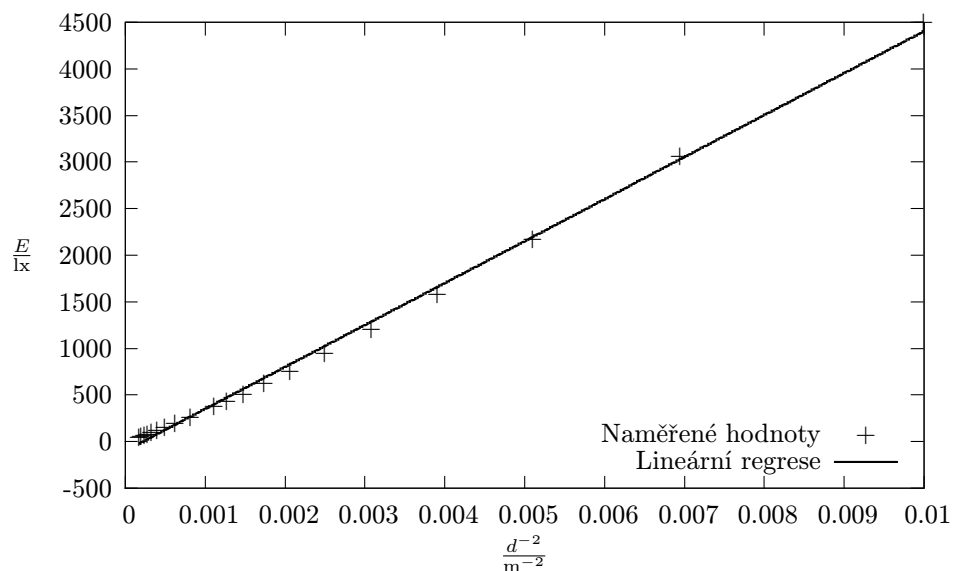
Na fotometrickém diagramu se v tomto případě nejspíše hlavně projevuje to, že mechanismus, díky kterému se může žárovka otáčet v horizontální rovině, způsobuje stínění v oblasti okrajů proměřené oblasti.

Tabulka 1: Naměřené data pro kalibraci normálové žárovky

r/cm	E/lx	σ_E/lx
10	4500	47
12	3060	33
14	2170	24
16	1580	18
18	1200	14
20	940	11
22	760	10
24	618	8
26	509	7
28	430	6
30	369	6
35	264	5
40	197	4
45	153	4
50	118	3
55	97	3
60	80	3
65	68	3
70	58,6	3
75	50,8	3



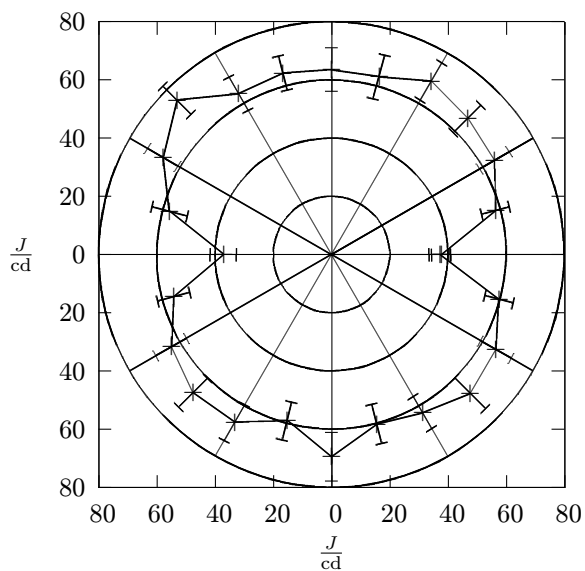
Obrázek 2: Graf závislosti osvětlení na vzdálenosti luxmetru od zdroje záření



Obrázek 3: Graf závislosti osvětlení na převrácené hodnotě čtverce vzdálenosti luxmetru od zdroje záření

Tabulka 2: Měření svítivosti žárovky v horizontální rovině

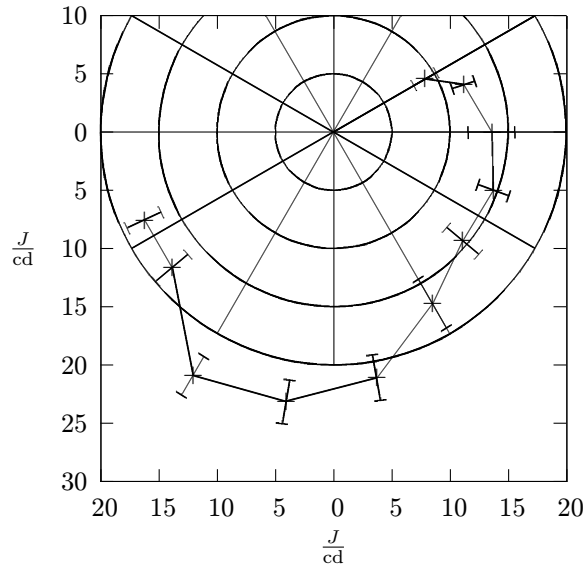
$\alpha/^\circ$	b_1/cm	b_2/cm	J'/cd
0	41,8	44,0	37,8
15	52,3	54,3	58,4
30	54,8	57,5	64,8
45	54,8	58,6	66,1
60	55,6	60,0	68,7
75	52,9	58,1	63,3
90	53,1	58,0	63,5
105	54,5	57,5	64,5
120	53,6	57,7	63,7
135	58,8	62,0	75,0
150	55,6	58,4	66,8
165	50,9	54,9	57,5
180	40,4	44,4	37,0
195	50,4	53,9	55,9
210	53,9	57,2	63,5
225	55,1	59,1	67,0
240	54,8	58,9	66,5
255	51,3	55,8	59,0
270	55,5	60,8	69,5
285	51,8	56,4	60,2
300	53,4	57,0	62,7
315	55,0	59,5	67,4
330	54,8	57,9	65,3
345	52,9	54,9	59,7
360	41,3	43,9	37,3



Obrázek 4: Fotometrický diagram žárovky v horizontální rovině

Tabulka 3: Měření svítivosti žárovky ve vertikální rovině

$\beta/^\circ$	b_1/cm	b_2/cm	J'/cd
0	36,2	40,9	13,6
20	35,3	36,9	11,9
30	30,1	32,9	9,1
-20	38,8	41,2	14,6
-40	37,8	41,8	14,5
-60	40,6	45,6	17,0
-80	47,0	49,8	21,4
-100	51,6	49,8	23,5
-120	50,9	51,8	24,1
-140	43,1	46,0	18,1
-155	43,2	45,2	17,9



Obrázek 5: Fotometrický diagram žárovky ve vertikální rovině

3.3 Ověření Lambertova zákona

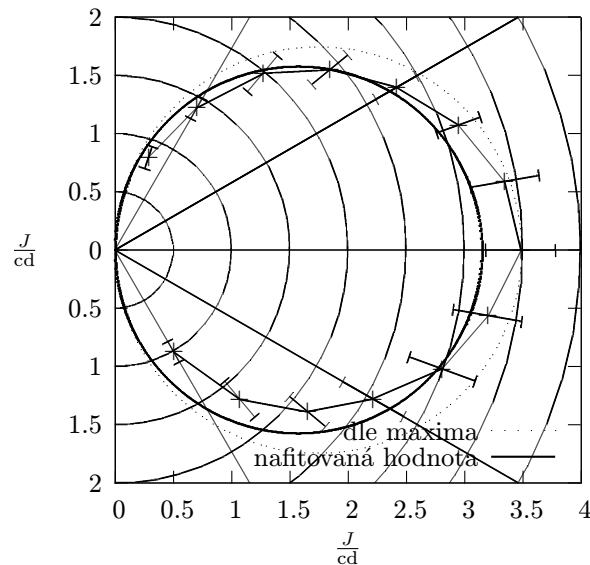
Posledním úkolem bylo ověřit Lambertův zákon pro plošný zářič. Za tímto účelem byla užito optický prvek, kde byla žárovka a před ní rozptylka - tím vznikl náš zářič, který měl mít velice dobře odpovídající charakteristiku plošnému zářiči. Tímto plošným zářičem jsem otáčel po 10° , přičemž jsem proměřil úhly od -60° do 70° . Vzdálenost a byla pro toto měření $a = 80$ cm. Plošný zdroj měl průměr $d = (2,80 \pm 0,05)$ cm. Plocha zdroje pak byla $S = \pi d^2/4$.

Naměřená data jsou v tabulce 4. Graficky zpracovaná data jsou v grafu 6. První teoretická křivka, která je v grafu 4 je určena naměřenou hodnotou při nastavení úhlu 0° , kdy byla hodnota mezi naměřenými nejvyšší a která by tak měla odpovídat hodnotě J_0 z teoretického vztahu pro kosinový zářič. Je vidět, že teoretická předpověď zcela neodpovídá. To je nejspíš způsobeno geometrií měření, kdy nejsou všechny prvky na optické ose a při otáčení nejspíš dochází i ke změně vzdálenosti mezi zdrojem a fotometrem. Je zde proto i druhá křivka, která je fitovaná na všechny hodnoty a i když je blíže naměřeným hodnotám, tak zcela bezesporně závislost $J(t) = J_0 \cos \vartheta$ neověřuje. Ale díky tomu, že odpovídá v rámci chyby měření lépe, tak hodnotu jasu určuji na základě tohoto proložení.

$$B = (5110 \pm 540) \text{ cd m}^{-2}$$

Tabulka 4: Data pro fotometrický diagram plošného zářiče

$\vartheta/^\circ$	b_1/cm	b_2/cm	J/cd
70	12,3	13,4	0,85
60	16,0	17,1	1,41
50	19,1	20,2	1,98
40	21,0	22,3	2,41
30	22,8	23,8	2,79
20	24,4	25,0	3,14
10	24,9	26,5	3,40
0	25,3	26,8	3,49
-10	24,4	25,9	3,25
-20	23,3	24,9	2,99
-30	21,4	23,2	2,56
-40	19,8	21,2	2,16
-50	17,1	19,0	1,67
-60	13,6	14,4	1,01



Obrázek 6: Fotometrický diagram plošného zářiče

4 Diskuse

Všechna měření byla zatížena chybou způsobenou nepřesným nastavením přístrojů na optické liště. Sice bylo mou snahou nastavit je co nejoptimálněji do jedné přímky, ale to se mi úplně zcela nepodařilo. Navíc mezi jednotlivými měřeními jsem musel obracet fotometr, přičemž mohlo docházet k jemným pohybům fotometru a mohla mi tak vzniknout o to větší chyba měření. Při otáčení zdrojů na optických prvcích se také mohlo stát, že se měnila i vzdálenost od zdroje. Těmto chybám bych přisuzoval to, že se mi nepodařilo zcela přesvědčivě ověřit Lambertův zákon.

Největší chyba měření ovšem je v subjektivním určování svítivosti srovnáváním světelnosti dvou zdrojů. Jednak už z názvu a metody je vidět, že se jedná o metodu subjektivní a nedostáváme z ní tvrdá přesná data. Navíc různé zdroje záření mají různé spektrální složení, což má neblahý důsledek na určování svítivosti v tom, že pozorovatel musí srovnat principiálně prakticky nesrovnatelné odstíny na stínítku.

Dalším faktorem, který mohl mít na měření vliv, je to, že zdroje nejsou ideálně bodové, či ideálně plošné, ale jsou ve skutečnosti komplikovaněji rozmístěny v prostoru, takže vzdálenost od zdroje není zcela dobře definovaný pojem.

Během měření jsem si také dvakrát povšiml náhlé změny svítivosti žárovky, která byla nejspíše způsobena tím, že zdroj napětí žárovky nebyl stabilizovaný a napětí v elektrické síti kolísalo v průběhu měření. To mohlo deformovat fotometrické diagramy. (Případně i kalibraci normálního zdroje během jehož proměrování jsem si ovšem tak rapidní změny svítivosti nepovšiml.)

Určená chyba měření se u některých jednotlivých měření pohybuje až k 13%, ale většina chyb se pohybuje do 10%, takže vzhledem k tomu, že většina měření byla subjektivních, je takto určená chyba relativně odpovídající (možná i spíš podhodnocená, protože v ní není uvážena schopnost rozeznávat stejné osvětlení pro různé spektrální složení světla a další špatně uchopitelné pozorovací schopnosti měřící osoby),

5 Závěr

Určil jsem svítivost normálové žárovky, která pak byla použita v dalších měřeních

$$J = (32,9 \pm 2,5) \text{ lx.}$$

Naměřil jsem směrovou charakteristiku svítivosti žárovky a pokusil jsem se ověřit Lambertův zákon. Určil jsem jas plošného zdroje

$$B = (5110 \pm 540) \text{ cd m}^{-2}$$

6 Literatura

- [1] **Studijní text k fyzikálnímu praktiku: Fotometrie**
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_304.pdf
- [2] **Pokyny k měření praktika III - 4**
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni_304.pdf