

## Pracovní úkoly

1. Změřením osvětlení luxmetrem okaličíte žárovku č. 1 (stanovte její svítivost). Do grafu vyneste závislost převrácené hodnoty druhé odmocniny z osvětlení na vzdálenosti luxmetru od žárovky. Z této závislosti určete svítivost a polohu zdroje světla vůči jeho držáku. V dalším grafu vyneste závislost osvětlení na převrácené hodnotě kvadrátu vzdálenosti luxmetru od žárovky a závislost osvětlení na převrácené hodnotě kvadrátu korigované vzdálenosti luxmetru od žárovky. Tvary závislostí diskutujte.
2. Lummerovým - Brodhunovým fotometrem proměřte fotometrický diagram žárovky č. 2 v horizontální rovině nebo ve vertikální rovině. Jako normál použijte žárovku č. 1 okaličovanou v bodě 1. Naměřené výsledky zpracujte graficky ve fotometrickém diagramu, vyznačte chyby nepřímého měření.
3. Pomocí luxmetru proměřte fotometrický diagram žárovky č. 2 v rovině neměřené v bodě 2. Výsledky zpracujte ve fotometrickém diagramu, vyznačte chyby nepřímého měření.
4. Pomocí luxmetru změřte směrovou závislost svítivosti plošného zdroje světla a ověřte platnost Lambertova zákona. Výsledky zpracujte do grafu v kartézských souřadnicích a také do fotometrického diagramu. Stanovte jas zdroje s relativní chybou výsledku.

## Teoretická část

Svítivost  $J$  vyjadřuje schopnost bodového zdroje vyvolat v daném bodě zrakový vjem. U anizotropních zdrojů se svítivost mění v závislosti na směru pozorování. Pro vyjádření této směrové závislosti se používají fotometrické diagramy.

Světelný tok vysílaný bodovým zdrojem o svítivosti  $J$  do prostorového úhlu  $d\Omega$  v daném směru je definován vztahem, podle [1]:

$$d\Phi = J d\Omega \quad (1)$$

Osvětlením  $E$  dané plochy se rozumí poměr světelného toku  $\Phi$  dopadajícího rovnoměrně na ozařovanou plochu a velikosti této plochy  $S$  dle [1]:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2)$$

Dopadají-li paprsky rovnoběžně s normálou plochy a bodový zdroj má svítivost  $J$ , pak z rovnic (1) a (2) máme, podle [1]:

$$E = \frac{J}{(r + \Delta r)^2} \quad (3)$$

Kde  $r$  je vzdálenost držáku žárovky vůči držáku luxmetru. A  $\Delta r$  je veličina zohledňující vzdálenost žárovky/luxmetru a jejich držáků. Hodnotu  $J$  lze zjistit, pokud budeme fitovat naměřená data pomocí funkce  $f(x) = \frac{A}{(x+B)^2}$ , potom hodnota  $A$  odpovídá svítivosti žárovky a  $B$  odpovídá veličině  $\Delta r$ .

Pro měření fotometrického diagramu jsme využili Lummerův-Brodhunův fotometr. Jedná se o subjektivní přístroj, jehož principem je nastavit vzdálenost dvou žárovek od fotometru tak daleko, aby byl jas pozorovaný v hledáčku fotometru stejný. Pokud známe jas první žárovky  $J_1$ , jas druhé žárovky  $J_2$  se spočítá podle [2]:

$$J_2 = J_1 \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (5)$$

Kde  $r_1$  a  $r_2$  jsou vzdálenosti žárovek od fotometru.

Pro změření fotometrického diagramu za pomoci luxmetru, lze modifikovat vztah (4). Poté máme podle [2]:

$$J = Er^2 \quad (6)$$

Kde jsme zanedbali posunutí žárovky vůči držáku.

Pokud zkoumáme plošný zdroj, je vhodné zavést veličinu jas. Jestliže vezmeme na povrchu zdroje malou plošku  $s$  a představíme si z ní vystupující paprsek pod úhlem  $\theta$  k normále, pak jasem zdroje v daném směru  $B_\theta$  nazýváme světelný tok  $d\Phi$  vystupující z plošky  $S$  v tomto směru, vztažený na jednotkový prostorový úhel a na jednotkovou velikost plošky ( $\cos\theta$ ) viditelnou z daného směru [1]. Jas je tedy definován [1]:

$$B_\theta = \frac{J_\theta}{S \cos(\theta)} \quad (7)$$

Kde  $J_\theta$  je jas plošného zdroje pozorovaného pod úhlem  $\theta$ . Pro speciální plošné zdroje tzv. kosinové zářiče je splněn Lambertův zákon [1]:

$$J_\theta = J_0 \cos(\theta) \quad (8)$$

Kde  $J_0$  je svítivost plošného zdroje pozorovaného pod úhlem  $0^\circ$ . Jas kosinového zářiče tedy nezávisí na úhlu  $\theta$ .

## Metoda měření

Nejprve jsme kalibrovali normálovou žárovku. Měřili jsme osvětlení vybuzečné žárovkou v různých vzdálenostech. Poté jsme měřili za pomoci Lummer-Brodhunova fotometru svítivost žárovky 2 v horizontální rovině. Následně jsme pomocí luxmetru nepřímo měřili svítivost žárovky ve vertikální rovině. Nakonec jsme opět pomocí luxmetru ověřili platnost vztahu (8).

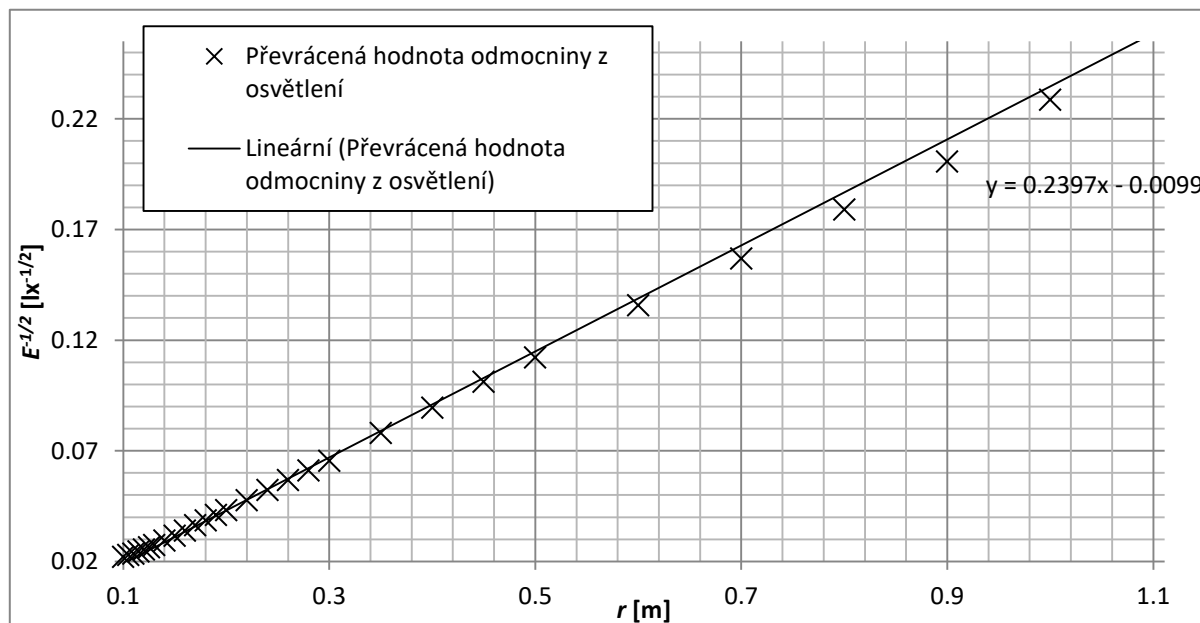
## Pomůcky

- Žárovka 1 – normál
- Žárovka 2 – Osram LED 2W, 250lm
- Lummerův-Brodhunův fotometr
- Luxmetr Voltcraft VC-4in1
- Plošný zdroj

# Výsledky měření

Laboratorní podmínky by na výsledky měření neměly mít vliv.

Graf č. 1 zachycuje závislost převrácené hodnoty druhé odmocniny z osvětlení na vzdálenosti luxmetru od žárovky.



Graf 1: Závislost převrácené hodnoty druhé odmocniny z osvětlení na vzdálenosti luxmetru od žárovky

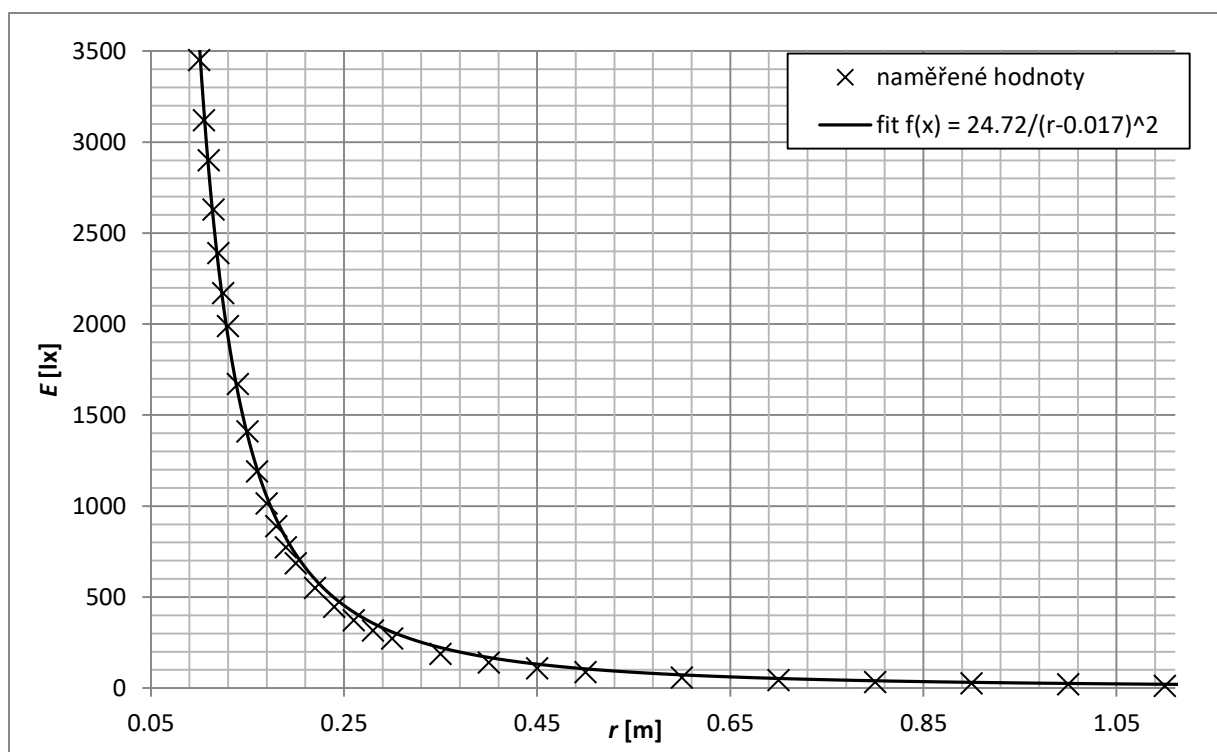
Tabulka 1: Zjištěné hodnoty svítivosti a posunutí žárovky 1

|                 | hodnota | chyba |
|-----------------|---------|-------|
| $J_1$ [cd]      | 24.7    | 1.2   |
| $\Delta r$ [cm] | -1.67   | -0.05 |

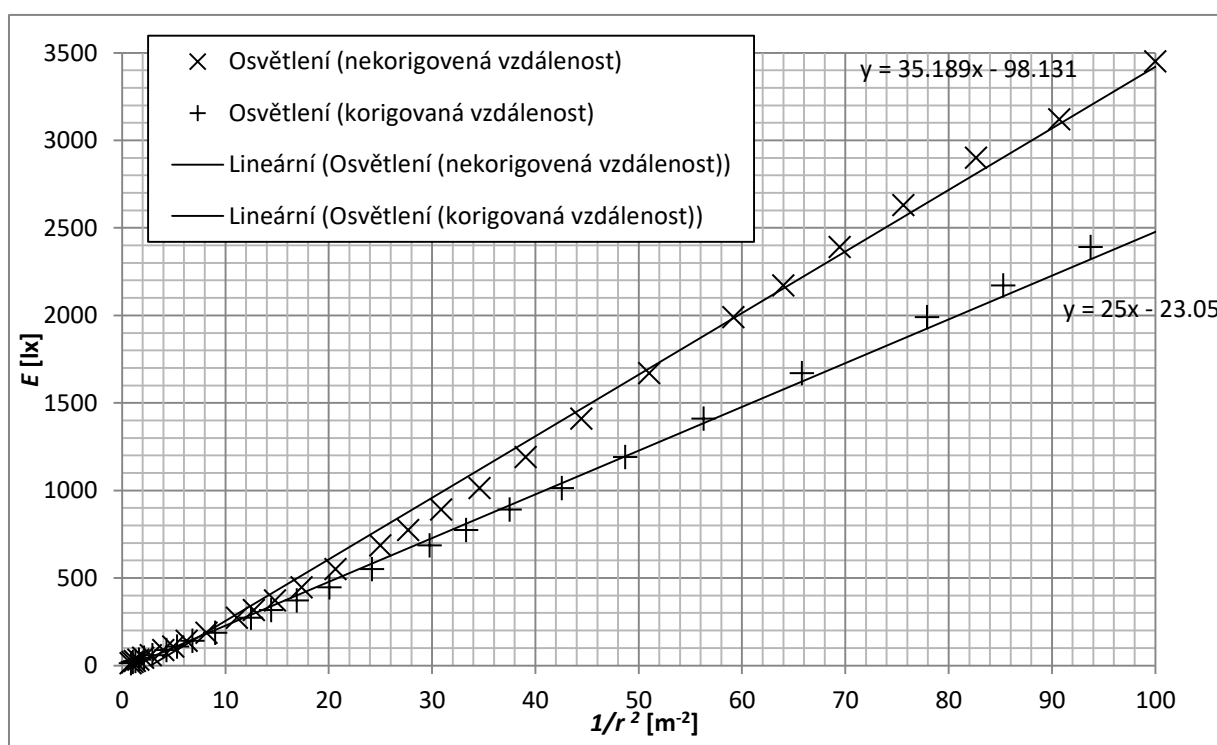
Pro zjištění svítivosti normálové žárovky  $J_1$  a jejího posunutí od luxmetru  $\Delta r$  jsme nafitovali funkci ze vztahu (3) na naměřená data<sup>1</sup>. Naměřená data jsou v grafu č.2 spolu s nafitovanou funkcí. Výsledné parametry fitu jsou uvedeny v tabulce 1. Chyba byla odhadnuta na 5%. Jako základ pro tento odhad byl fit z grafu č. 3, který ukazuje závislost osvětlení  $E$  na převrácené hodnotě druhé mocniny (korigované) vzdálenosti od luxmetru od žárovky. Rozdíl těchto dvou fitů jsou 3%. Další chyby jsou způsobeny měřením (přesnost luxmetru je cca 3% a nepřesnost měření vzdálenosti je 1%).

Graf č. 4 je fotometrický diagram žárovky č. 2 v horizontální rovině. Vyznačená chyba měření byla spočtená podle vzorce pro chybu nepřímého měření pro vzorec (5):  $\sqrt{2 \cdot \Delta r_1^2 + 2 \cdot \Delta r_2^2 + \Delta J_1^2}$ , kde  $\Delta r_{1,2}$  jsou relativní chyby určení vzdálenosti a  $\Delta J_1$  je chyba svítivosti normálové žárovky. Do chyby  $\Delta r_1$  jsme započítali subjektivní chybu způsobenou lidským faktorem. Tuto chybu jsme určili tak, že po naměření všech hodnot jsme znovu naměřili úhel  $0^\circ$ . Z rozdílu mezi původně naměřenou hodnotou a hodnotou změřenou podruhé jsme odhadli chybu jako  $\approx 2\%$ .

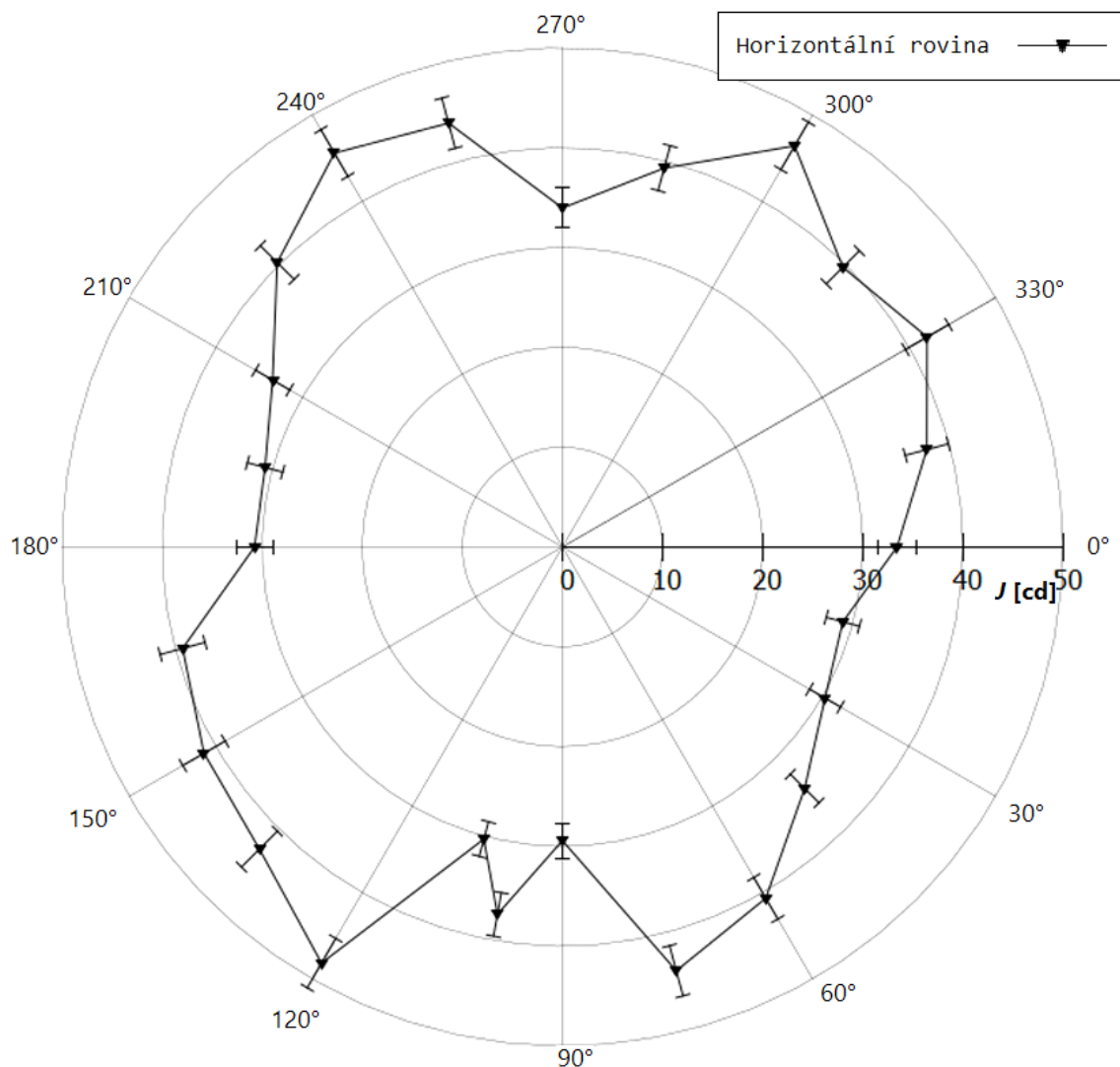
<sup>1</sup> Fit z grafu 1 jsme nepoužili (hodnoty svítivosti se liší o 30%), protože fitem získané hodnoty vůbec nefungují pro vysoké hodnoty osvětlení (pro hodnotu zjištěnou ve vzdálenosti 10 cm se liší o 46%). Naopak fit z grafu 1 funguje lépe pro hodnoty 17 – 45 cm.



Graf 2: Naměřené hodnoty



Graf 3: Závislost osvětlení na převrácené hodnotě korigované a nekorigované vzdálenosti, včetně odpovídajících fitů



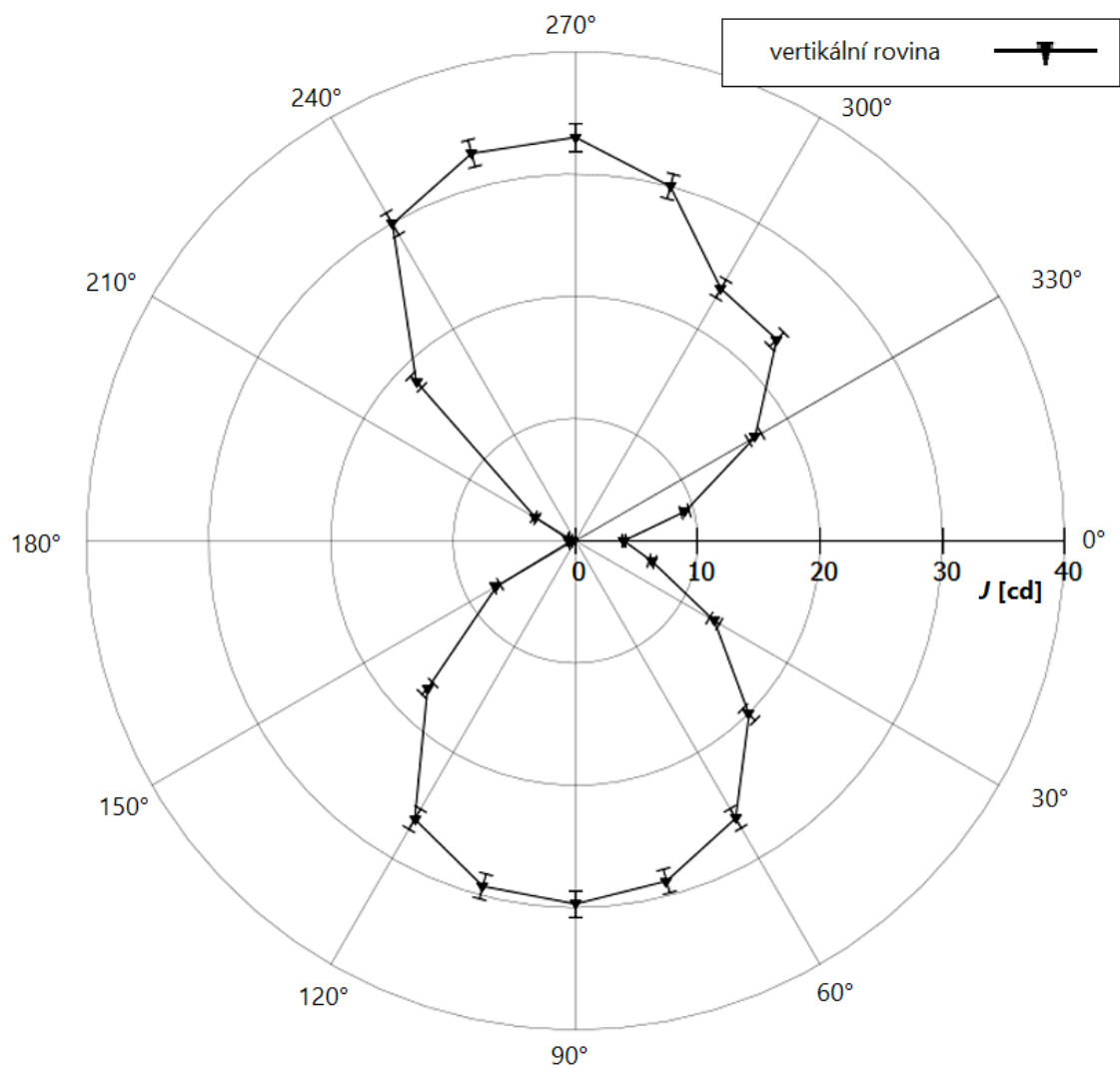
Graf 4: Fotometrický diagram žárovky 2 v horizontální rovině

Graf č. 5 znázorňuje fotometrický diagram ve vertikální rovině. Vyznačená chyba měření se spočítala podle vzorce pro chybu nepřímého měření pro vztah (6):  $\sqrt{2 \cdot \Delta r^2 + \Delta E^2}$ , kde  $\Delta r$  je chyba určení vzdálenosti žárovky 2 od luxmetru a  $\Delta E$  je chyba měření luxmetru (cca 3%).

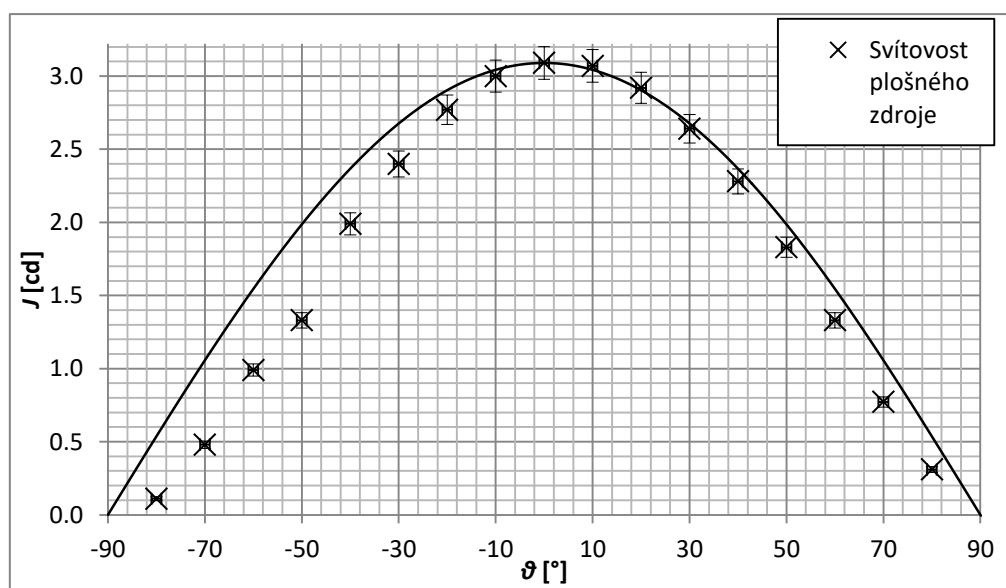
Tabulka 2: Jas plošného zdroje

| $B$ [kcd m <sup>-2</sup> ] | rel. chyba |
|----------------------------|------------|
| 4.52                       | 3%         |

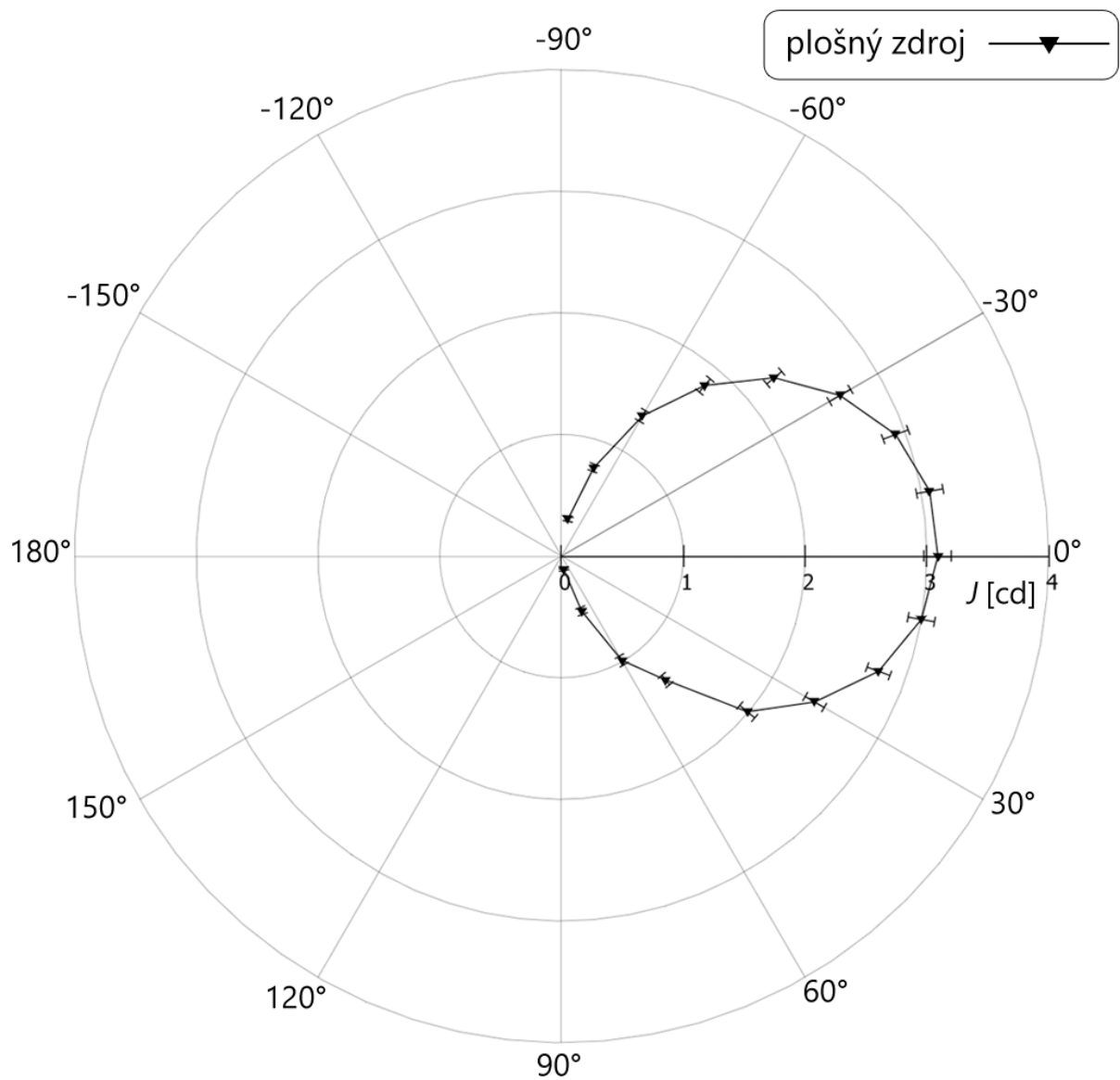
Graf č. 6 ukazuje závislost svítivosti plošného zdroje na úhlu pozorování. V grafu jsou vyneseny chybové úsečky získané ze vzorce pro výpočet nepřímého měření pro vztah (6) (viz předchozí). Graf také obsahuje průběh svítivosti ideálního kosinového zářiče (normovaného na hodnotu  $J_0$ ). Graf č. 7 je fotometrickým diagramem plošného zdroje. Tabulka č. 2 obsahuje jas plošného zdroje spočítaného z fitu funkce  $J(\text{Scos}(\theta)) = B \text{Scos}(\theta)$ . Graf č. 8 zobrazuje tento fit. Plocha  $S$  kruhového plošného zdroje byla spočítaná z průměru kruhového zdroje, který byl měřen několikrát a následně zprůměrován). Plocha  $S$  byla určena jako  $S = (6.33 \pm 0.04) \text{ cm}^2$ .



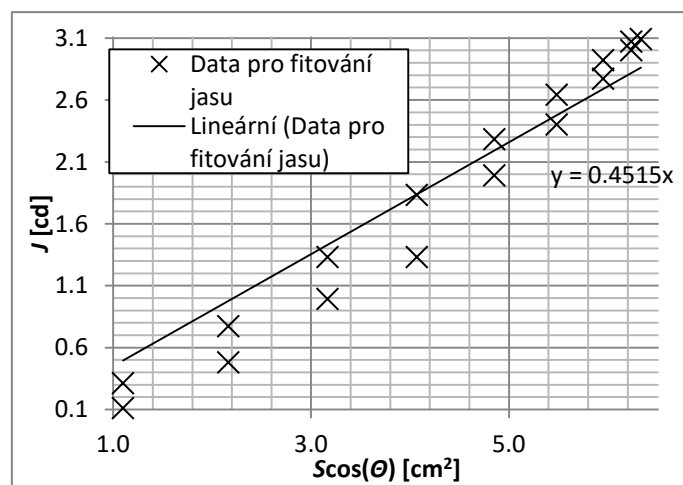
Graf 5: Fotometrický diagram žárovky 2 ve vertikální rovině



Graf 6: Závislost svítivosti plošného zdroje na úhlu pozorování



Graf 7: Fotometrický diagram plošného zdroje



Graf 8: Fitování jasu plošného zdroje

## Diskuse

Při kalibraci žárovky 1 jsme se mohli dopustit nepřesnosti, protože v místnosti, kde probíhalo měření, nebyla úplná tma. Při měření nebyl k dispozici laboratorní zdroj napětí, což mohlo vést k nestálosti svítivosti zkoumané žárovky.

Během měření fotometrického diagramu žárovky 2 pomocí Lummer-Brodhunova fotometru bylo zjištěno, že barva dvou žárovek není stejná (druhá žárovka byla typu LED). Zároveň se jedná o velmi subjektivní metodu, při které je velmi obtížné stanovit přesné místo, kde je jas obou částí zorného pole stejný. Na druhou stranu zde není takový problém, že v místnosti není úplná tma.

Měření fotometrického diagramu pomocí luxmetru, nenabízí možnost korigovat výpočet o případné posunutí žárovky od držáku. Měření je ovšem zatíženo menší statistickou chybou.

Přesnost měření svítivosti plošného zdroje byla ovlivněna podobnými chybami, jako měření fotometrického diagramu pomocí luxmetru. Jistá nesymetrie patrná v grafech 6 a 7 může být způsobena tím, že při změně úhlu plošného zdroje se světlo odráželo od světlé stěny a mohlo tak změnit hodnotu osvětlení luxmetru.

## Závěr

Svítivost první (normálové) žárovky byla stanovena na:

$$J_1 = (24.7 \pm 1.2) \text{ cd}$$

Závislost osvětlení na vzdálenosti luxmetru od žárovky odpovídá teoretickým předpokladům.

Platnost Lambertova zákona jsme ověřili (viz graf č. 6). Plošný zdroj se od ideálního kosinového zářiče příliš nelišil. Jas plošného zdroje jsme stanovili jako:

$$B = (4.52 \pm 0.15) \cdot 10^3 \text{ cd m}^{-2}$$

## Literatura

- [1] Fotometrie. *Fyzikální praktikum* [online].  
[cit. 3.3.2017]. Dostupné z:  
[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_304.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_304.pdf)
- [2] Pokyny k měření. *Fyzikální praktikum* [online].  
[cit. 7.3.2017]. Dostupné z:  
[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/pokyny/mereni\\_304.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_304.pdf)