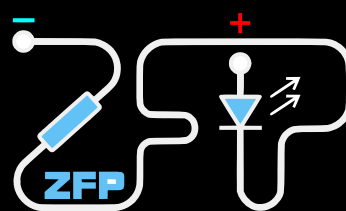


Krabinet  výuky obecné fyziky,
UK MFF

Physicální practicum III



Optica



Úloha č. 21

Název experimentu: Koherentní optický procesor

Jméno studenta: Josef Iosephus Kučera

Datum incidentu: 12. 04. 2022



Připomínky opravujícího:



	Možný počet bodů	Získaný počet bodů
Theoretická část	0–2	2
Výsledky měřeníhož	0–9	8,5
Diskuse	0–4	3
Závěr	0–1	1 -
Použité knižstvo	0–1	1
Suma sumárum	max: 17	15,5 tj. 16

Posuzoval: HK

dne: 16.5.22

Poznámka před čarou

Jelikož na závěr uvádímež pár pěkných temných fotografií, volíme invertované stylisování protokokakolu, abychom byli styloví a mělo to tady tu správnou Matrixovou atmosku.

Pracovní oukol

1. Na optickém stole je sestaven Koherentní optický procesor. Na obr. v „Pokynech měření“ (nebo skripta str. 188) je vyznačeno schematické uspořádání a vyznačeny ohniskové délky čoček, které jsou v úloze k dispozici. Ověřte, zda čočky Č1 a Č2 zachovávají rovnoběžnost paprsků. Spočtete a ověřte rozšíření paprsku použitým teleskopem. Změřte zvětšení obrazu předmětu v rovině $P3$ a zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině $P4$.
2. Pozorujte Fourierovský obraz následujících tří předmětů umístěných v rovině $P1$: čtvercového otvoru, soustavy rovnoběžných pruhů a sítky. Proměřte Fourierova spektra těchto předmětů v rovině $P2$ nebo $P4$ a z naměřených údajů vypočítejte rozměry předmětů, tj. velikost stran čtvercového otvoru, šířku a periodu soustavy rovnoběžných pruhů a periodu a šířku pruhů sítky.
3. Parametry předmětů z úkolu 2 změřte mikroskopem, který je v úloze č. 6, č. 30 nebo č. 14. Porovnejte hodnoty vypočtené z Fourierova spektra s přímým měřením mikroskopem.
4. Po dohodě s vyučujícím vyberte a kvalitativně ověřte některou z vlastností Fourierovy transformace, které jsou uvedeny v odd. 4.10.2 části I skript nebo na www.
5. V rovině $P1$ umístěte vybraný předmět. Do roviny $P2$ vkládejte různé filtry a zkoumejte jejich vliv na geometrický obraz v rovině $P3$. Pozorované jevy vysvětlete.

Theoretická část

Fourierovská transformace

Fourierovskou transformací nerozumíme přeměnu tohoto pána v transformera:



Obrázek 1: Fourier, přejato z [1]

To, co opravdu myslíme Fourierovskou transformací funkce $g(x)$ (v 1D), jest [2]:

$$\mathcal{F}\{g\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-i2\pi fx} \quad (1)$$

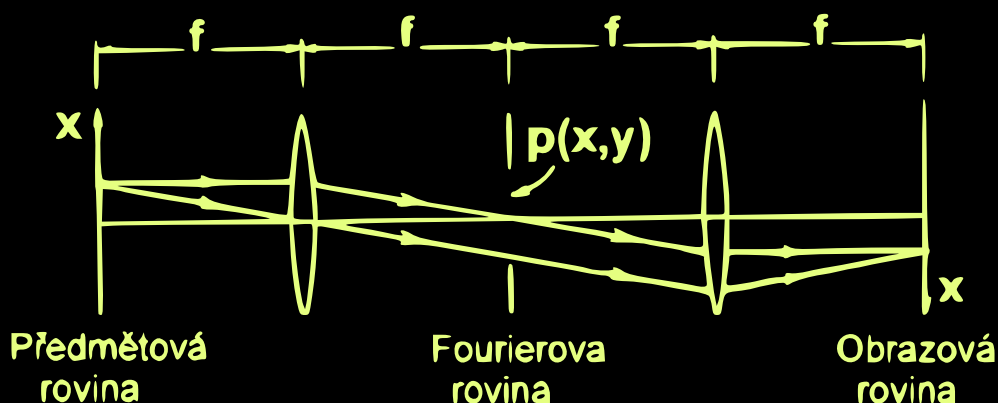
kde i jest ~~velice~~ komplexní jednotka.

Inversní Fourierovou transformací funkce $G(f)$ nazýváme funkci

$$\mathcal{F}\{g\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-i2\pi fx} \quad (2)$$

Optická Fourierovská transformace

Physikálně se dá Fourierova transformace provést pomocí koherentního optického mikroskopu využívajícího LASER. V nejjednodušší variantě se skládá ze 2 rovnoběžně umístěných čoček ve vzdálenosti dvojnásobku ohniskové vzdálenosti $2f$ stejně jako na obrázku 2.



Obrázek 2: Fourierova transformace, přejato z [2]

Mezi čočkami se na obrázku 2 nachází Fourierova rovina, tam můžeme provádět filtraci. Alias: odstíněním specifických míst ve Fourierově rovině dokážeme efektivně odfiltrovat ze vzoru určité prostorové frekvence.

Pokud před procesor umístíme předmět ve vzdálenosti f od první čočky a za druhou čočkou také ve vzdálenosti f umístíme stínítko, na stínítku se nám zobrazí předmět v recipročním prostoru \mathcal{F} (Fourierovsky transformován).

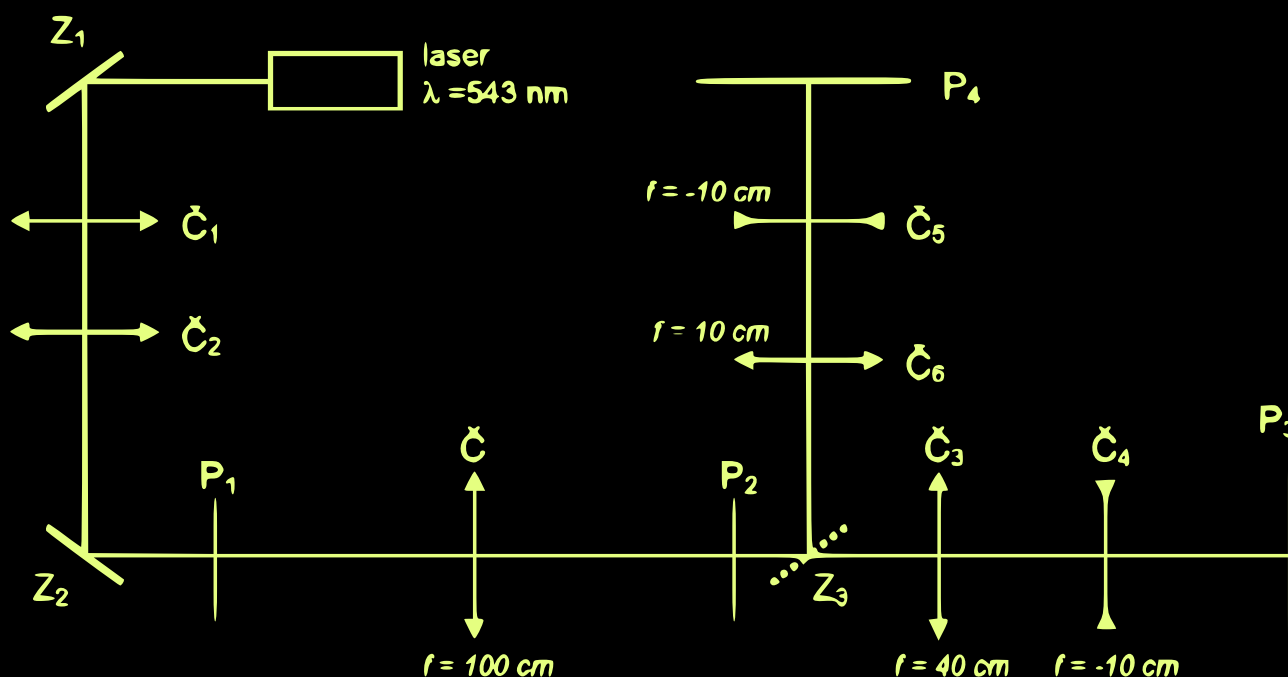
Jednou ze základních a velice zajímavých vlastností Fourierovy transformace jest, že její dvojitá aplikace středově převrátí vzor, v matematictíně:

$$\mathcal{F}\mathcal{F}g(x, y) = g(-x, -y) \quad (3)$$

Optická soustava

Optický profesor použitý v této úloze je o něco komplexnější, aby taky ne, když Fourierova transformace jest komplexní sama o sobě, hahahaha.

Schaema zneužitého optického procesoru uvadíme na obrázku 3:



Obrázek 3: Schaema soustavy optického procesoru

u převzatých obrázků se uvádí zdroj

Obsahuje soustavu dvou čoček Č1 a Č2, která rozšiřuje laserový svazek a zároveň zachovává kolinearitu paprskův (viz Galileův teleskop z úlohy Michelsonův interferometr).

To pro nás ~~blbě laiky~~ znamená, že tyto čočky jsou umístěny ve vzdálenosti rovné součtu jejich ohniskových vzdáleností a dohromady dávají zvětšení rovno:

$$Z = -\frac{f_2}{f_1} \quad (4)$$

Dále vidíme předmětovou rovinu P1, kde jest umístěn zobrazovaný předmět (v našem případě nějaký filtr) a dvě čočku Č, která jest jádrem procesoru (viz. obrázek 2) Na stínítku P2 Můžeme rovnou pozorovat Fourierovskou transformaci.

Nakonec světlo:

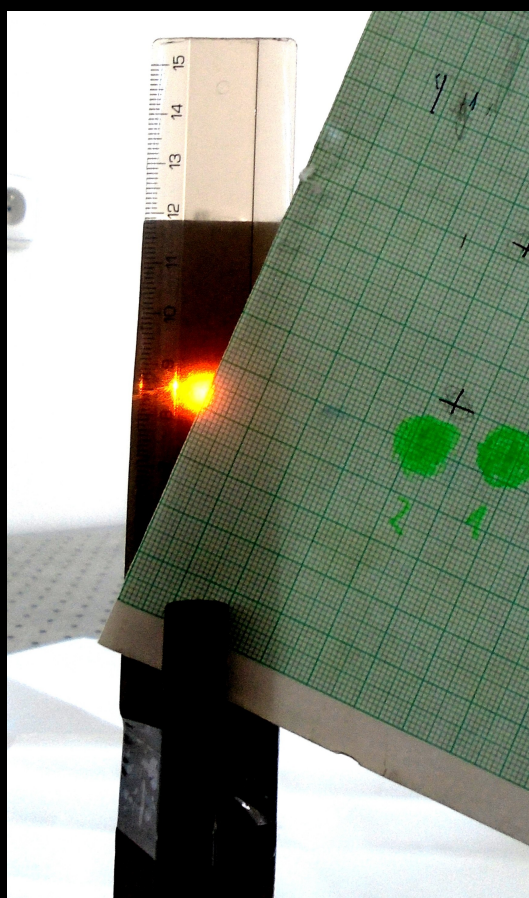
- buď odráží se od zrcadla $Z3$ na zeď $P4$, kde pozorujeme zvětšený Fourierovský obraz díky rozptylce Č5 a Č6
- nebo odstraníme zrcadlo $Z3$ a světlo se pak reversně transformuje zpátky do původního (zvětšeného) obrazu na stínítku $P3$.

Výsledky měření

Nesestavili jsme optický procesor, protože jej sestavil už nějaký jantár před námi. Nicméně soustava byla rozeštelovaná jak hovado, tak nás musel přijít zachránit uctivý pan *Gabriel*.

Poté již věci fungovaly jak měly.

Nejprve jali jsme se měřiti divergenci svazku, viz obr 4:



Obrázek 4: Měření divergence paprsku

Za tímto účelem postavili jsme si bazmek skládající se z pravítka, kteréžto jsme přilepili k tyčce, a mezi ně jsme strčili milimetrák.

Bylo to velice improvizované měření, ale jak říká pan *Martin Vlach*: „Správný fyzik si vždy musí umět poradit.“

Svazek byl nejprve lehce konvergentní, tak jsme aparaturu pošte-

lovali nyní za pomoci ctihodného pana *Alstera*, kterýžto se nás ujal jako vlastních.

Teleskop

Údaje o čočkách Č1 a Č2 uvádíme v tabulce 1:

Tabulka 1: Použité čočky (teleskop) [4],[5]

Čočka	Název čočky	Typ čočky	f [mm]
Č1	KBC 046	rozptylka	$-25,00 \pm 0,25$
Č2	KPX 100	spojka	$150,0 \pm 1,5$

Nyní zneužijeme rovnice (4) k výpočtu zvětšení teleskopu a dostáváme:

$$Z = -\frac{150}{25} = (6,00 \pm 0,08) \times$$

kde jsme chybu zvětšení ϵ_Z vypočítali dle vzorce pro výpočet chyby nepřímého měření:

$$\epsilon_Z = |Z| \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{f1}}{f1}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{f2}}{f2}\right)^2}$$

A nyní to porovnáme s naměřenými hodnotami:

$$d = (12 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$d_0 = (1,5 \pm 0,5) \text{ mm}$$

kde d jest průměr svazku odečtený milimetrovým papírem za teleskopem a d_0 jest původní průměr svazku. Chyby měření uvádíme jako chyby odečtu z milimetráku.

$$12/1,5=8$$

Celkově tedy

$$Z' = \frac{d}{d_0} = 6,0-12,5 \times$$

aha, ale takto se to nepíše, že kdyžtak (6,0 až 12,5) x

kde jsme uvedli maximální rozptyl poměrů naměřených hodnot.

Pozn.: Hlavní chybu nám způsobuje nepřesný odečet z milimetráku. Porovnáním s hodnotou Z vidíme, že spíše jsme průměr svazku před mikroskopem odečetli menší, než reálně byl.

Fourierův a zpětný obraz

Nejprve vzali jsme si referenční čtverec o straně 1mm a měřili jsme nejprve Fourierovsky transformovaný obraz, kde jsme naměřili před zvětšením na stínítku $P2$ a po zvětšení na stínítku $P3$:

$$\mathcal{F}(d) : (8 \pm 1) \text{ mm} \longrightarrow (42 \pm 1) \text{ mm} \quad \sim 9 \text{ dílků}$$

Zvětšení $(5,25 \pm 1,25) \times$ kde největší chybu opět činí nejistota odečtu z milimetráku.

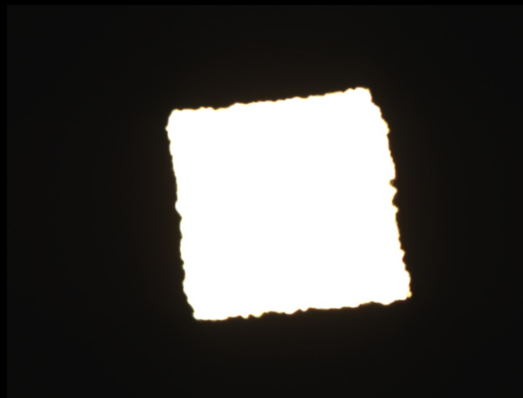
A zpětná transformace nám dává:

$$\mathcal{F}^{-1}(d) : 1 \text{ mm} \longrightarrow (5 \pm 1) \text{ mm} \quad \sim \text{strana čtverce}$$

Zvětšení $(5 \pm 1) \times$ kde největší chybu opět činí nejistota odečtu z milimetráku.

Měřené obrazce

Poté jsme si zvolili filtr o hraně čtverce odhadem $\sim 2\text{mm}$ s označením $\partial 02$, který jsme proměřili i pod mikroskopem



Obrázek 5: Čtvercová clona pod mikroskopem

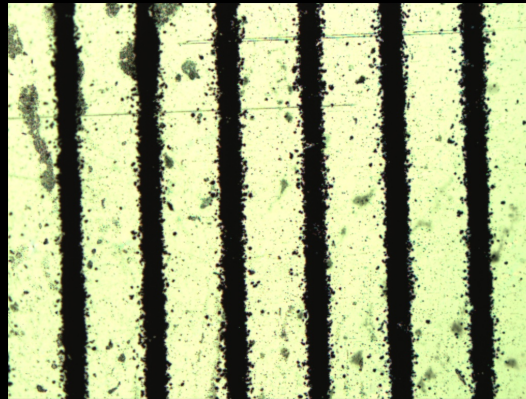
Délku hrany čtverce změřili jsme pod mikroskopem jako

$$a = (1352 \pm 15) \mu\text{m}$$

pro 7 maxim ve vzdálenosti $(19 \pm 1) \text{ mm}$ vychází vzdálenost mezi 2 maximy na stínítku (podělená zvětšením)

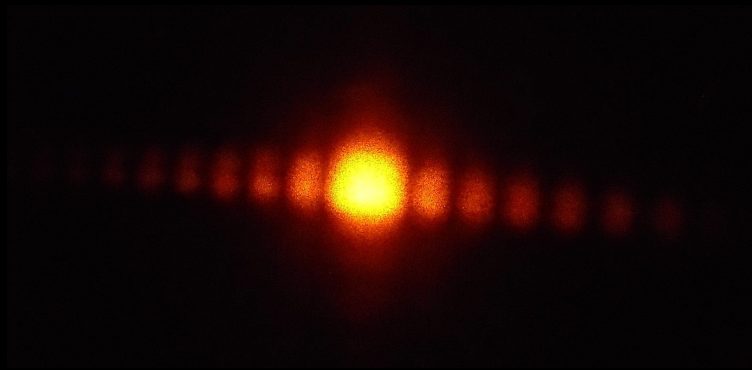
$$a = \frac{19}{7} \cdot \frac{1}{5} = (500 \pm 60) \mu\text{m}$$

Poté jsme si zvolili filtr z optické mřížky:



Obrázek 6: Mřížka pod mikroskopem

a dostali jsme následující obrazec:



Obrázek 7: Fourierův obrazec mřížky

Vzdálenost mezi 2 vrypy nám v průměru vychází jako

$$l = (250 \pm 10) \mu m$$

Vzdálenost pro 7 maxim $l_{7R} = (41 \pm 1) \text{ mm}$ A vzdálenost mezi 2 vrypy v reciprokém prostoru (podělaná zvětšením):

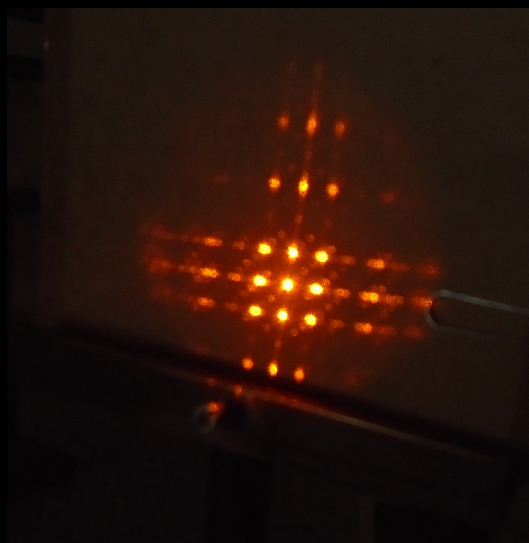
$$l_R = \frac{41}{7} \cdot \frac{1}{5} = (1,16 \pm 0,04) \text{ mm}$$

V čase pozdějším ještě změřili jsme vlastnosti sítky alias látky:



Obrázek 8: Síťka pod mikroskopem

Strana jednoho čtverečku nám vyšla jako $a = (77 \pm 3) \mu m$ a pozorovali jsme skvělý interferenční oprásek:



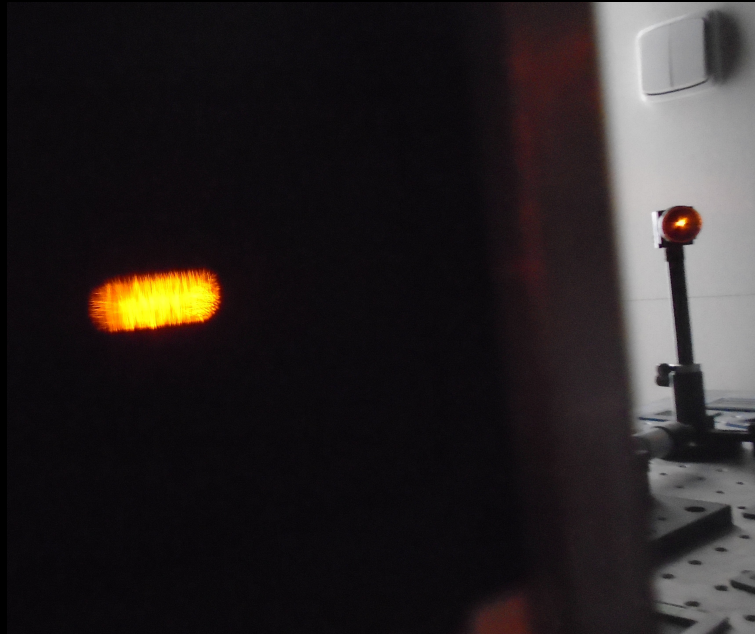
Obrázek 9: Fourierův obrazec sítky

Vzdálenost 3 maxim $a_{3R} = (81 \pm 1) mm$ A vzdálenost mezi 2 otvory v reciprokém prostoru:

$$a_R = \frac{81}{3} \cdot \frac{1}{5} = (5,4 \pm 0,1)mm$$

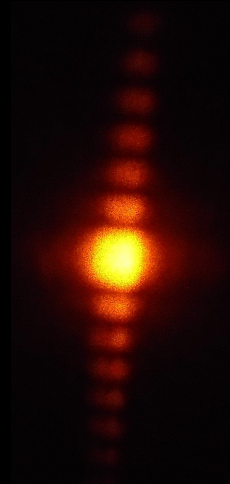
Kvalitativní měření

Nakonec jsme si užívali pozorování pěkných jevů Fourierovských transformací:



Obrázek 10: Obdélníkový otvor

U obdélníkového otvoru jsme dostali podobnou věc jako u mřížky, akorát orientovanou vertikálně. Fourierovský obraz prohazuje osy x a y

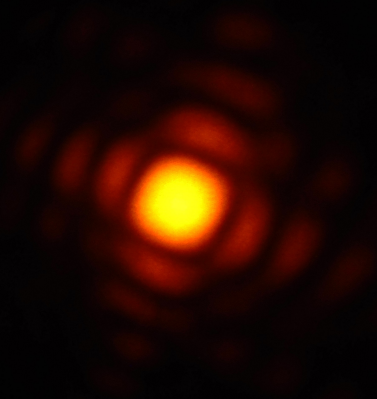


Obrázek 11: Transformovaný obdélník

Na příkladu kruhových otvorů pak můžeme pozorovat konvoluci:



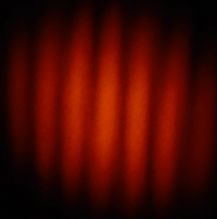
Obrázek 12: Kruhový otvor



Obrázek 13: Fourierův obraz pro 1 kruhový otvor



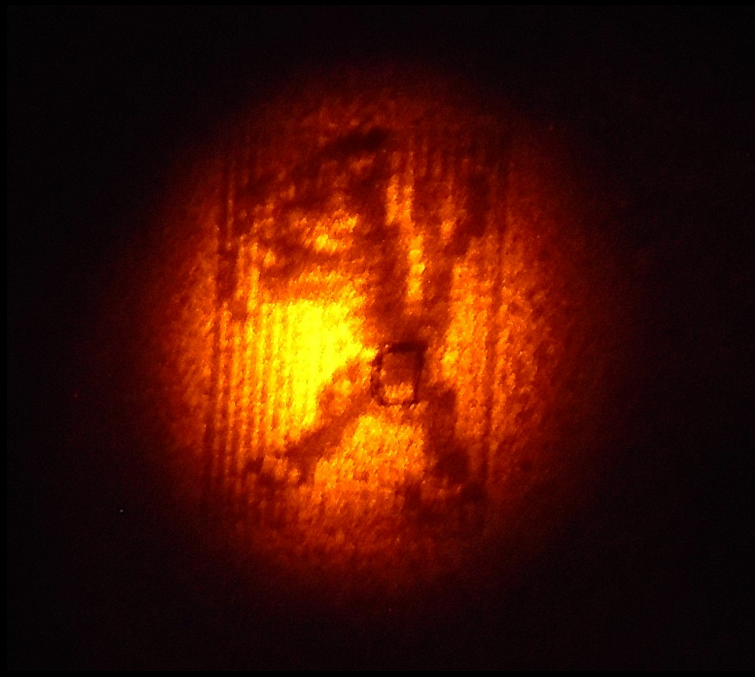
Obrázek 14: Fourierův obraz pro 2 kruhové otvory



Obrázek 15: Fourierův obraz pro 4 kruhové otvory

A nakonec zobrazili jsme si tygříka v kleci.

Hrany oblé jsou rozesety po celém prostoru ve Fourierovské transformaci, zatímco rovnoběžné hrany klece jsou koncentrovány do hran.



Obrázek 16: Tygr v kleci

Snažili jsme se tygříka osvoboditi, ale nepovedlo se nám to! Buď mříž nezmizela úplně, nebo jsme jej zabili.

čím jste to zkoušeli?

Diskuse

Mission Impossible. Měření čehokoliv pomocí milimetrového papíru byla nesplnitelná mise hned od začátku! Příliš hrubé měřítko, rozpliznutí svazku, etc... Achy ty archaické měřicí přístroje. Ach ta enormní chyba! Bolela nás z ní hlava! Ještě štěstí, že dnes máme lepší měřicí techniku.

PC a mikroskop. Na mikroskopu jsme dostali mnohem menší rozptyl chyby. Tam byla největší nejistota způsobena již pouze nepravidelnostmi vzoru (nedokonalým vyříznutím otvoru, neisotropním rozmístěním vláken v síťce, etc.)

aspoň v diskusi mělo být rozebráno, jak by se dala odstranit klec jaký filtr se měl použít na odstranění svislých pruhů

Závěr

Přišli jsme k hotovému optickému procesoru.

Zvětšení svazku teleskopem

Dopočítali jsme zvětšení teleskopu nejprve z vlastností čoček:

$$Z = -\frac{150}{25} = (6,00 \pm 0,08) \times$$

A poté jsme jej změřili pomocí milimetráku a stanovili experimentálně jako:

$$Z' = \frac{d}{d_0} = 6,0-12,5 \times$$

Referenční čtverec a jeho zvětšení

Na referenčním čtverci o straně 1mm jsme změřili zvětšení Fourierovsky transformovaného i zpětného obrazu:

Zvětšení $(5,25 \pm 1,25) \times$ kde největší chybu opět činí nejistota odečtu z milimetráku.

A zpětná transformace nám dává:

Zvětšení $(5 \pm 1) \times$ kde největší chybu opět činí nejistota odečtu z milimetráku.

Další zkoumané filtry

Délku hrany čtverce $\partial 02$ změřili jsme pod mikroskopem jako

$$a = (1352 \pm 15) \mu m$$

pro 7 maxim ve vzdálenosti (19 ± 1) mm vychází vzdálenost mezi 2 maximy na stínítku (podělená zvětšením)

$$a = \frac{19}{7} \cdot \frac{1}{5} = (500 \pm 60) \mu m$$

Vzdálenost mezi 2 vrypy nám v průměru vychází jako

$$l = (250 \pm 10) \mu m$$

Vzdálenost pro 7 maxim $l_{7R} = (41 \pm 1) \text{ mm}$ A vzdálenost mezi 2 vrypy v reciprokém prostoru (podělná zvětšením):

$$l_R = \frac{41}{7} \cdot \frac{1}{5} = (1,16 \pm 0,04) \text{ mm}$$

Strana jednoho čtverečku nám vyšla jako $a = (77 \pm 3) \mu m$

Vzdálenost 3 maxim $a_{3R} = (81 \pm 1) \text{ mm}$ A vzdálenost mezi 2 otvory v reciprokém prostoru:

$$a_R = \frac{81}{3} \cdot \frac{1}{5} = (5,4 \pm 0,1) \text{ mm}$$

ZÁVĚR ZÁVĚRU POSLEDNÍHO PROTOKOLU POSLEDNÍHO SEMESTRU PRAKTIK

Pozorovali jsme otočení Fourierovskou transformací a pozorovali jsme i konvoluci.

Bohužel se nám nepovedlo osvobodit tygra z klece, ale to nevadí dětičky!!!!

**KONEČNĚ JSME SVOBODNÍ! PROBOJOVALI JSME SE AŽ SEM
A TEĎ JEŠTĚ PORAZITI BESTII JMÉNEM PHYSICÁLNÍ ANNA-
LÝZA!**



Obrázek 17: JSME VOLNÍ DETIČKY

HA A TENTO OPRÁSEK NECITUJI, HIIHIIHIIHII!!!!

Použité knižstvo

- [1] Joseph Fourier: Heat Radiation and finding new answers [online] [cit. 2022-13-04]. Dostupné online z: <https://www.cambridgeblog.org/2014/12/joseph-fourier-heat-radiation-and-finding-new-answers/>
- [2] Studijní text k Fyzikálnímu Praktiku III. 21. Koherentní optický procesor. [online] [cit. 2022-13-04]. Dostupné online z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_321.pdf
- [3] Pokyny k měření k Fyzikálnímu Praktiku III. 21. Koherentní optický procesor. [online] [cit. 2022-13-04]. Dostupné online z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_321.pdf
- [4] Bi-Concave Lens, N-BK7, 25.4 mm Diameter, -25 mm EFL, Uncoated. Newport Corporation [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné online z: <https://www.newport.com/p/KBC046>
- [5] Plano-Convex Lens, N-BK7, 25.4 mm Diameter, 150 mm EFL, Uncoated. Newport Corporation [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné online z: <https://www.newport.com/p/KPX100>