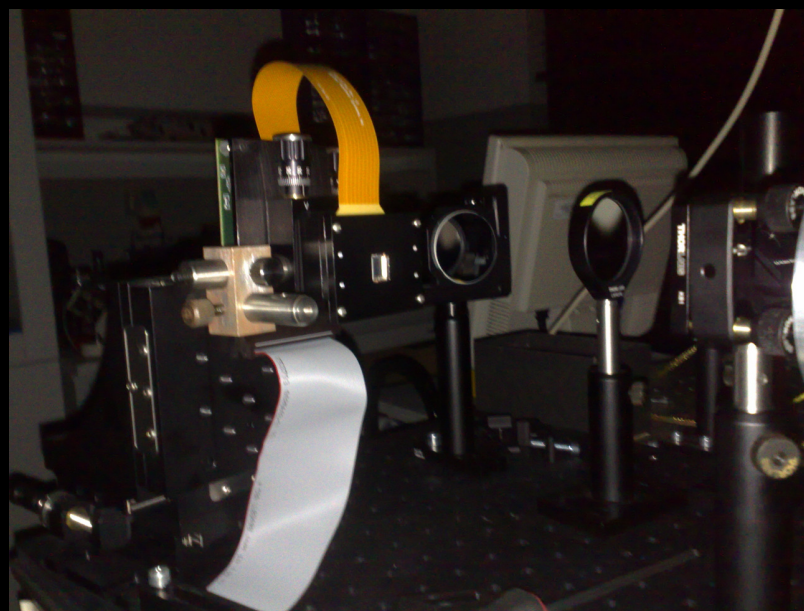




INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazování



Michal Baránek

Katedra Optiky, Přírodovědecká Fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

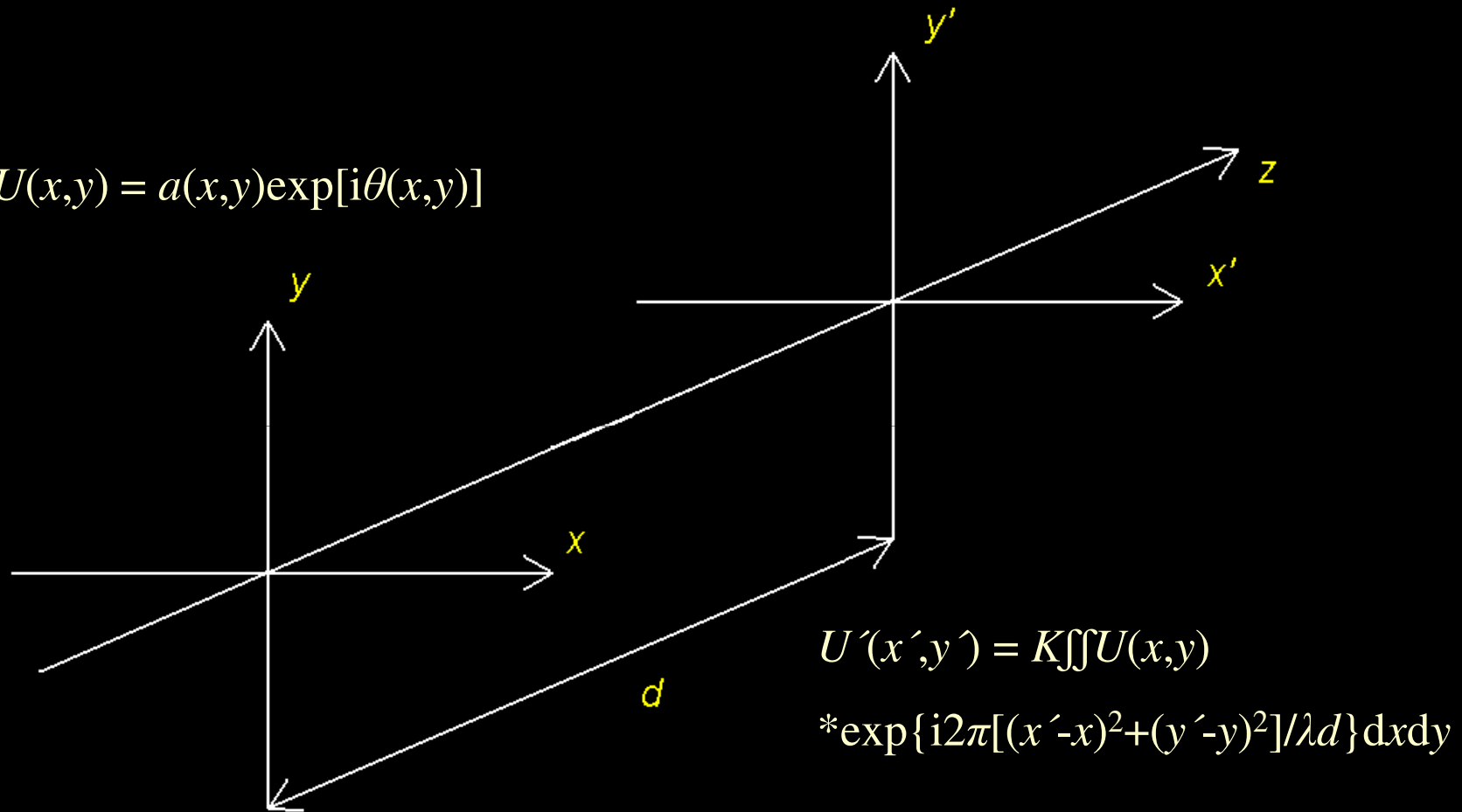
Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazování

1. Prostorový fázový modulátor světla

2. Fázový modulátor jako prostorový filtr (Spirální fázový kontrast)
3. Fázový modulátor jako prvek umožňující korekci aberací

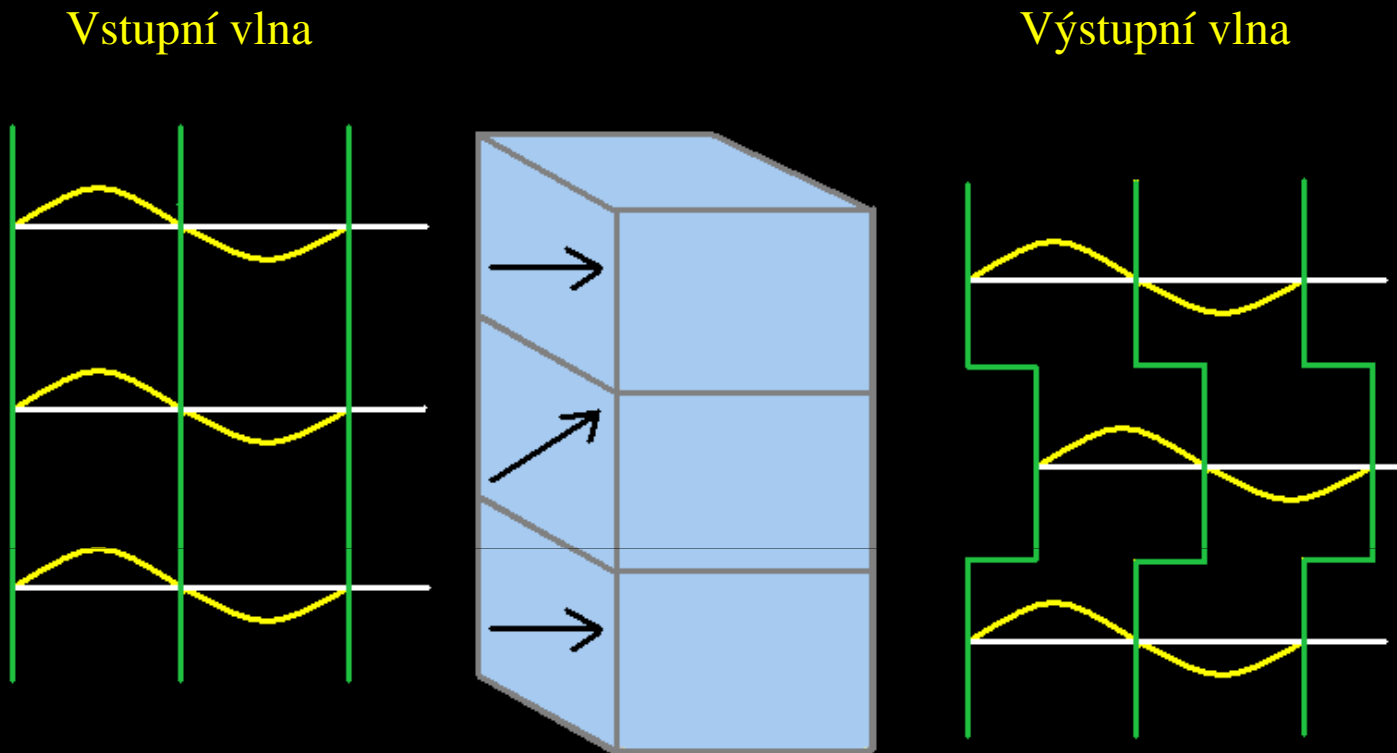
Prostorová fázová modulace

$$U(x,y) = a(x,y)\exp[i\theta(x,y)]$$



Změnou fáze ve výchozí rovině lze ovlivnit optické pole v dalších rovinách

Prostorový fázový modulátor světla



Prostorový modulátor – displej z kapalných krystalů

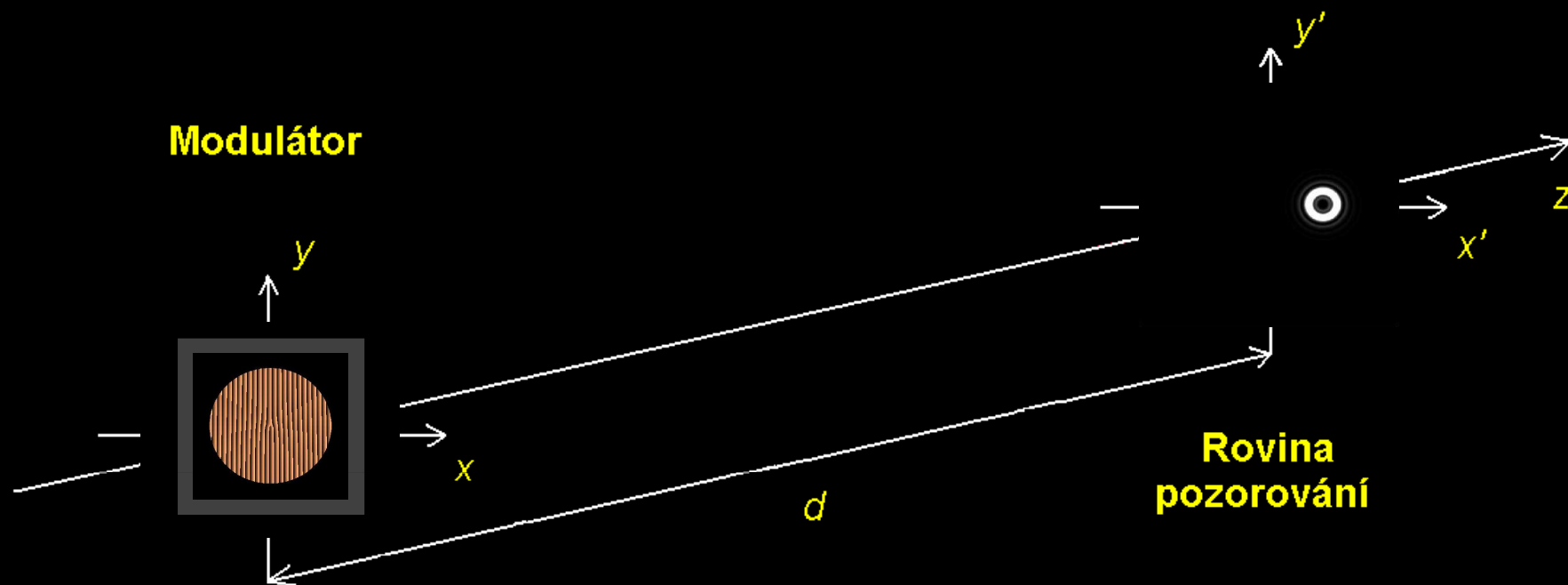
Velikost napětí přivedeného na jednotlivé pixely určuje hodnotu indexu lomu daného pixelu

Fáze - $\varphi = 2\pi nl/\lambda$; n – index lomu; l – tloušťka pixelu; λ - vlnová délka

Hodnota indexu lomu určuje změnu fáze světelné vlny procházející krystalem

Prostorovým modulátorem lze tvarovat procházející světelnou vlnu

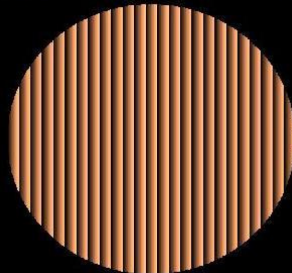
Práce s prostorovým fázovým modulátorem



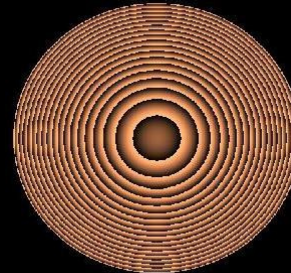
Fázový modulátor je osvětlen rovinnou vlnou šířící se ve směru osy z

Jednotlivé
hologramy

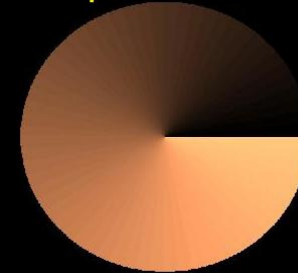
Pracovní fázová mřížka



Čočka



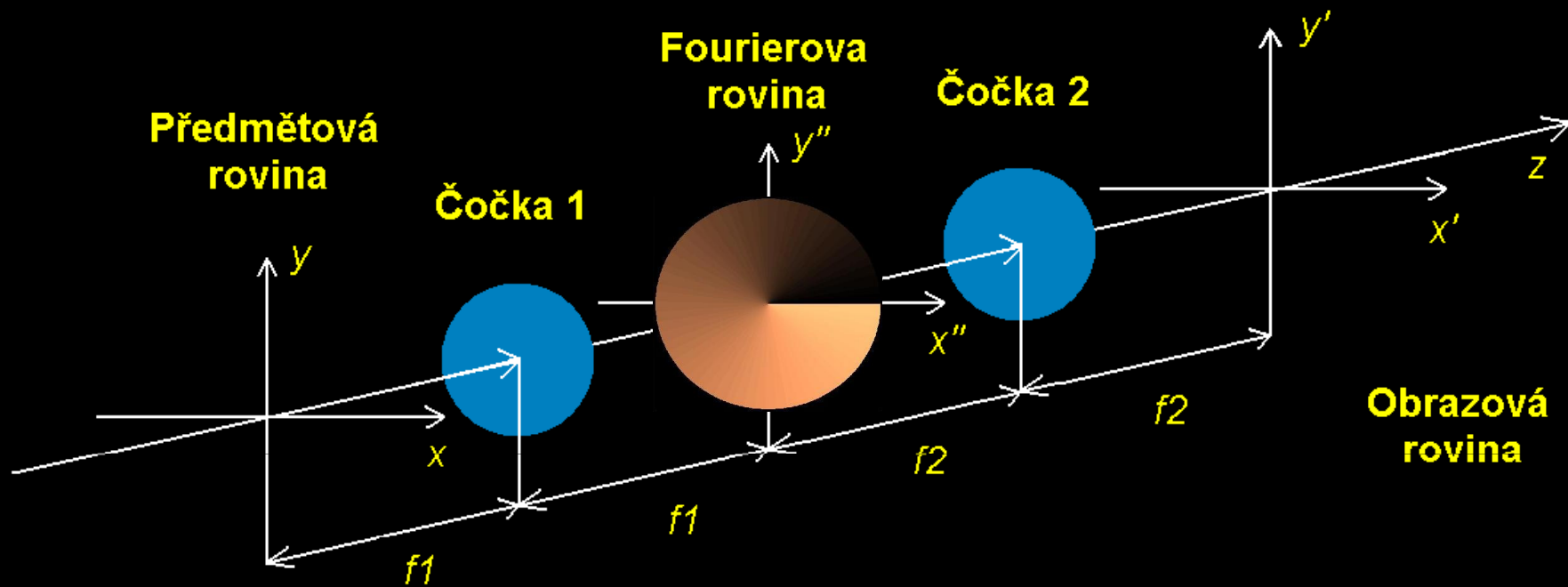
Spirální maska



Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazování

1. Prostorový fázový modulátor světla
- 2. Fázový modulátor jako prostorový filtr (Spirální fázový kontrast)**
3. Fázový modulátor jako prvek umožňující korekci aberací

Spirální fázový kontrast



4 – f systém - ve fourierově rovině je umístěna spirální fázová maska

Propustnost masky – $t_S = \exp(i\varphi'')$; $\varphi'' = \text{atan}(y''/x'')$

V předmětové rovině je umístěn předmět s propustností – $t_A(x,y)$

Intenzita v obrazové rovině – $I(x',y') = |\text{FT}^{-1}\{\text{FT}\{t_A\} * t_S\}|^2$

Propustnost v centru singulární masky

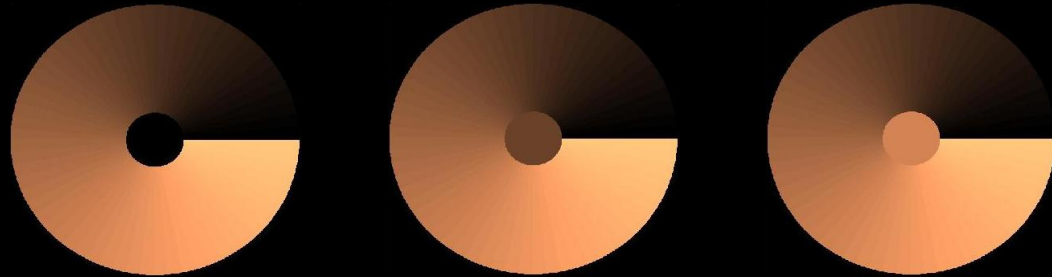
Centrem masky prochází nulová prostorová frekvence spektra předmětu

V obrazové rovině je nulová prostorová frekvence reprezentována rovinnou vlnou šířící se ve směru osy z

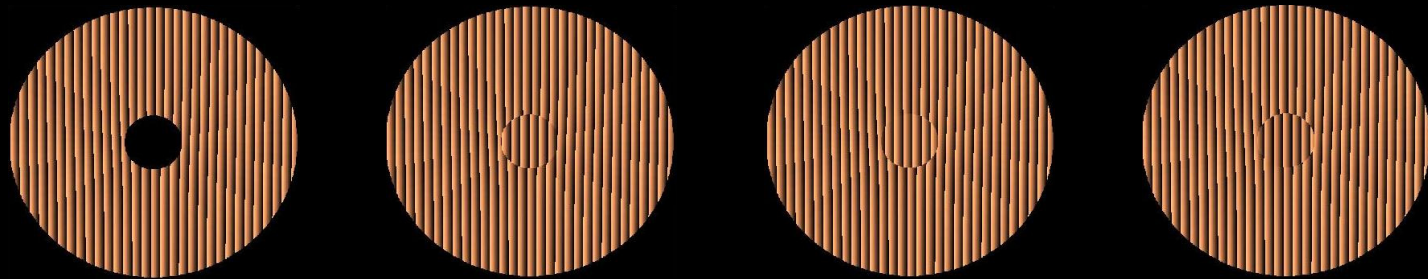
Propustností v centru masky lze ovlivnit fázi této rovinné vlny

Výsledný obraz – interference – rovinná vlna + pole po spirální fázové filtraci

Maska



Fázový
hologram



$$t_S(0,0) = 0$$

$$t_S(0,0) = \exp(-i\pi)$$

$$t_S(0,0) = \exp(-i\pi/3)$$

$$t_S(0,0) = \exp(i\pi/3)$$

Sledované typy předmětů

Předmět 1 – amplitudový

$t_A(x,y) = 1$ – v místech nápisu; $t_A(x,y) = 0$ – mimo nápis

Sample

Předmět 2 – amplitudový

$t_A(x,y) = 0$ – v místech nápisu; $t_A(x,y) = 1$ – mimo nápis

Sample

Předmět 3 – fázový

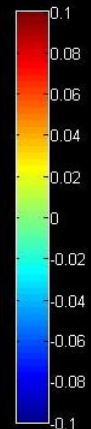
$t_A(x,y) = \exp[i2\pi(n-1)z/\lambda]$; $n = 1,5$; $\lambda = 632,8\text{nm}$; $z(x,y)$

Sample

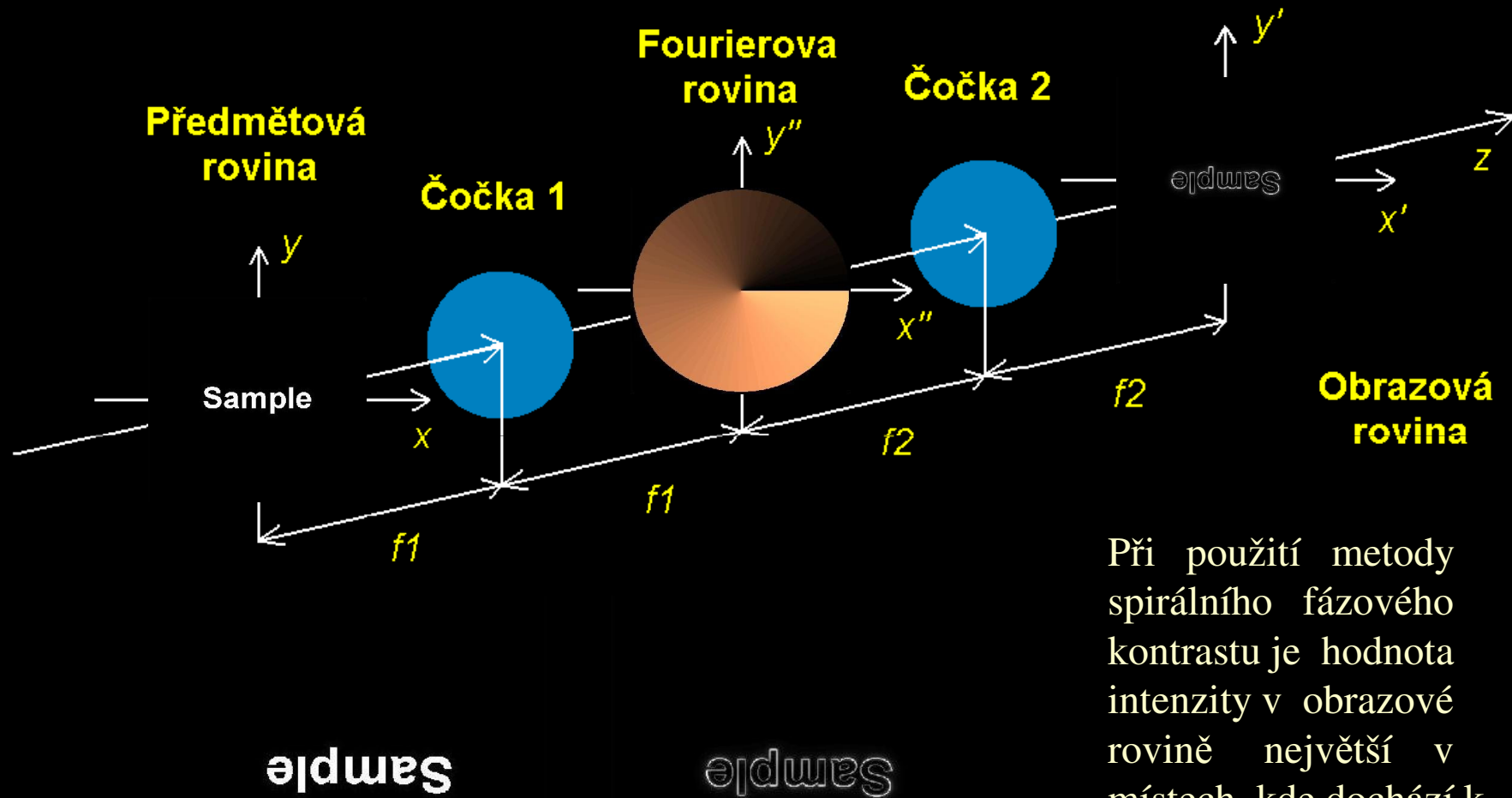
Předmět 4 – fázový

Sample

z/λ



Obraz – amplitudový předmět 1



Při použití metody spirálního fázového kontrastu je hodnota intenzity v obrazové rovině největší v místech, kde dochází k nejprudším změnám amplitudy a fáze v předmětové rovině.

Bez spirálního filtru

Se spirálním filtrem

Obraz různých předmětů

Amplitudový předmět 2

Fázový předmět 3

Fázový předmět 4

Obraz

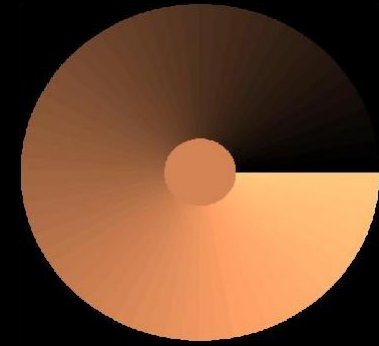
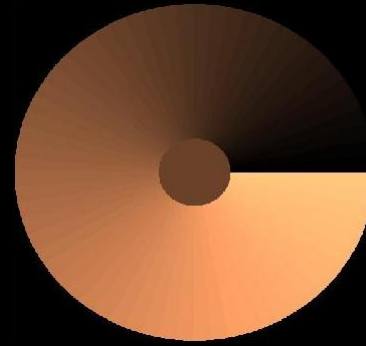
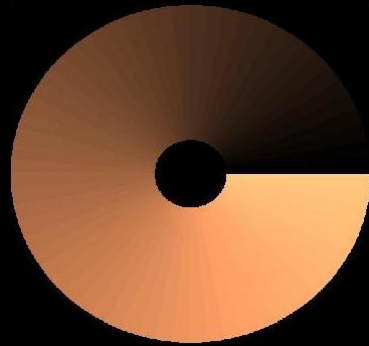


Směr
stínování

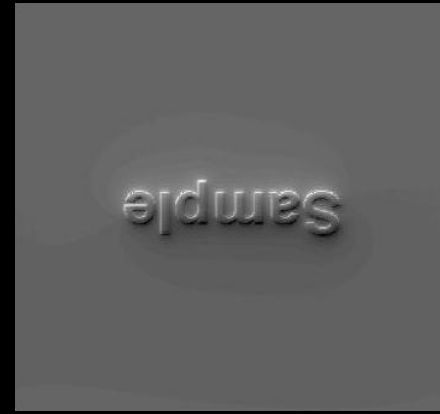
Podle směru stínování lze určit typ zobrazovaného předmětu

Fázový předmět 3 – různé druhy masky

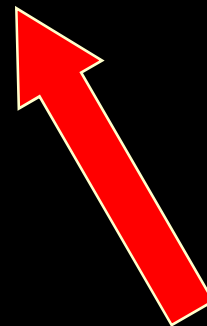
Maska



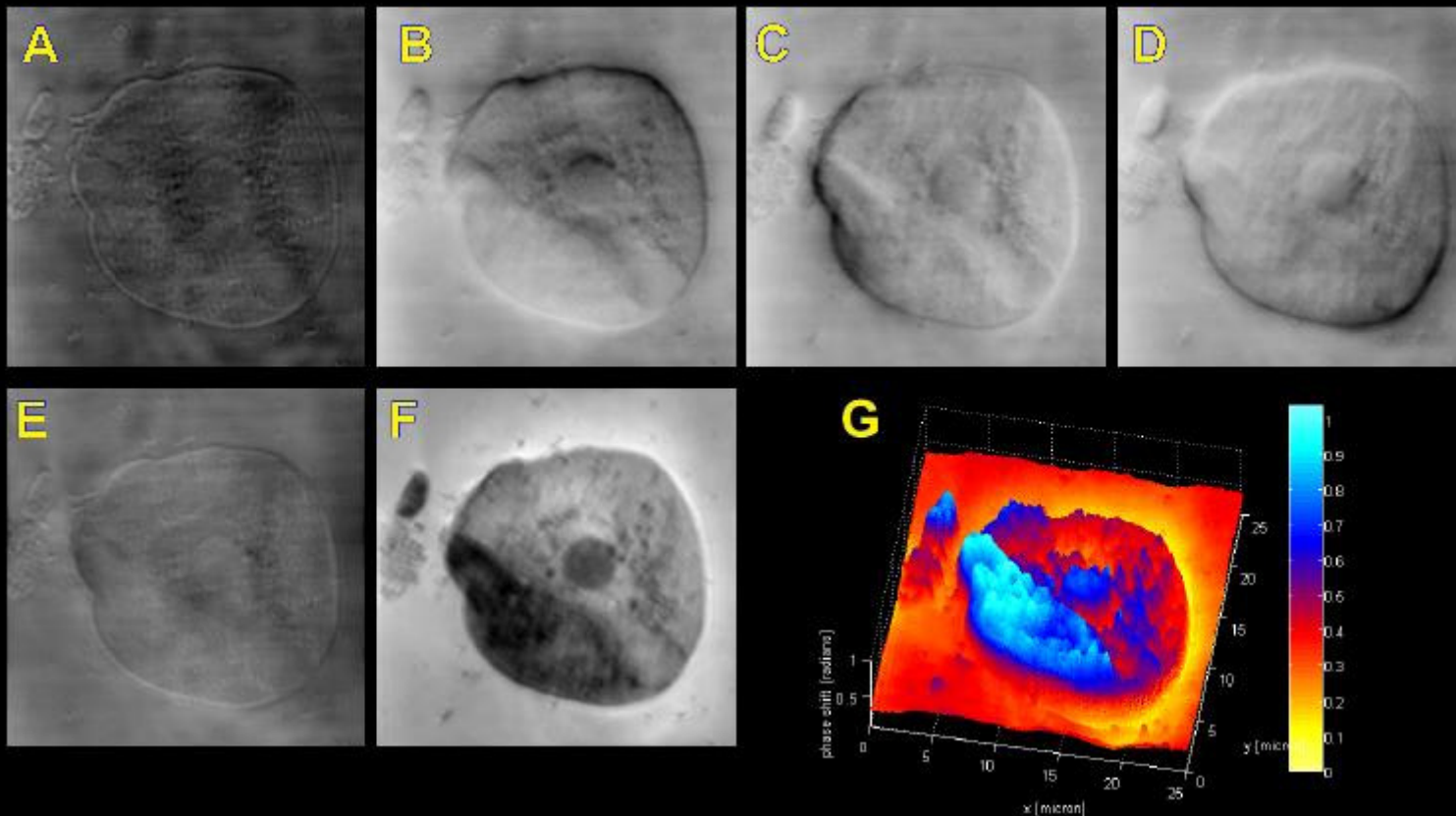
Obraz



Směr stínování

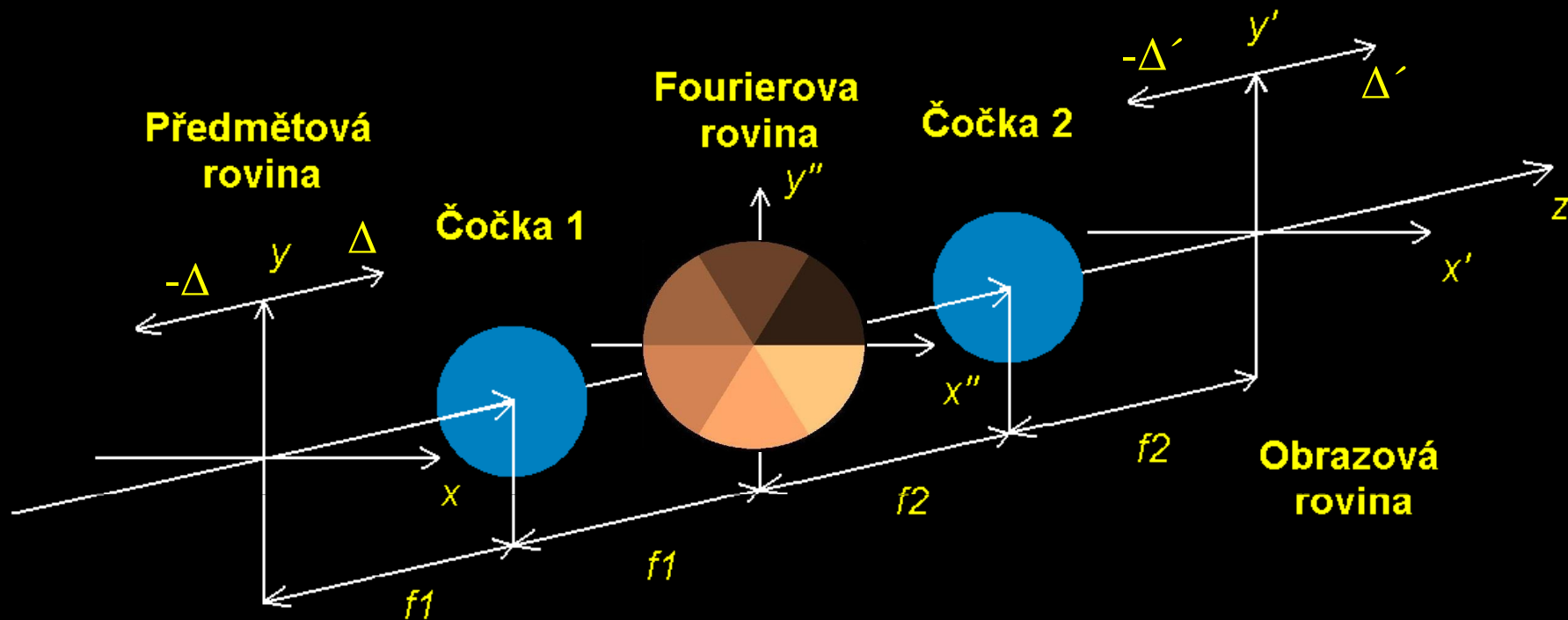


Rekonstrukce fázového předmětu



Bernet S., Jesacher A., Fürhapter S., Maurer C., Ritsch-Marte M., Quantitative imaging of complex samples in spiral phase contrast microscopy, *Optics Express* 14, 3792, 2006

Defokuzace a diskretizace fazové masky



Diskretizace fazové masky

Spojité masky je nahrazena maskou s diskrétními úrovněmi

Defokuzace

Předmětová rovina je posunuta o vzdálenost Δ od ohniska čočky 1

Obrazová rovina je posunuta o vzdálenost Δ' od ohniska čočky 2

Jakým způsobem hodnotíme efekty defokuzace a diskretizace fázové masky?

Počítáme PSF zobrazovacího systému

PSF – bodová rozptylová funkce – obraz bodového zdroje

Propustnost předmětu – $t_A(x,y) = \delta(x-x_0,y-y_0)$; x_0, y_0 – souřadnice bodového zdroje

Jaké uvažujeme matematické předpoklady?

Gaussovská obálka ve fourierově rovině - $t_G = \exp[-r'^2/w^2]$; w – pološířka gaussovské obálky

Propustnost diskrétní masky je možno vyjádřit pomocí fourierovy série; $t_S = \sum c_m \exp[im\varphi']$

Výsledky výpočtů

$$U'(r',\varphi') = \text{konst.} * (\beta/\alpha^{3/2}) * \exp(-\gamma) * \sum_m c_m i^{|m|} * \exp(im\varphi') * [I_{1/2|m|-1/2}(\gamma) - I_{1/2|m|+1/2}(\gamma)]$$

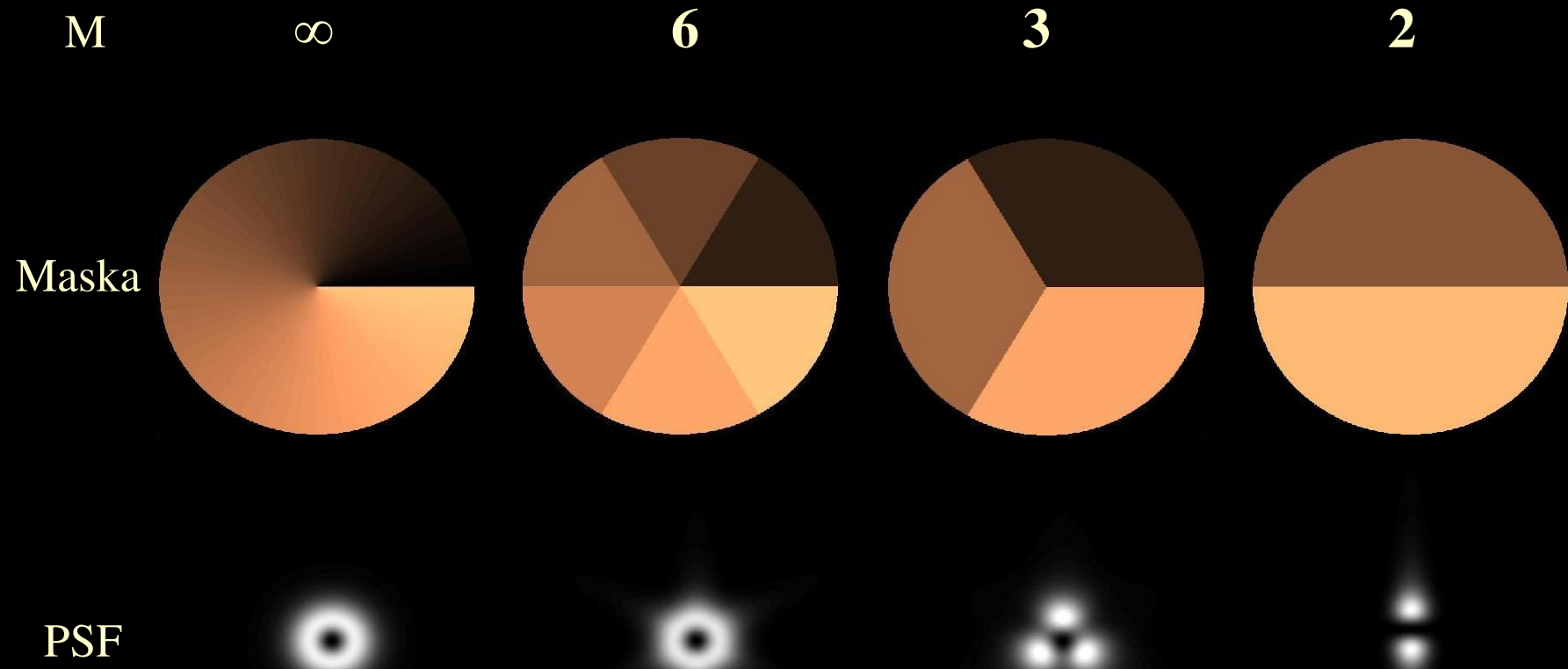
$$\gamma = \beta^2/8\alpha; \beta = 2\pi r'/\lambda f_2; \alpha = 1/w^2 + i\pi\Delta/\lambda f_1^2;$$

I – modifikovaná besselova funkce

PSF v případě zaostřeného systému

Zaostřený systém – $\Delta' = (f_2/f_1)^2 * \Delta$

M – počet úrovní masky



PSF v případě nezostřeného systému

Nezostřený systém - $\Delta \neq 0, \Delta' = 0$

$\Delta < 0$

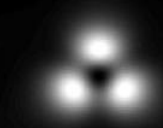
$\Delta = 0$

$\Delta > 0$

$M \rightarrow \infty$



$M = 3$



Při použití diskrétní masky dochází v závislosti na defokuzaci k rotaci PSF

Rotace PSF – $M = 3$

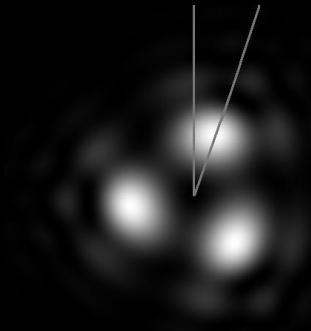
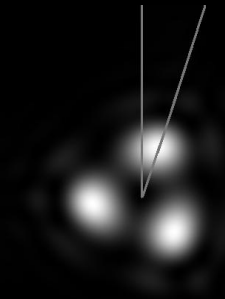
Defokuzace

0

Δ

2Δ

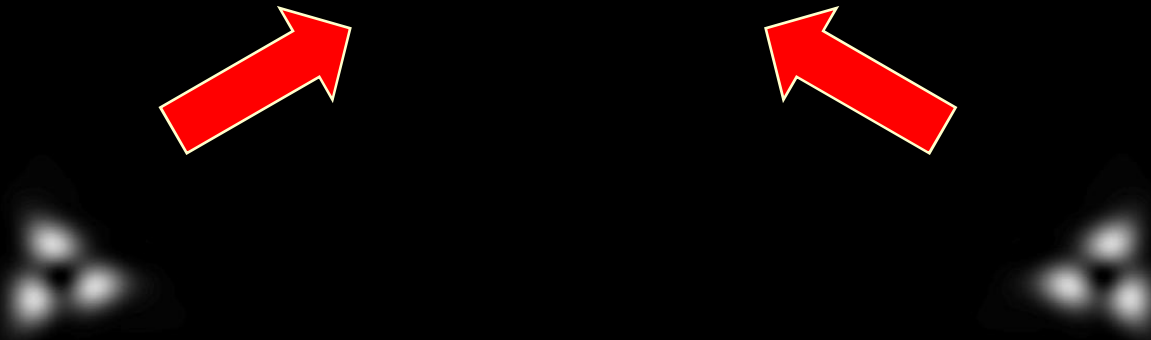
3Δ



Úhel rotace se mění nejrychleji pro malé hodnoty defokuzace
Pro větší hodnoty defokuzace rotace ustává – PSF pouze expanduje

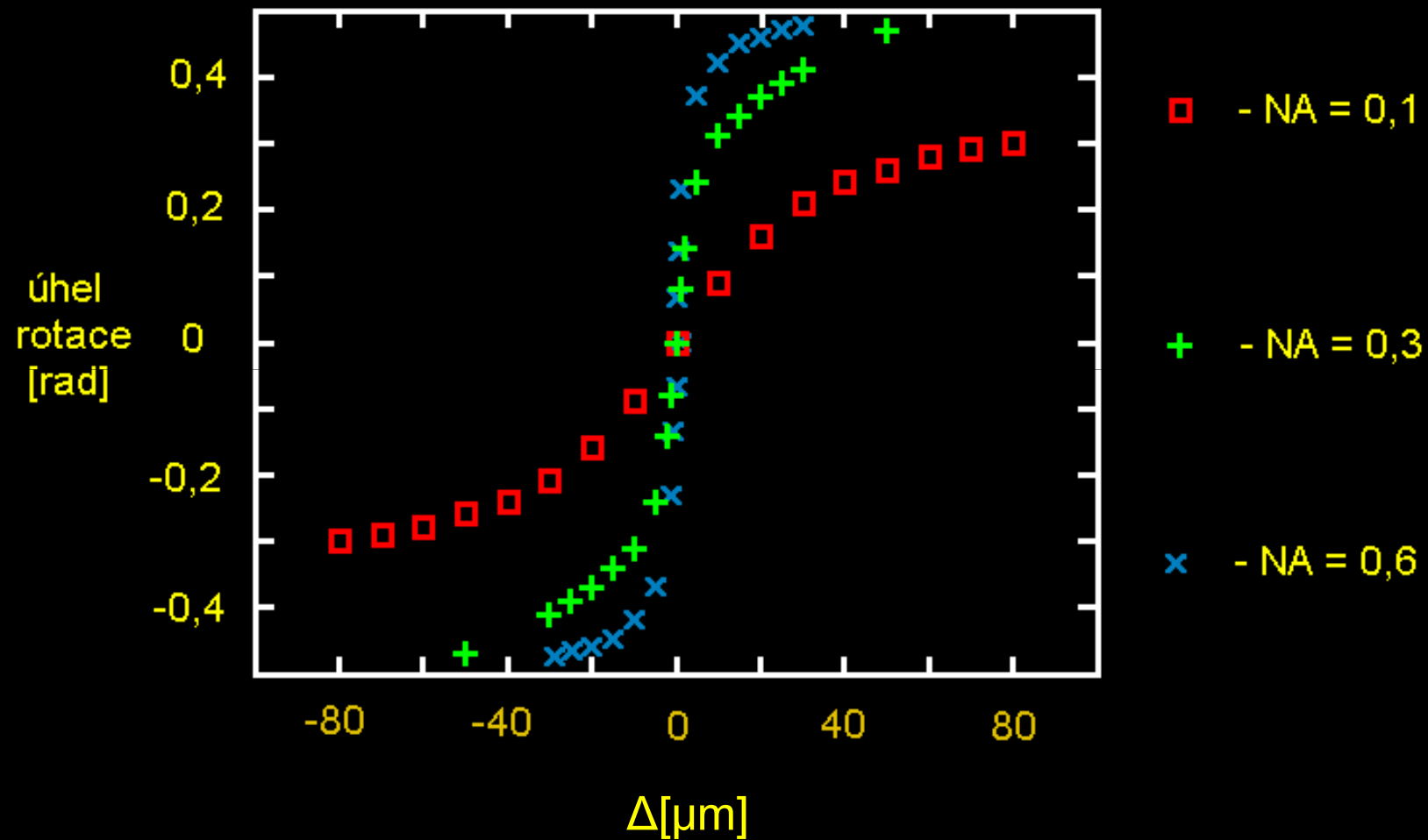
Jak určit úhel rotace PSF?

k – korelační koeficient

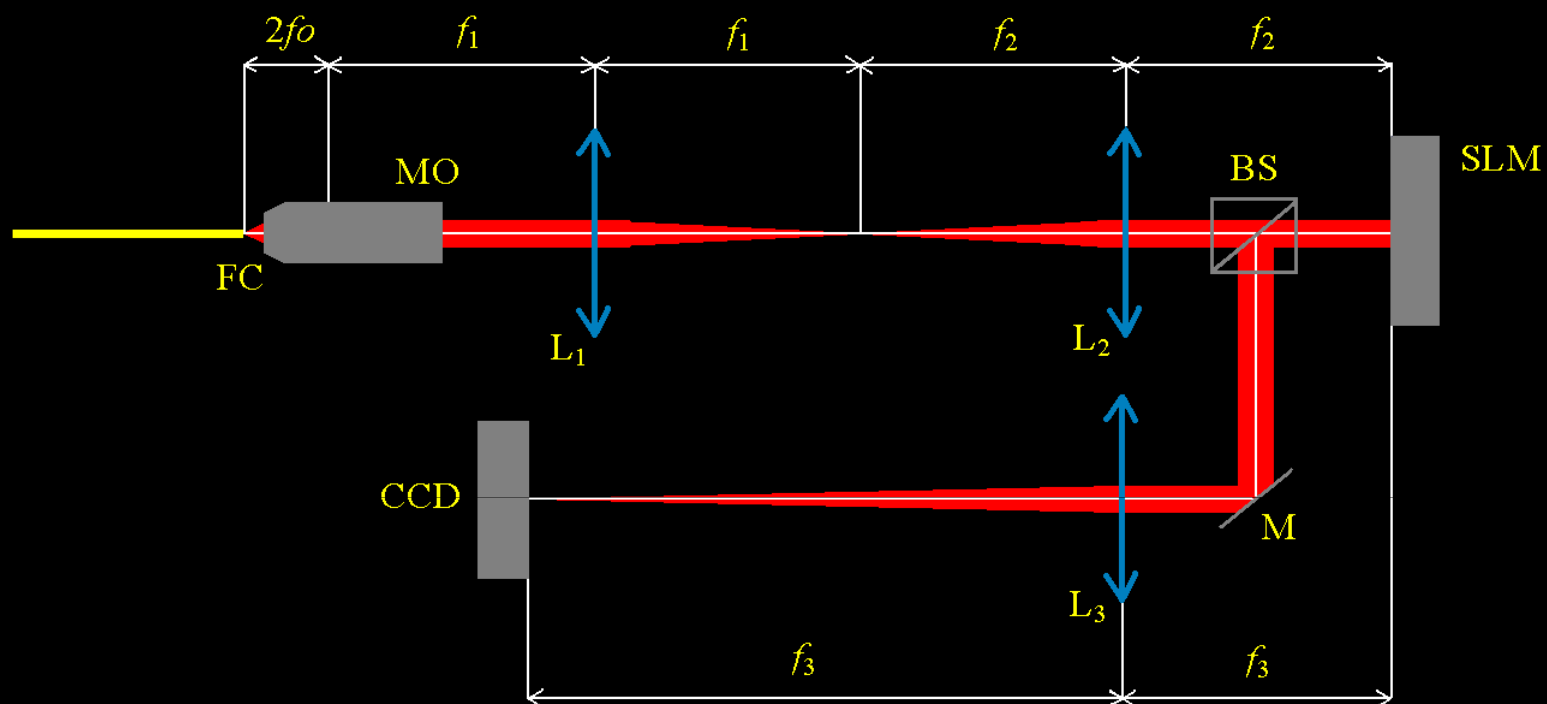


1. Pro danou velikost defokuzace Δ spočítáme PSFs pro zápornou a kladnou defokuzaci
2. Obě PSF mají stejný tvar, ale jsou otočené o úhel s opačným znaménkem
3. Spočítáme korelační koeficient k mezi oběma PSF
4. Poté obě PSF otáčíme po malých krocích o opačný úhel
5. Pro každý úhel otočení spočítáme korelační koeficient k mezi PSFs
6. Úhel otočení, kterému odpovídá největší hodnota korelačního koeficientu označíme za úhel rotace PSF pro danou hodnotu defokuzace

Závislost úhlu rotace na defokuzaci



Experiment



He-Ne laser(10mW, 632,8nm); FC – čelo vlákna(průměr jádra $4\mu\text{m}$);
MO – mikroobjektiv(Melles Griot-OVI, 50X, NA = 0,55, $f_0 = 4\text{mm}$);
SLM – Hamamatsu x 10468(800x600px); M – zrcátko; BS – dělič svazku;
 L_1, L_2, L_3 - čočky($f_1 = 200\text{mm}$, $f_2 = 200\text{mm}$, $f_3 = 400\text{mm}$)

Výsledky experimentu

$$\Delta < 0$$

$$\Delta = 0$$

$$\Delta > 0$$

Experiment



Teorie



Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazování

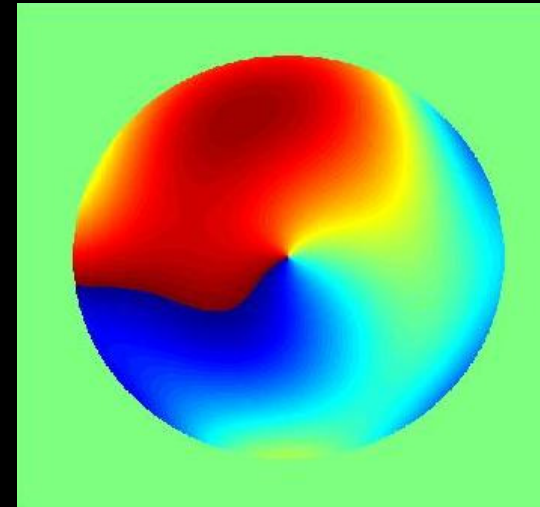
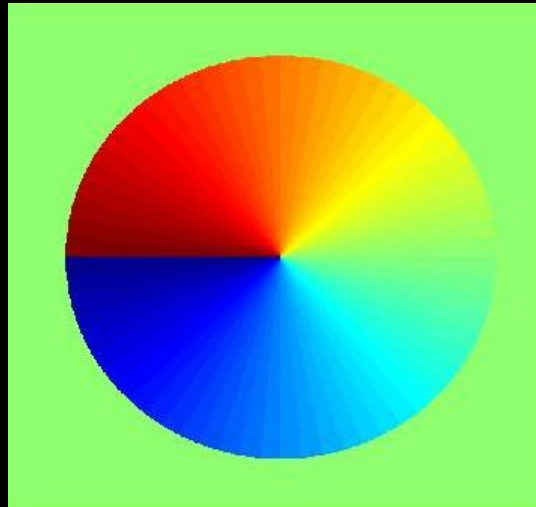
1. Prostorový fázový modulátor světla
2. Fázový modulátor jako prostorový filtr (Spirální fázový kontrast)
- 3. Fázový modulátor jako prvek umožňující korekci aberací**

Optické aberace

Ideální situace

Reálná situace

Fáze v rovině
modulátoru



Intenzita



Přítomnost optických aberací vede ke snížení kvality obrazu

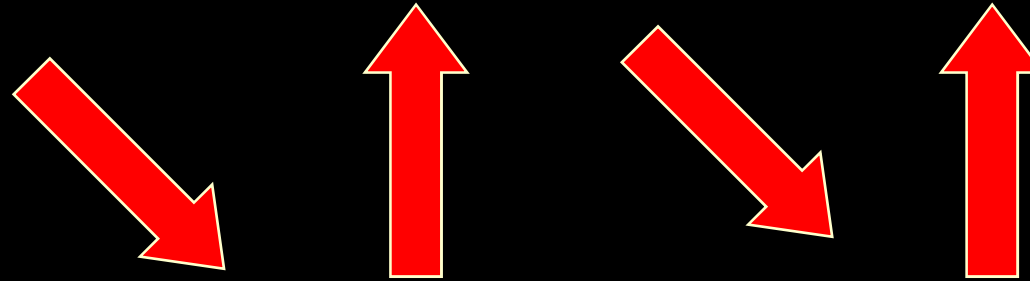
Pokud se podaří zjistit fázi v rovině modulátoru, lze provést zpětnou korekci aberací

Výpočet vlnoplochy v rovině modulátoru

$$u_1 = \sqrt{I_1} \exp(i\theta_1)$$

$$u_2 = \sqrt{I_2} \exp(i\theta_2)$$

...



$$U_2 = a_2 \exp(i\theta_2)$$

$$U_3 = a_3 \exp(i\theta_3)$$

Iterační algoritmus začíná v rovině 1

Algoritmus začíná naměřenou intenzitou I_1 a libovolnou fází θ_1

Pomocí programu pro volné šíření je spočítána komplexní amplituda v rovině 2

Pro další část algoritmu je použita spočítaná fáze θ_2

Spočítaná amplituda a_2 je nahrazena odmocninou naměřené intenzity I_2

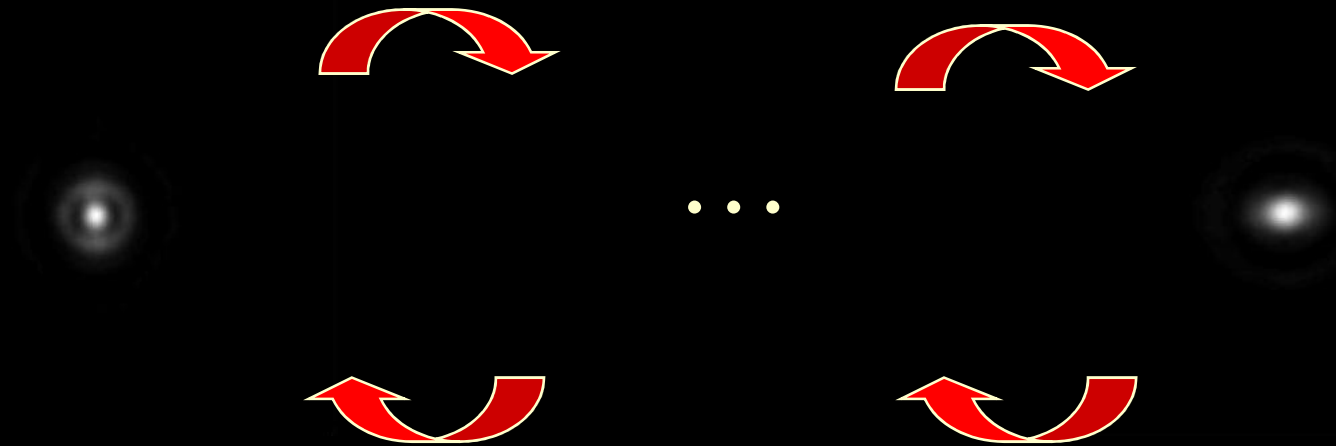
Algoritmus pokračuje volným šířením do roviny 3

Výpočet vlnoplochy v rovině modulátoru

I_1

$I \dots$

I_N



$$U_1 = \sqrt{I_1} \exp(i \theta_1)$$

Po několika iteracích je spočítána fáze v rovině 1 θ_1



Volné šíření z roviny 1 do roviny modulátoru

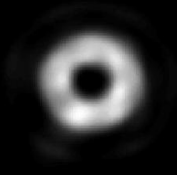
$$U = a \exp(i \theta)$$

θ – spočítaná fáze v rovině modulátoru

Experiment

Vortex vytvořený fázovým modulátorem

Rovina 1



Rovina 2



Bez korekce

Po první korekci

Po druhé korekci

Simulace

Cíle

- Postavit sestavu pro spirální fázový kontrast a provést rekonstrukci reálného fázového předmětu
- Pokračovat v analýze rotující PSF, nalézt analytické vyjádření pro úhel rotace
- Provést analýzu různých metod korekce aberací využívajících prostorového modulátoru světla

Děkuji za pozornost