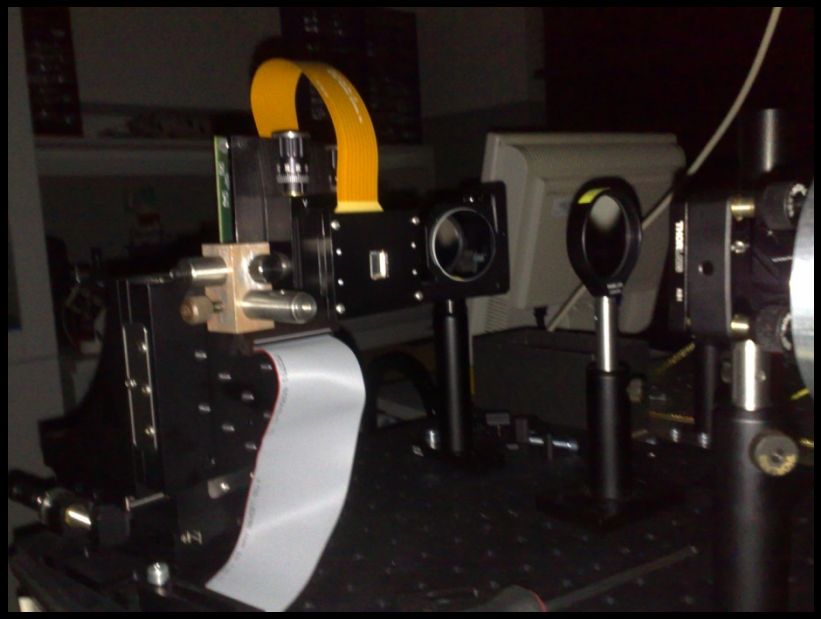
evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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 zobrazovaní

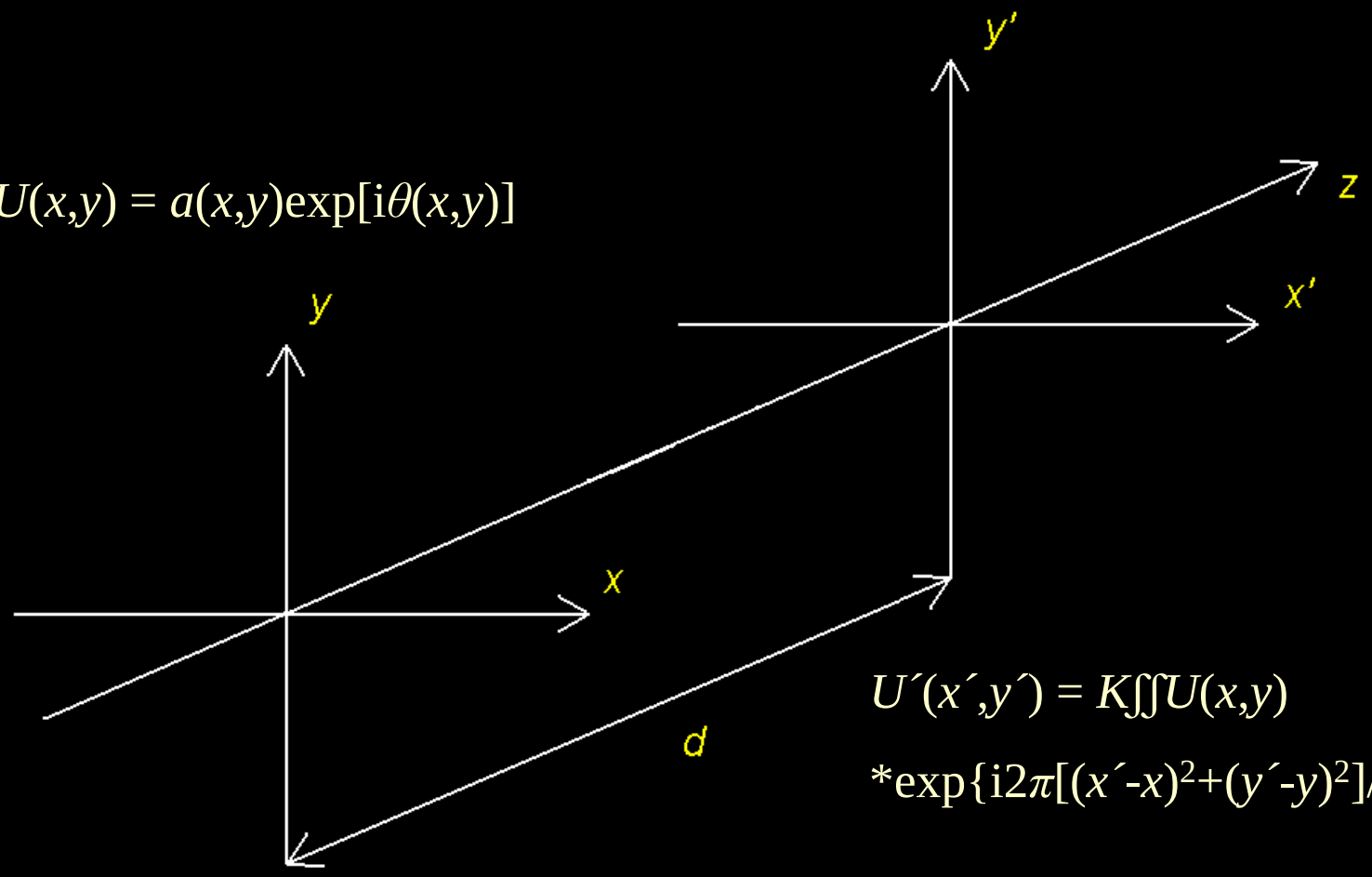
1. **Prostorový fázový modulátor světla**

2. Fázový modulátor jako prostorový filtr (Spirální fázový kontrast)

3. Fázový modulátor jako prvek umožňující korekci aberací

Prostorová fázová modulace

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

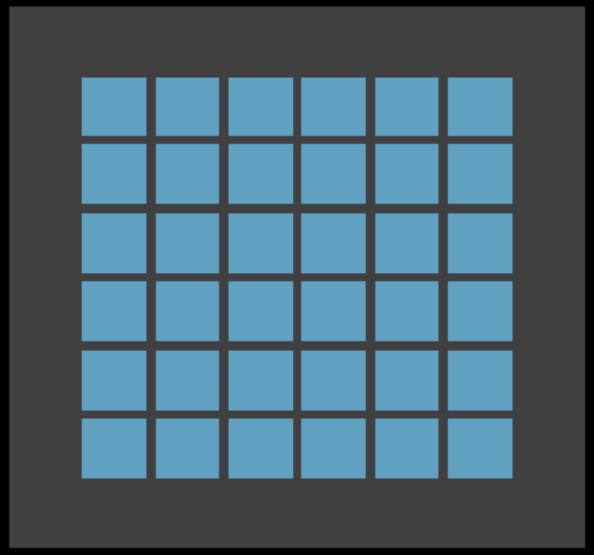


$U'(x',y') = K\iint U(x,y)$

$*\exp\{i2\pi[(x'-x)^2+(y'-y)^2]/\lambda d\}dxdy$

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

Prostorový fázový modulátor světla



Prostorový modulátor – displej z kapalných krystalů

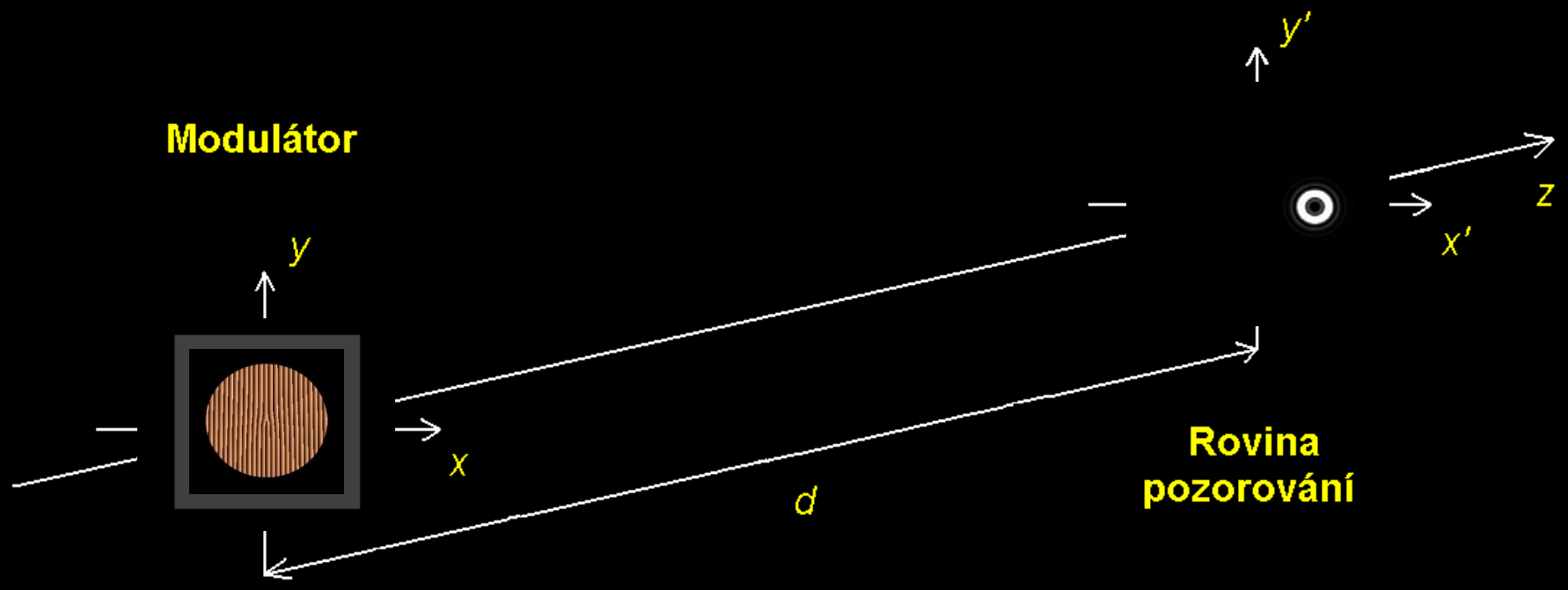
Velikost napětí přivedeného na jednotlivé pixely určuje hodnotu indexu lomu daného pixelu

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



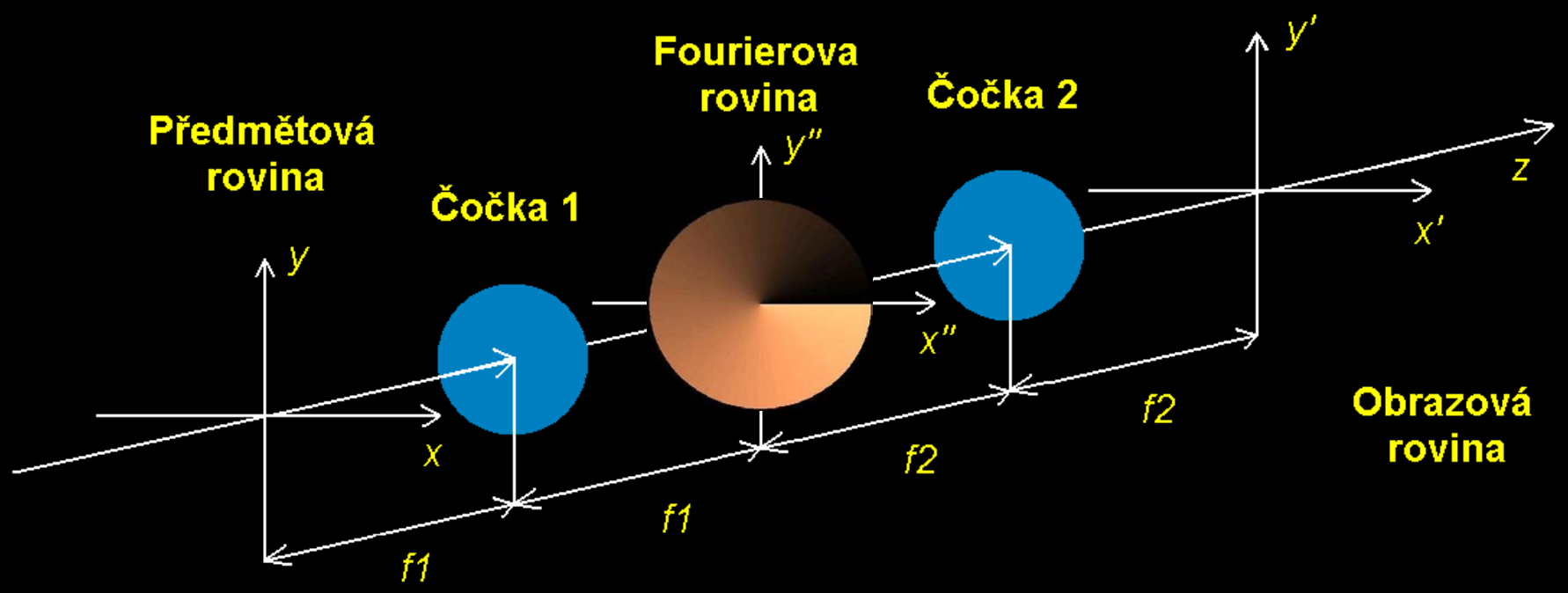
Fázový modulátor je osvětlen rovinnou vlnou šířící se ve směru osy z

Jednotlivé hologramy

Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazovaní

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

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

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

Propustnost v centru singulární masky

Centrem masky prochází nulová prostorová frekvence spektra předmětu

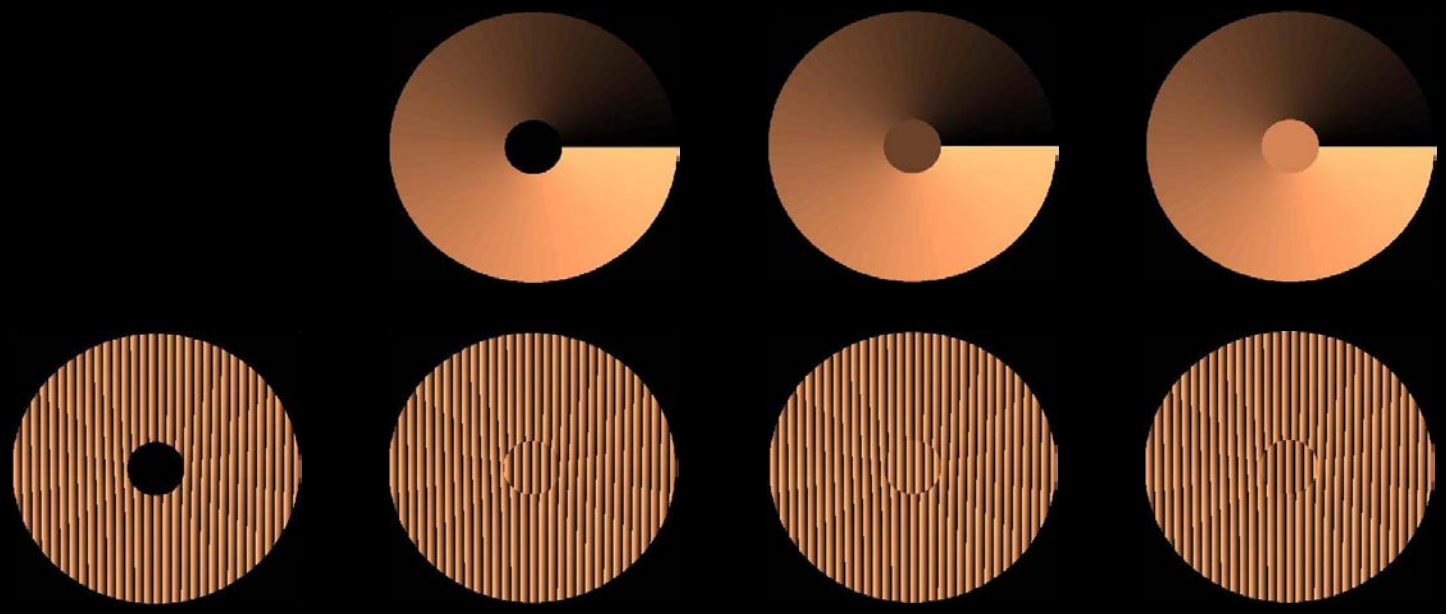
V obrazové rovině je nulová prostorová frekvence reprezentována rovinnou vlnou šířící se ve směru osy z

Propustností v centru masky lze ovlivnit fázi této rovinné vlny

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

Maska

Fázový hologram



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

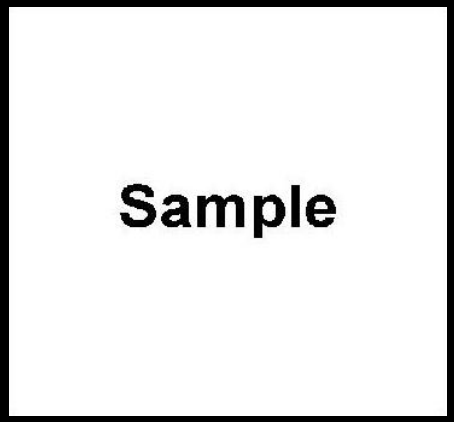
Sledované typy předmětů

Předmět 1 – amplitudový

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

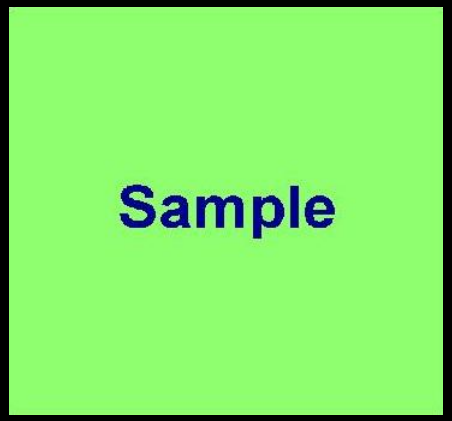
Předmět 2 – amplitudový

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



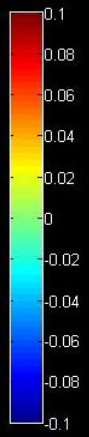
Předmět 3 – fázový

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

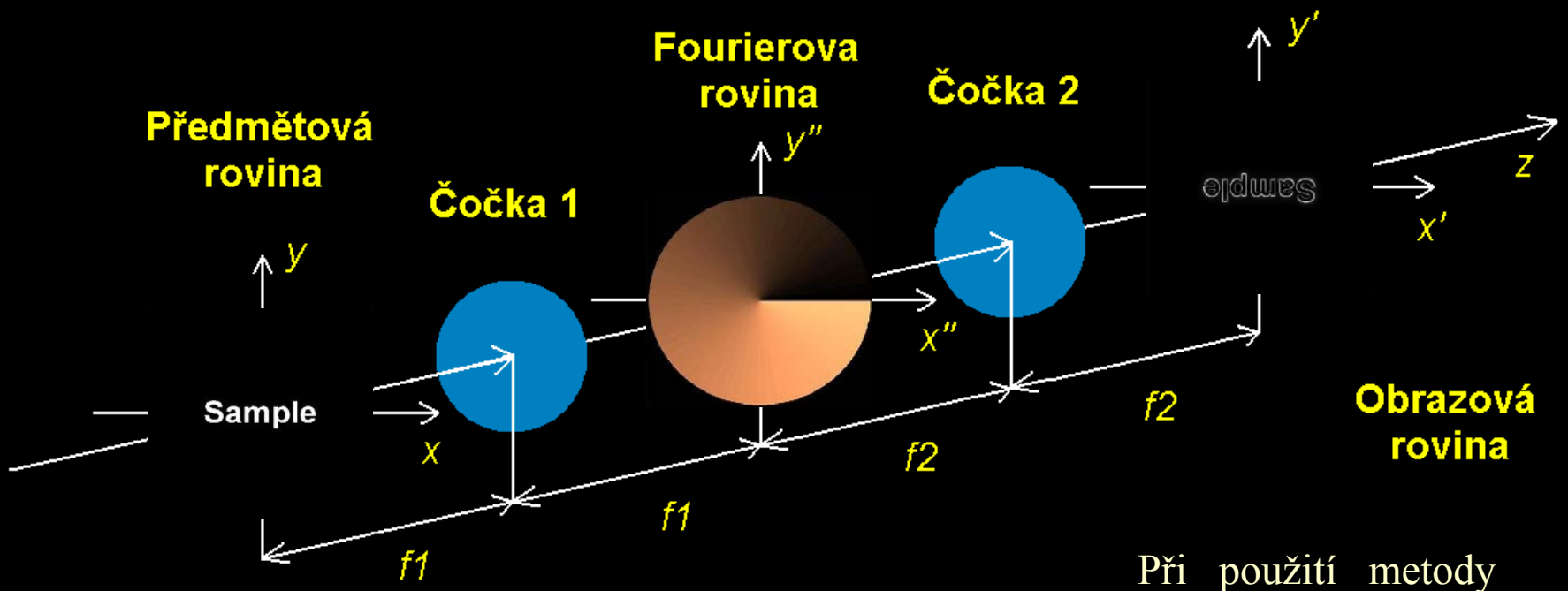


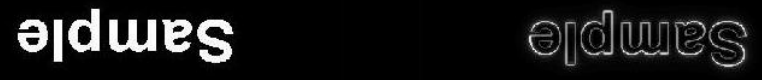
Předmět 4 – fázový

z/λ



Obraz – amplitudový předmět 1





Bez spirálního filtru

Se spirálním filtrem

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.

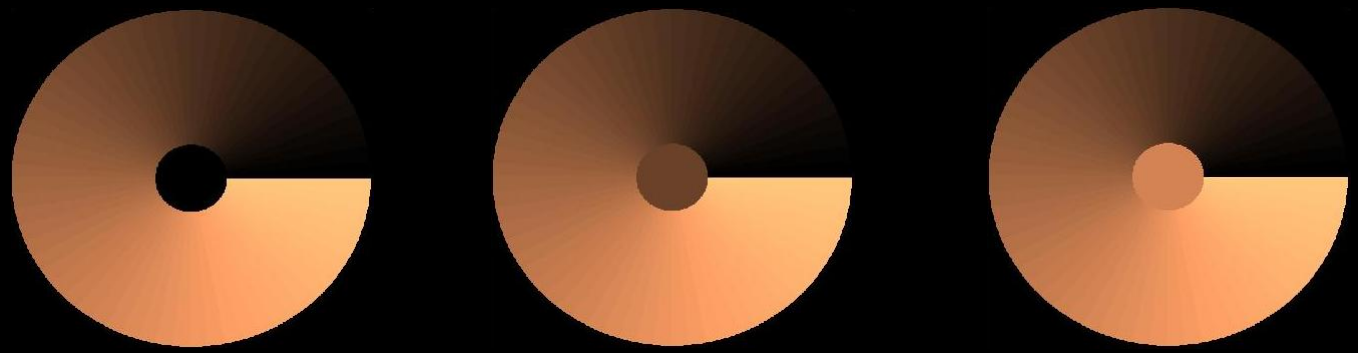
Obraz různých předmětů

	Amplitudový předmět 2	Fázový předmět 3	Fázový předmět 4
Obraz			
Směr stínování	↓	→	←

Podle směru stínování lze určit typ zobrazovaného předmětu

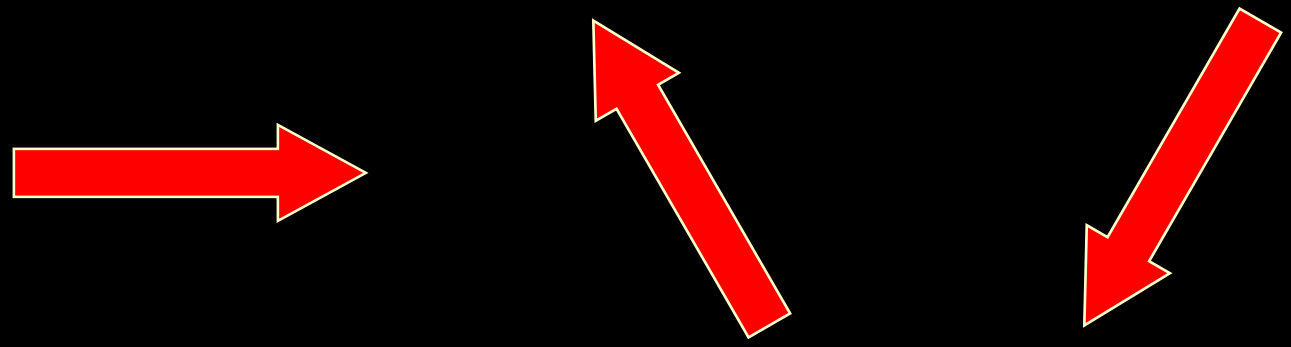
Fázový předmět 3 – různé druhy masky

Maska

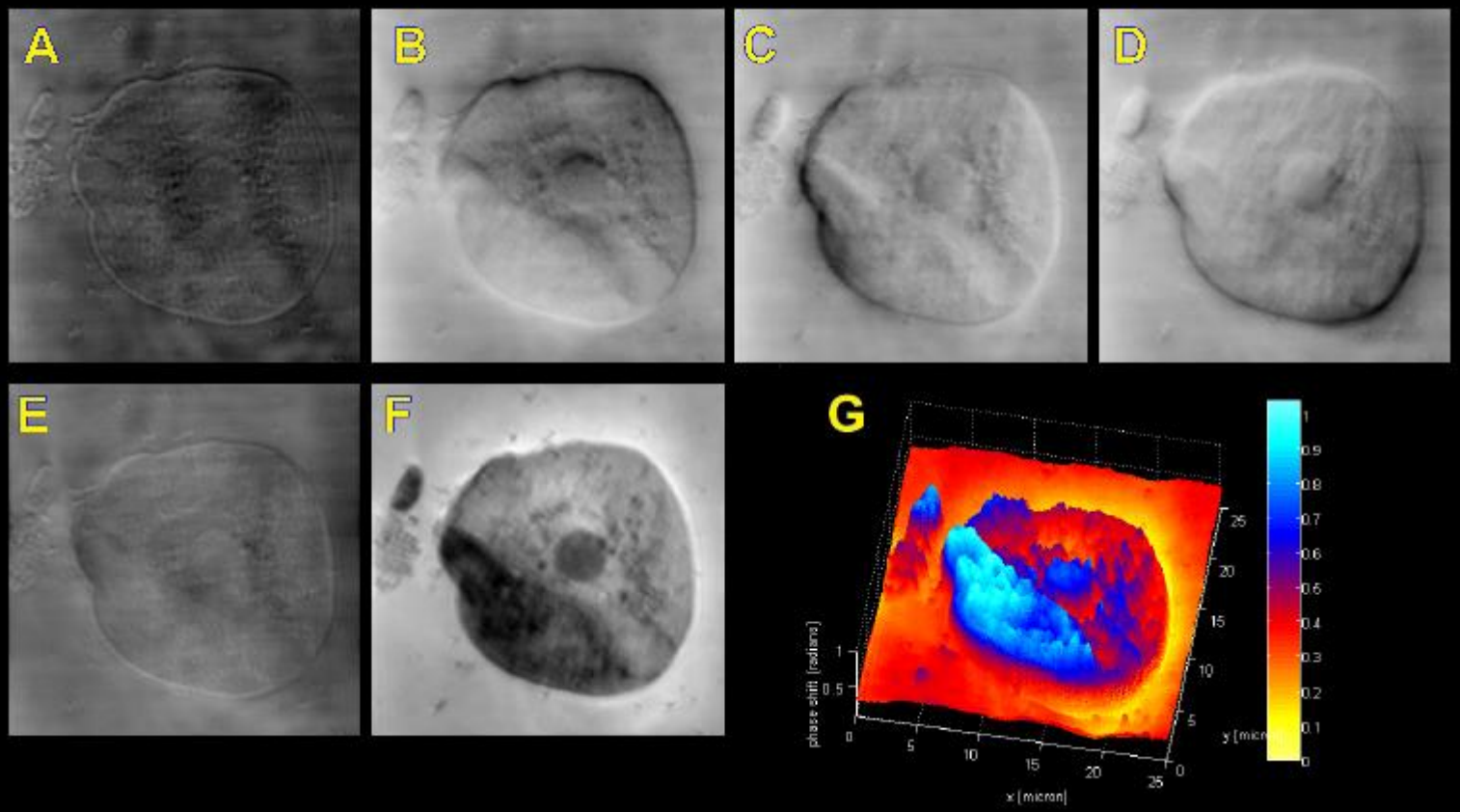


Obraz

Směr stínování

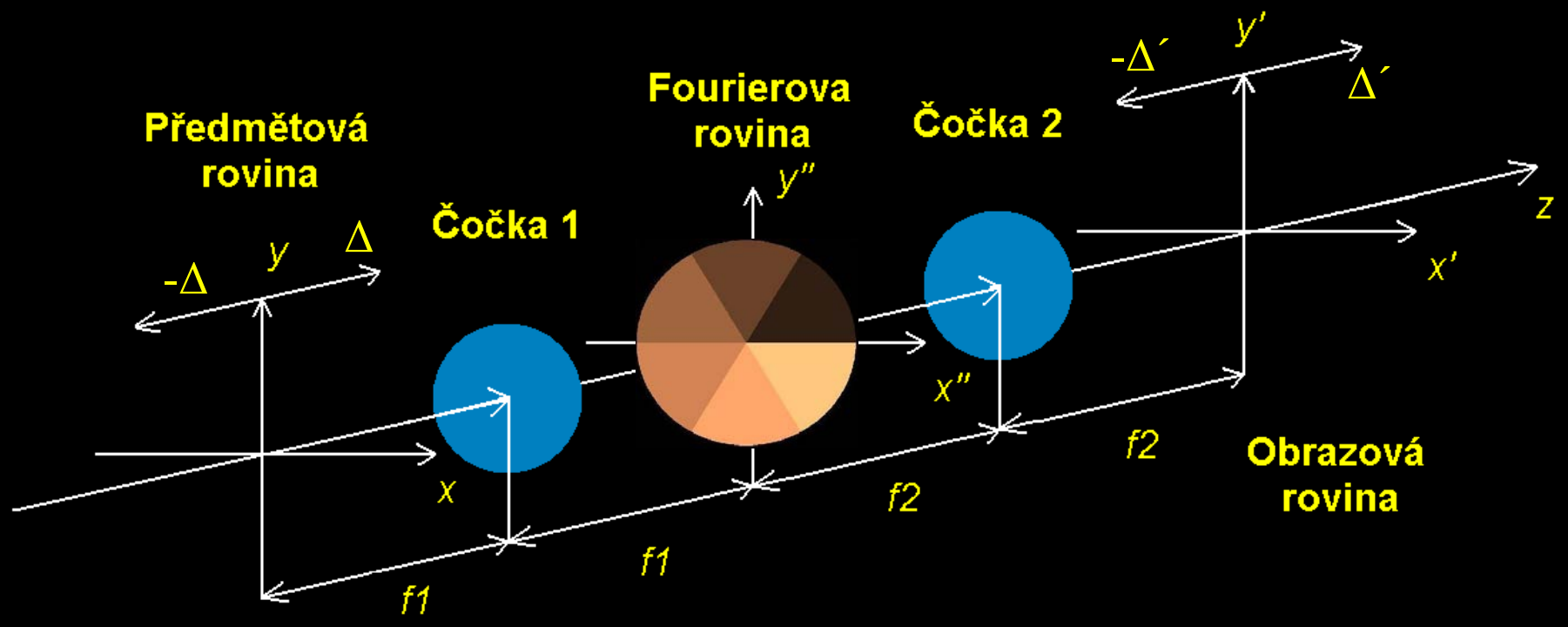


Rekonstrukce fázového předmětu



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 diskrétizace fázové masky



Diskrétizace fázové masky

Spojitá maska 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 diskrétizace 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

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

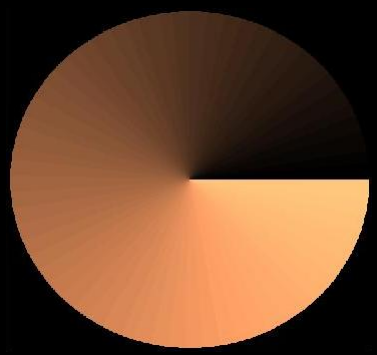
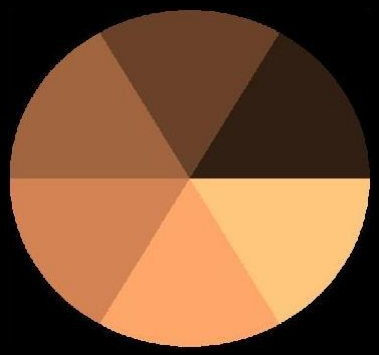
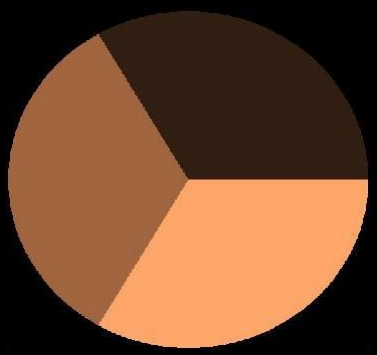
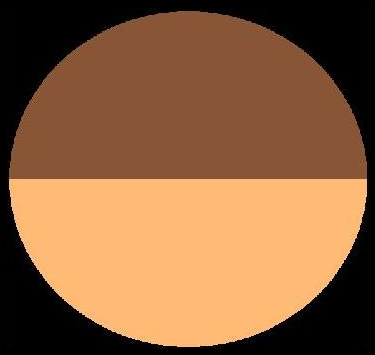
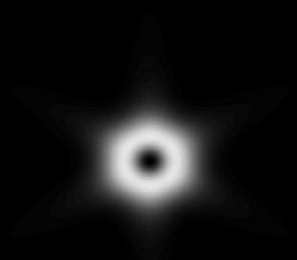
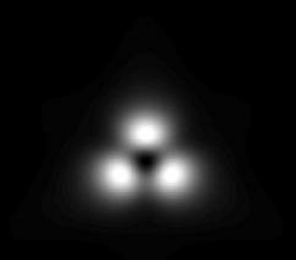
$\gamma = \beta^2/8\alpha$; $\beta = 2\pi r'/\lambda f_2$; $\alpha = 1/w^2 + i\pi\Delta/\lambda f_1^2$;

I – modifikovaná besselova funkce

PSF v případě zaostřeného systému

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

M – počet úrovní masky

M	∞	6	3	2
Maska				
PSF				

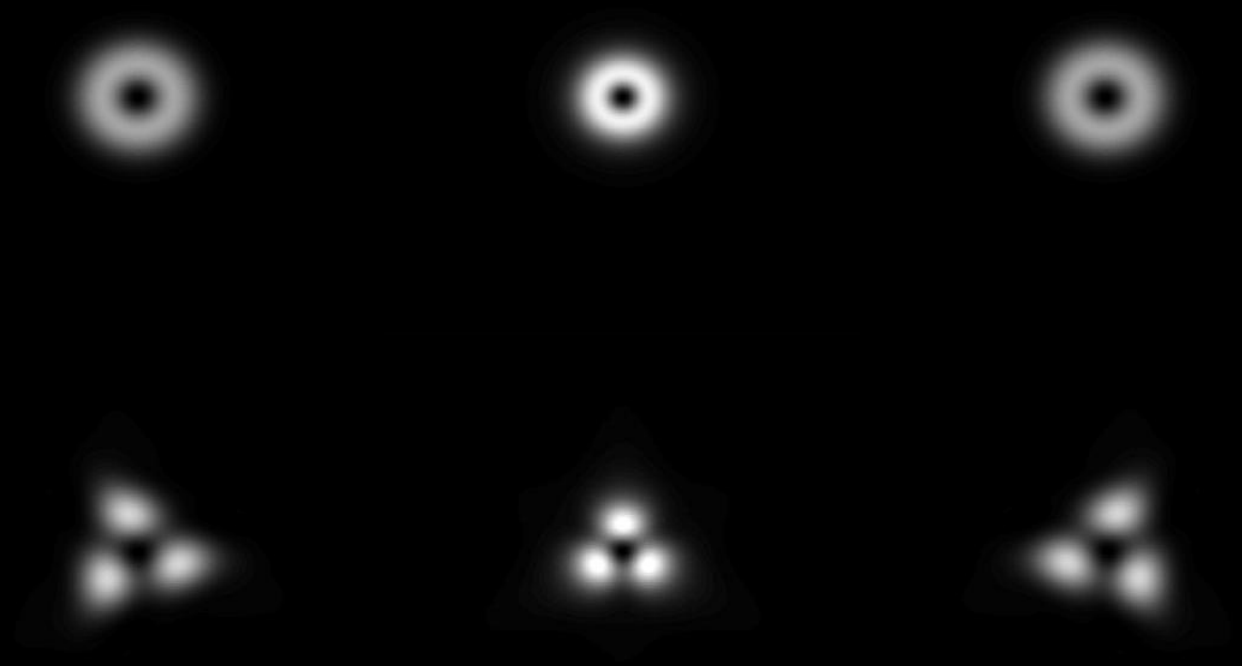
PSF v případě nezostřeného systému

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

$\Delta < 0$ $\Delta = 0$ $\Delta > 0$

$M \rightarrow \infty$

$M = 3$

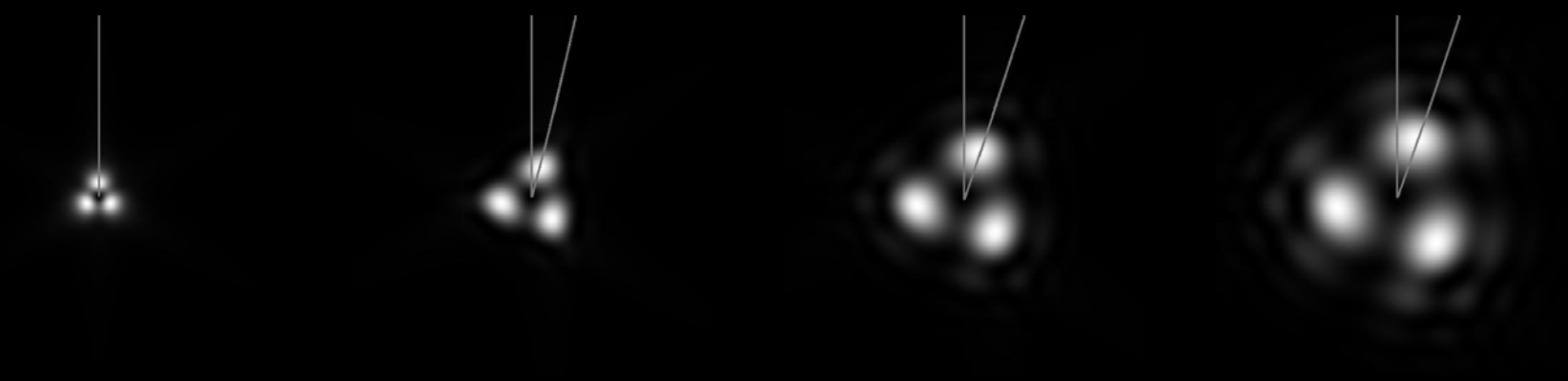


Při použití diskrétní masky dochází v závislosti na defokuzaci k rotaci PSF

Rotace PSF – $M = 3$

Defokuzace

0 Δ 2Δ 3Δ

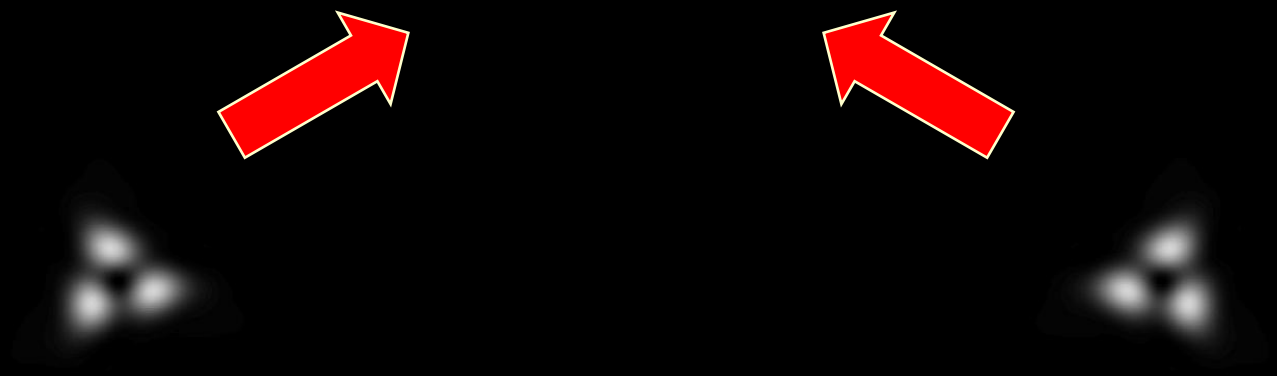


Úhel rotace se mění nejrychleji pro pro malé hodnoty defokuzace

Pro větší hodnoty defokuzace rotace ustává – PSF pouze expanduje

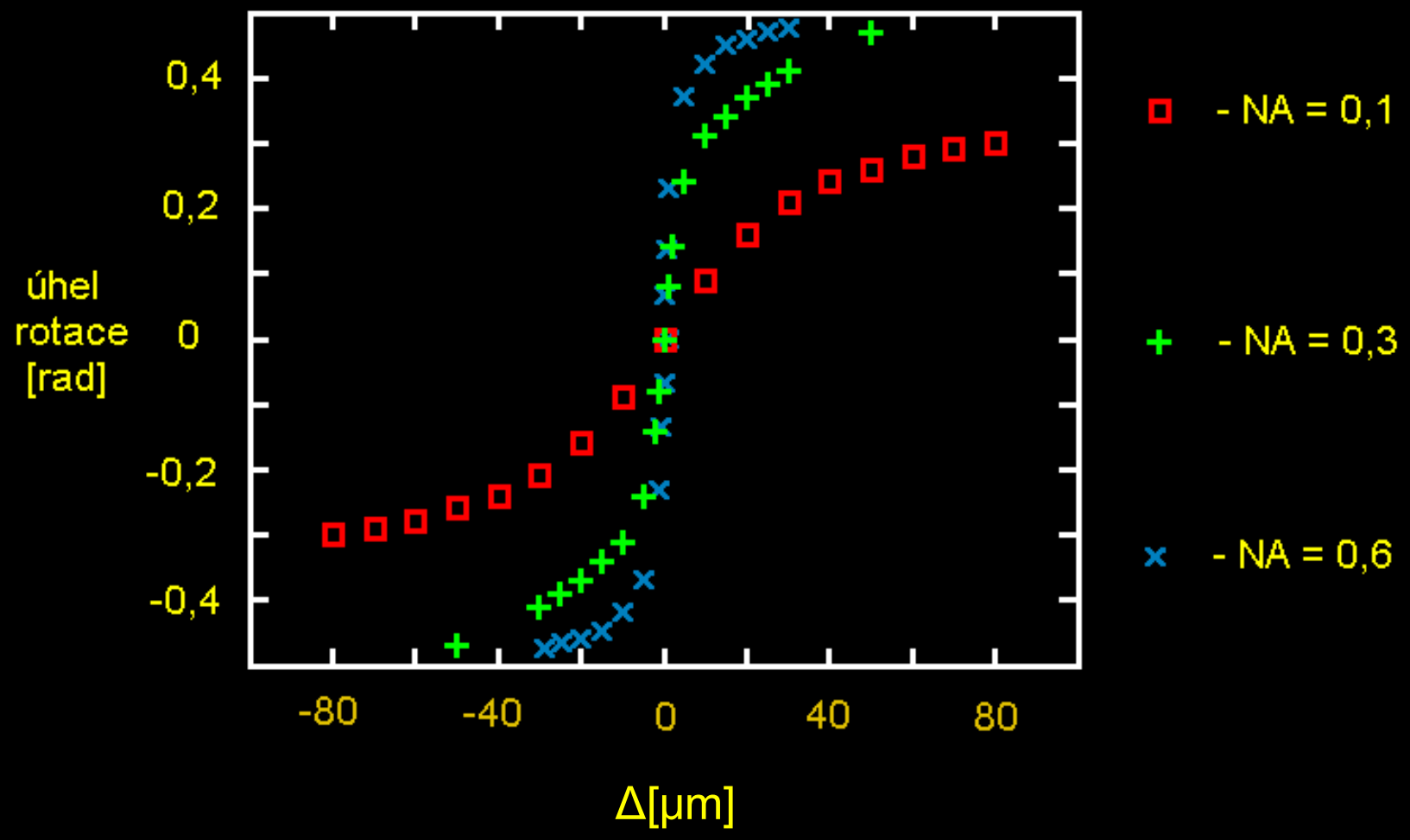
Jak určit úhel rotace PSF?

k – korelační koeficient

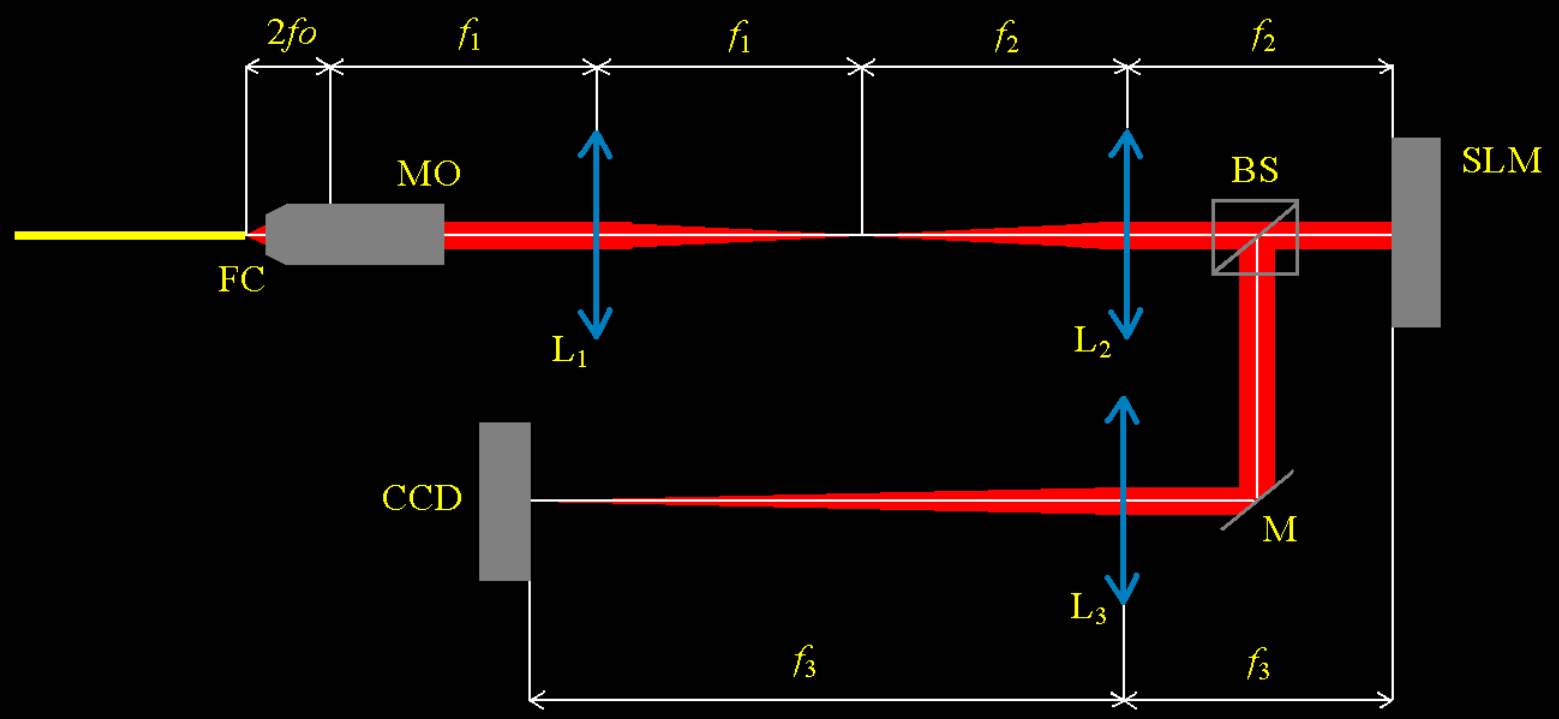


1. Pro danou velikost defokuzace Δ spočítáme PSFs pro zápornou a kladnou defokuzaci
2. Obě PSF mají stejný tvar, ale jsou otočené o úhel s opačným znaménkem
3. Spočítáme korelační koeficient *k* mezi oběma PSF
4. Poté obě PSF otáčíme po malých krocích o opačný úhel
5. Pro každý úhel otočení spočítáme 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



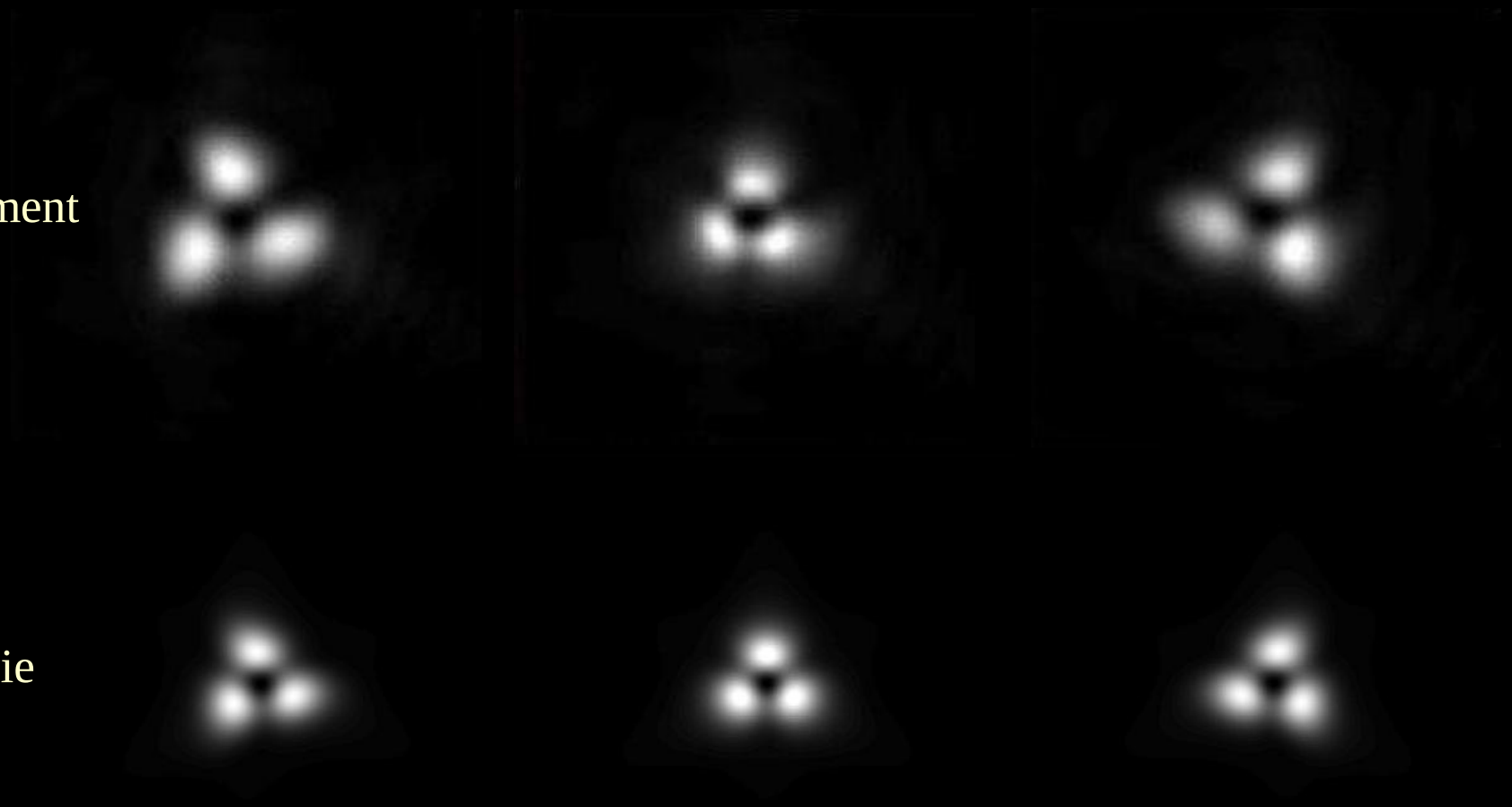
He-Ne laser(10mW, 632,8nm); FC – čelo vlákna(průměr jádra 4μm);
MO – mikroobjektiv(Melles Griot-OVI, 50X, NA = 0,55, f_0 = 4mm);
SLM – Hamamatsu x 10468(800x600px); M – zrcátko; BS – dělič svazku;
L_1, L_2, L_3 - čočky(f_1 = 200mm, f_2 = 200mm, f_3 = 400mm)

Výsledky experimentu

$\Delta < 0$ $\Delta = 0$ $\Delta > 0$

Experiment

Teorie



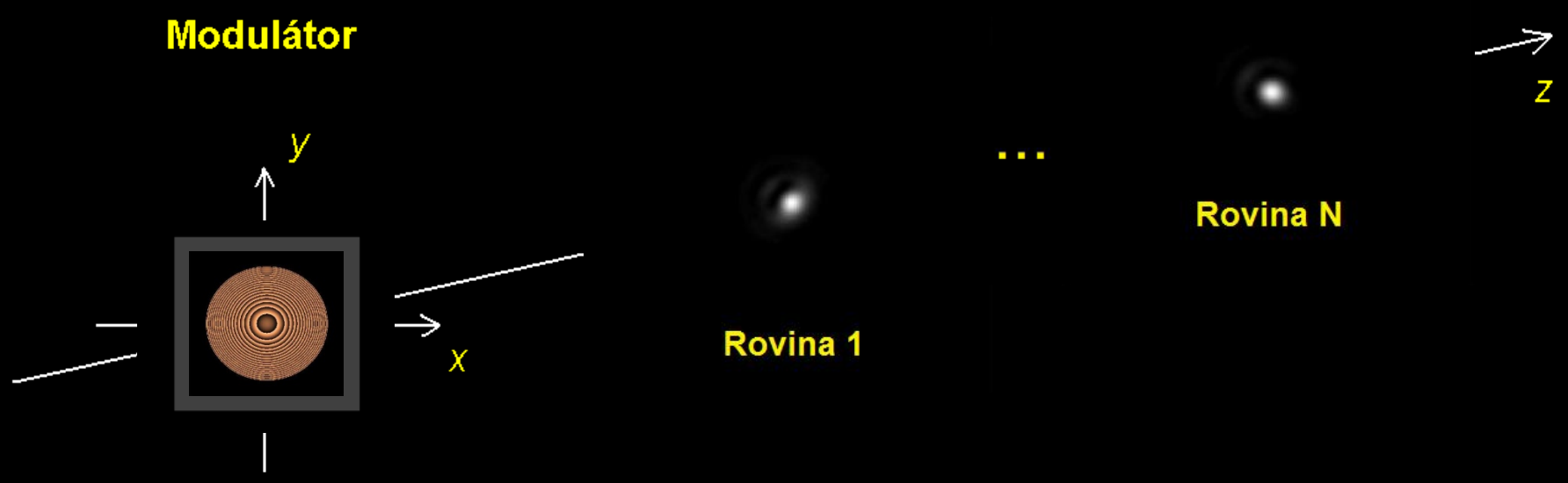
Využití prostorových fázových modulátorů světla v optickém zobrazovaní

1. Prostorový fázový modulátor světla

2. Fázový modulátor jako prostorový filtr (Spirální fázový kontrast)

3. **Fázový modulátor jako prvek umožňující korekci aberací**

Korekce aberací



Modulátor je osvětlen rovinnou vlnou šířící se ve směru osy z

V různých vzdálenostech od modulátoru jsou zaznamenány intenzitní obrazy

Ze zaznamenaných intenzitních snímků je spočítána vlnoplocha v rovině modulátoru

Pomocí fázového modulátoru jsou zkorigované případné aberace

Výpočet vlnoplochy v rovině modulátoru

u_1 = sqrt(I_1)*exp(i*θ_1) u_2 = sqrt(I_2)*exp(i*θ_2) …

U_2 = a_2*exp(i*θ_2) U_3 = a_3*exp(i*θ_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

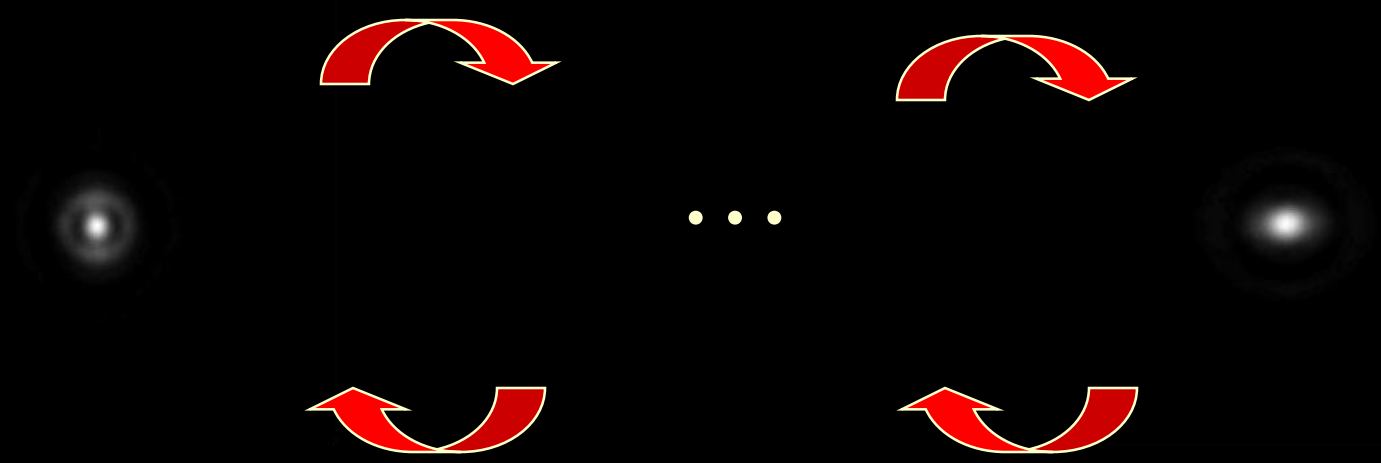
Pro další část algoritmu je použita spočítaná fáze θ_2

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 $I\ldots$ I_N



$U_1 = \mathrm{sqrt}(I_1)*\exp(i*\theta_1)$ Po několika iteracích je spočítána fáze v rovině 1 θ_1

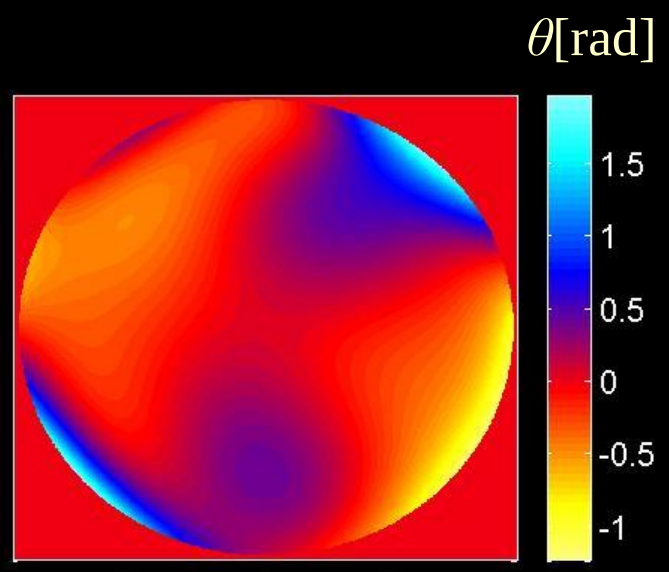
Volné šíření z roviny 1 do roviny modulátoru

$U = a*\exp(i*\theta)$ θ – spočítaná fáze v rovině modulátoru

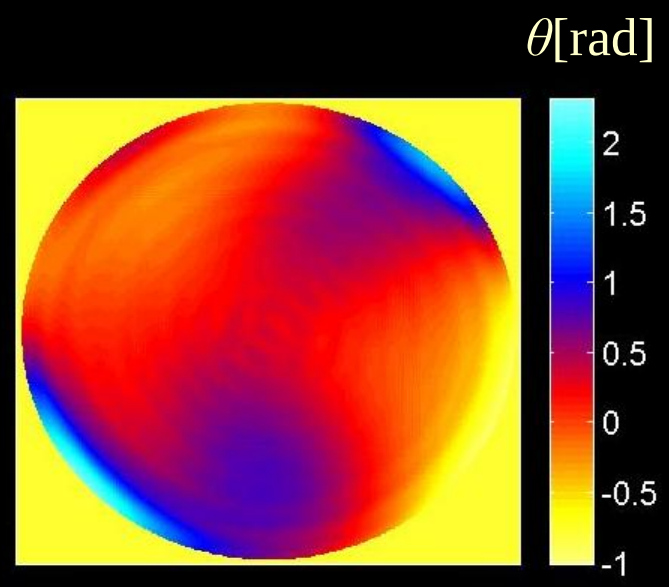
Numerické simulace - výsledky

Ke kvantitativnímu vyjádření aberací jsou využity Zernikeovy polynomy

Při numerických simulacích byly aberace uměle nastaveny

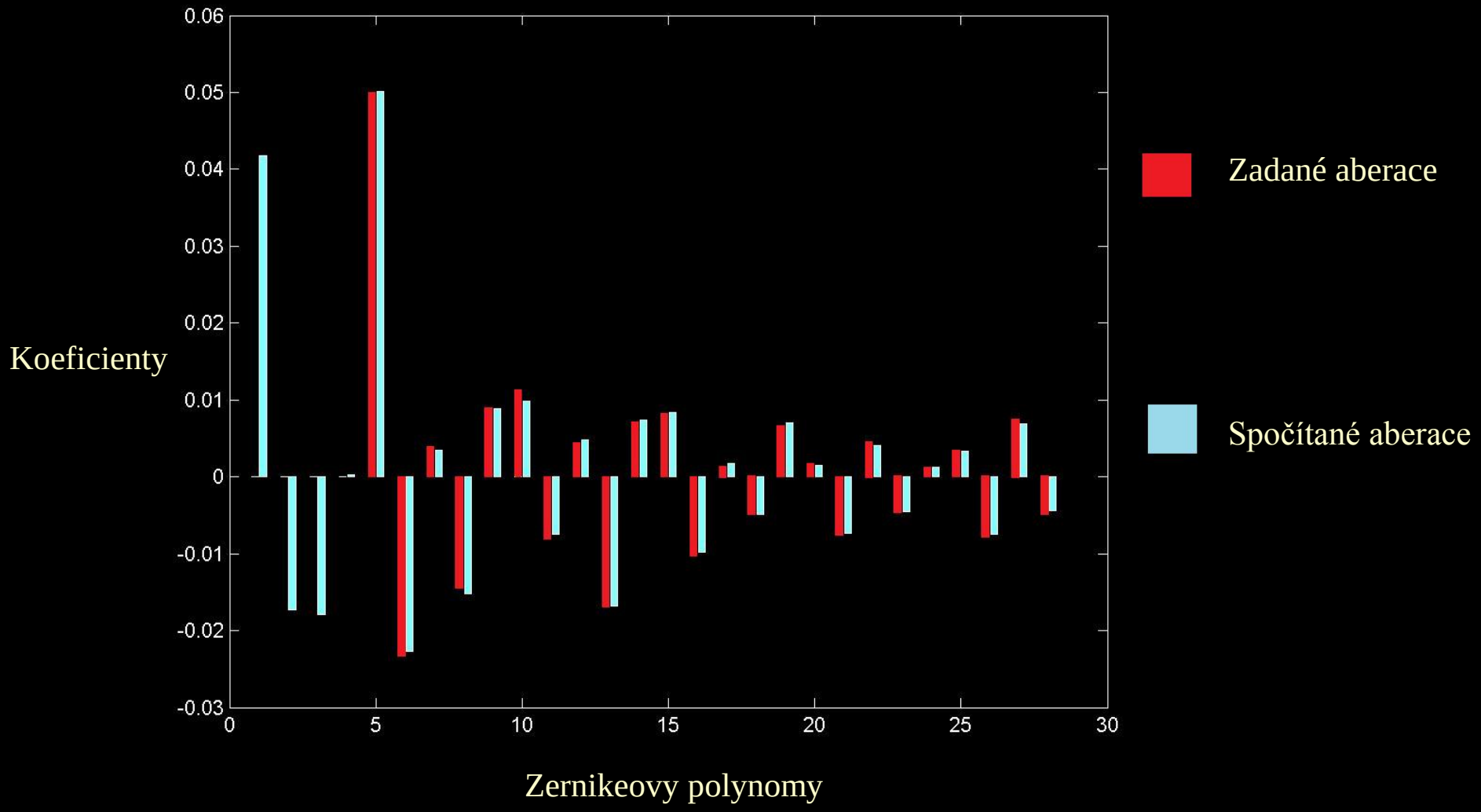


Zadaná aberační vlnoplocha



Spočítaná aberační vlnoplocha

Numerické simulace - výsledky



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 PSF pro spirální fázový kontrast v případě použití diskrétní masky
  - Analýza bodového fázového skoku
  - Analýza rozlišení dvou bodových fázových skoků

Děkuji za pozornost