

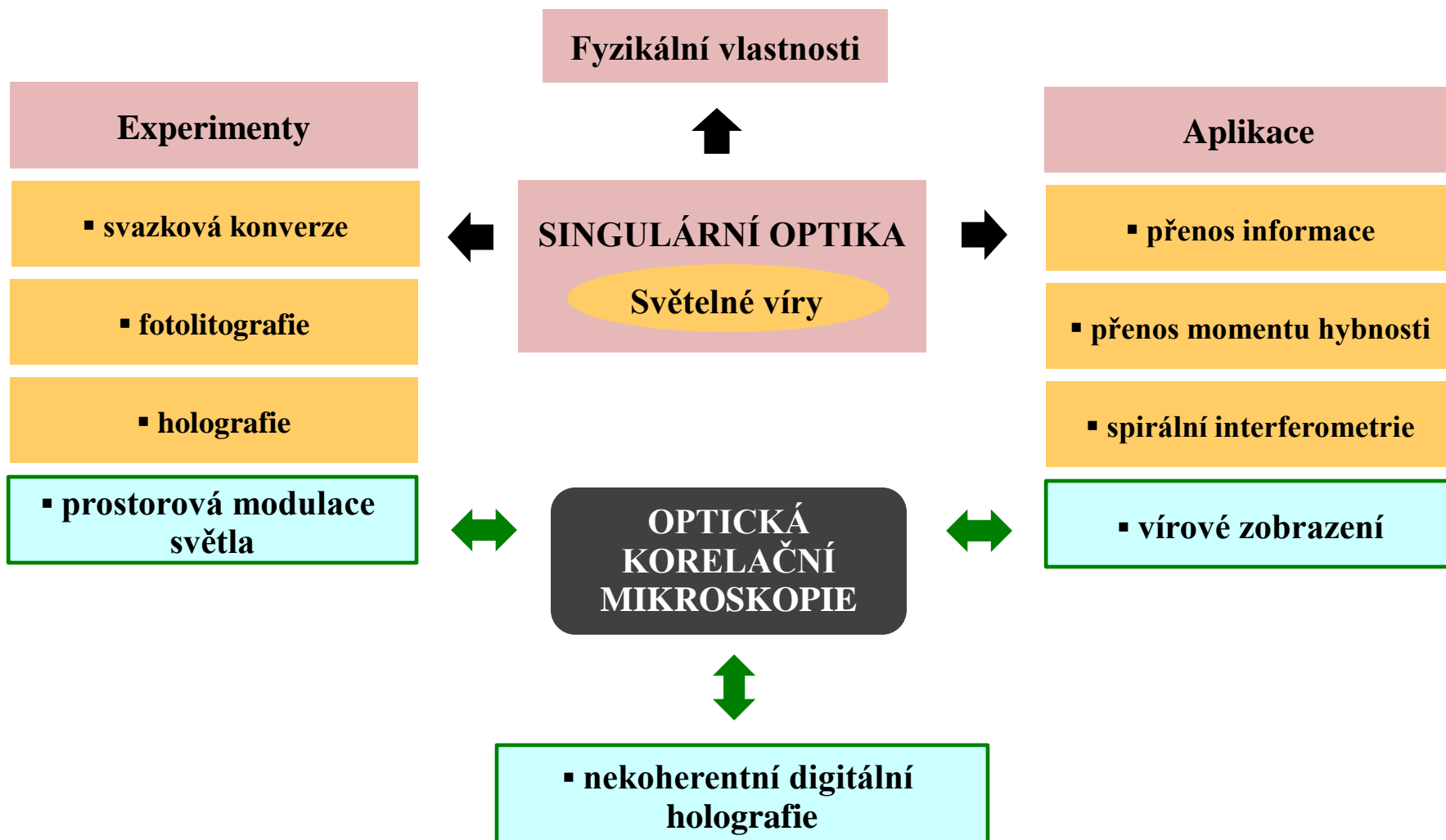
Využití principů singulární optiky a korelační holografie v optické mikroskopii

Zdeněk Bouchal



*Katedra optiky, PŘF UP Olomouc, 17 listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc
Centrum digitální optiky TA ČR*

Obsah



Singulární optika v historických souvislostech



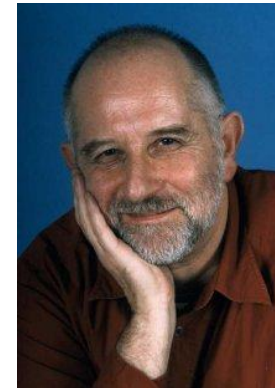
Proc. R. Soc. Lond. A. 336, 165–190 (1974)
Printed in Great Britain

Dislocations in wave trains

BY J. F. NYE AND M. V. BERRY

H. H. Wills Physics Laboratory, University of Bristol

(Communicated by F. C. Frank, F.R.S. – Received 17 January 1973)



Prof. M. Berry
University of Bristol

Prof. M. Soskin
Academy of Sciences of Ukraine



Prof. J. Nye
University of Bristol

Optické singularity

Orbitální moment hybnosti světla

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 45, NUMBER 11

1 JUNE 1992

Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes

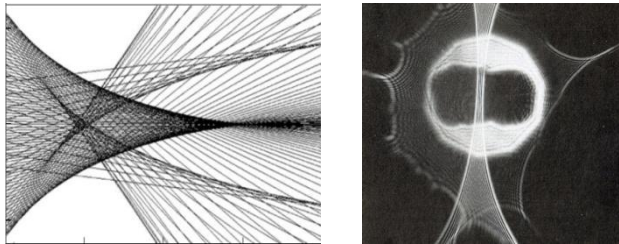
L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman
Huygens Laboratory, Leiden University, P.O. Box 9504, 2300 RA Leiden, The Netherlands
(Received 6 January 1992)



Prof. L. Allen
University of Glasgow

Klasifikace optických singularit

Paprskové singularity
(optické katastrofy)



Svazek paprsků lomených kapkou vody
(J. Nye)

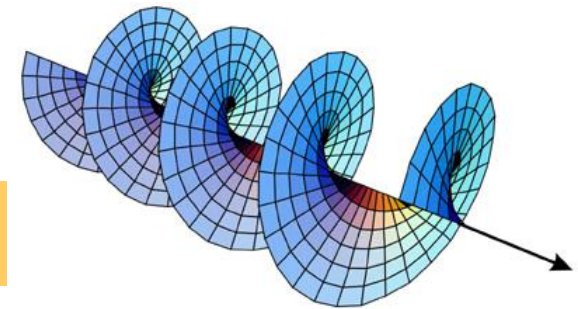
Fázové singularity



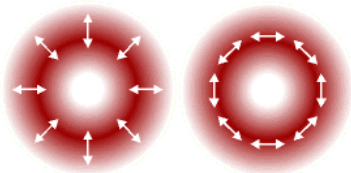
Hranové dislokace



Šroubovitě dislokace
(optické víry)



*M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov, Singular Optics,
Progress in Optics 42, 219, 2001.*

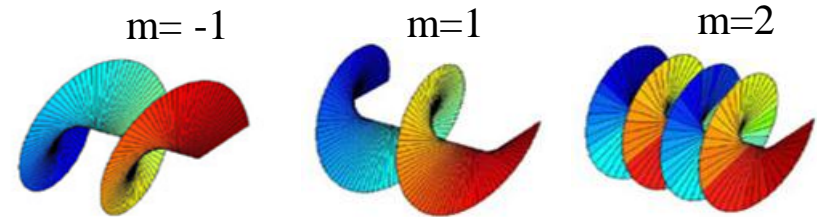


Polarizační singularity

Korelační singularity

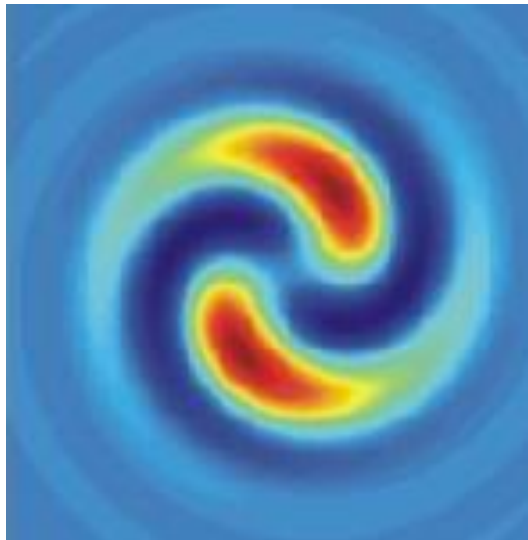
Identifikace světelných vírů

$$\oint_S \nabla \Phi \cdot d\vec{s} = \begin{matrix} 0 & \rightarrow & \text{spojitá fáze} \\ 2m\pi & \rightarrow & \text{optický vír} \end{matrix}$$

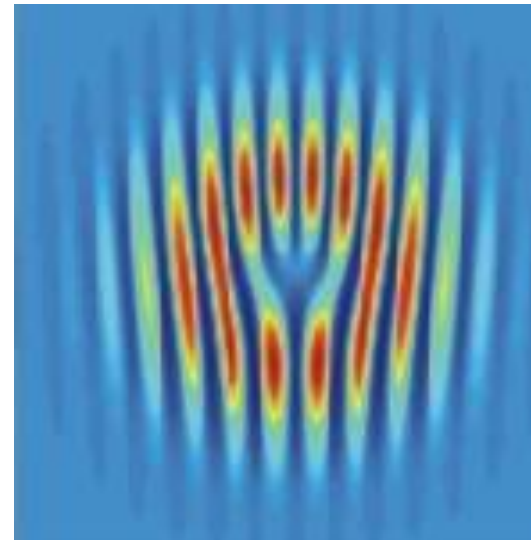


m – topologický náboj

**Světelný vír
+
sférická vlna**



**Světelný vír
+
rovinná vlna**

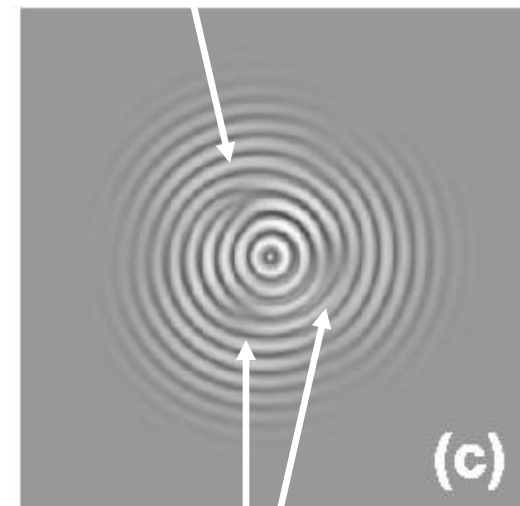
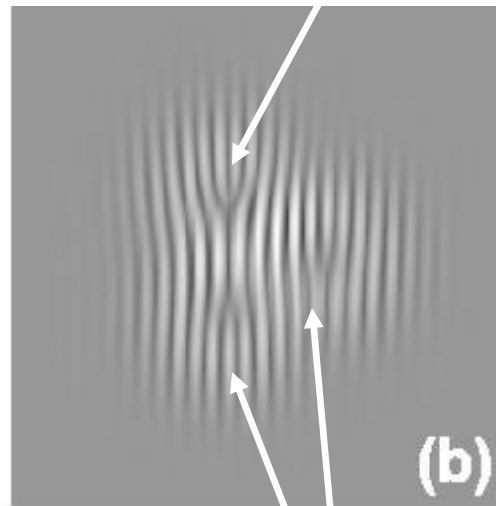
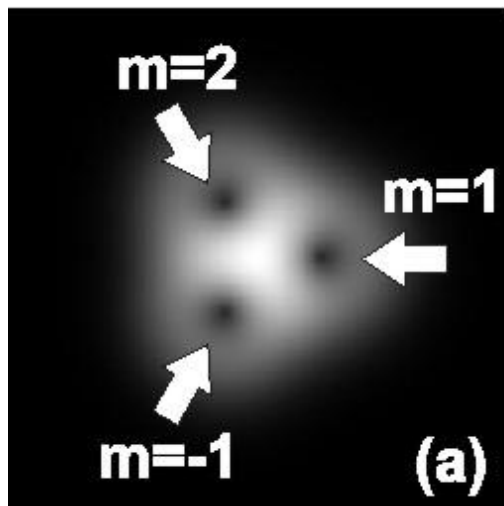


Identifikace složených vírových struktur

Interferenční obrazec

Intenzitní profil

Dvojité rozštěpení
interferenčních proužků



Jednoduché rozštěpení
interferenčních proužků
Znaménko topologického náboje
určuje orientace rozštěpení proužků

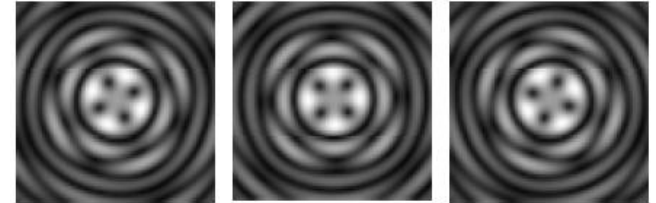
Typické vlastnosti světelných vírů

- Šroubovitá vlnoplocha se singularitou fáze v centru víru (stoupání šroubovice je $m\lambda$).
- Nulová amplituda v místě fázové singularity (vírové centrum je tmavé).
- Spirální tok elektromagnetické energie.
- Nenulový orbitální moment hybnosti.

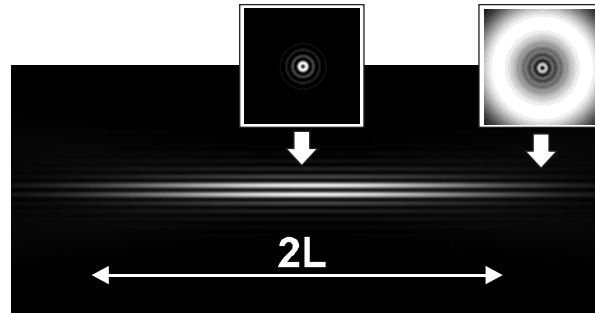
Šíření světelných vírů volným prostorem

Pseudo-nedifrakční šíření

Z. Bouchal, *Vesmír* 82, 152, 2003.
Z. Bouchal, *Čs. čas. fyz.* 53, 18, 2003.



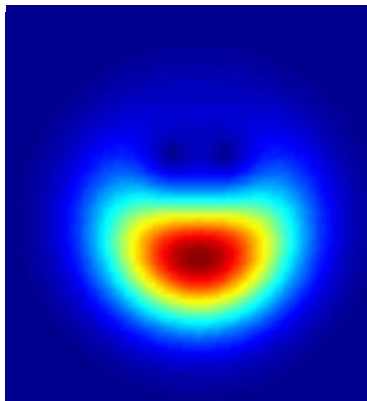
Tvarová invariantnost intenzitní stopy



Spojitá rotace vírové struktury

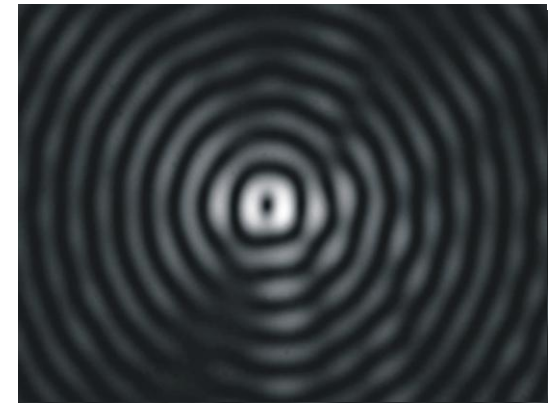
Přitahování, odpuzování a anihilace vírů

Vírový „self-imaging“
(podélná periodicitita)



Samorekonstrukce vírové struktury

Z. Bouchal, *Opt. Commun.* 210, 155, 2002.



Experimenty: spirální fázová maska



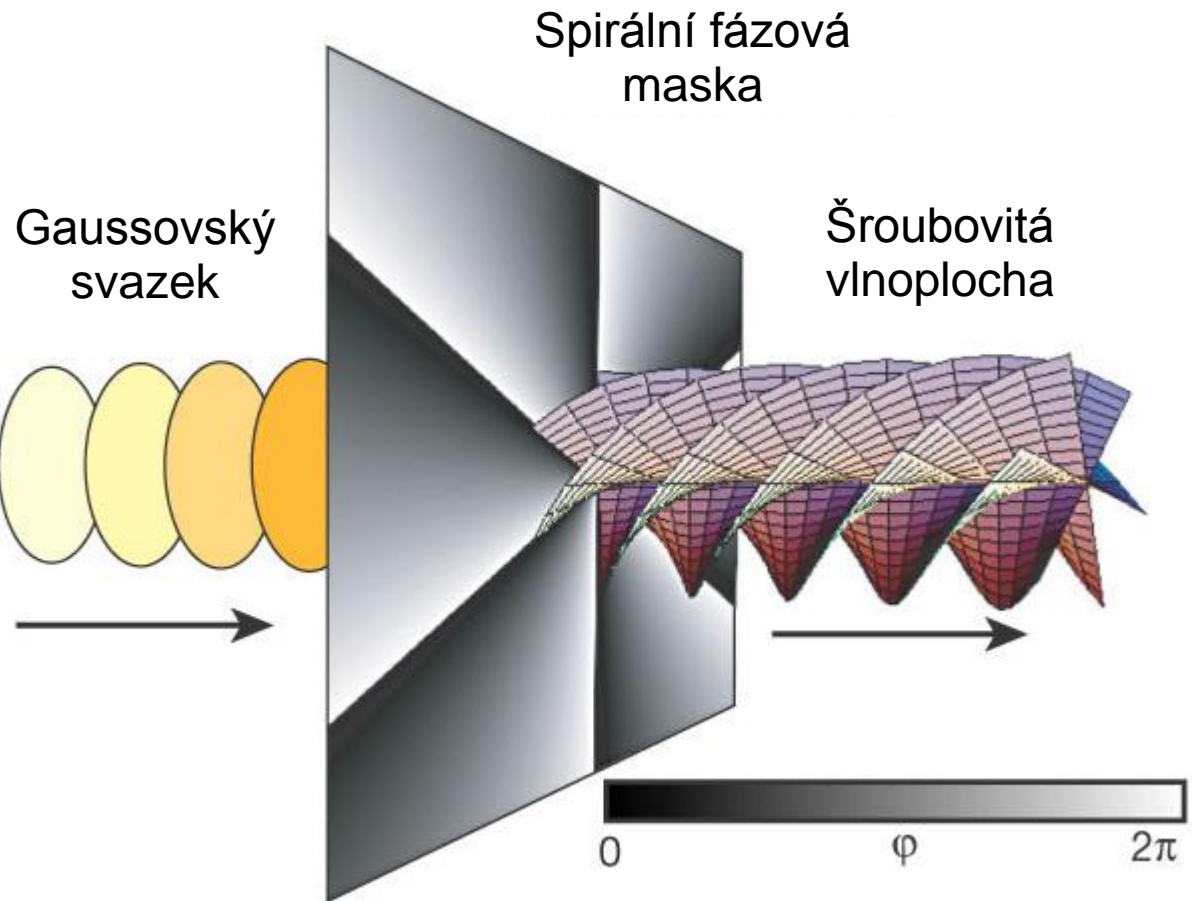
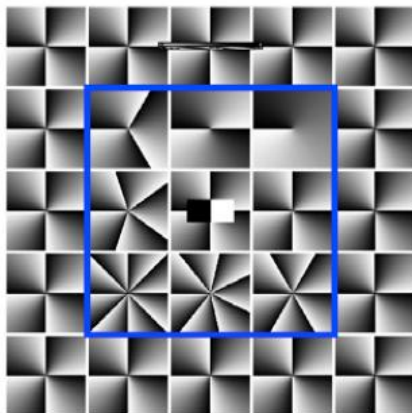
Charge Map

4	4	4	4	4
4	3	2	1	4
4	5		4	4
4	8	7	6	4
4	4	4	4	4

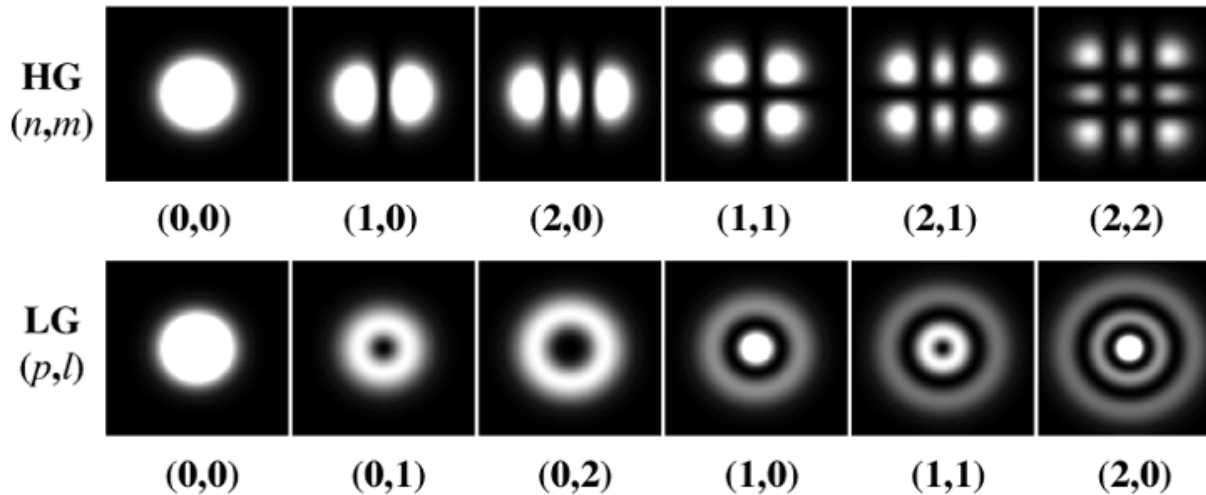
Λ

*Pattern side up
Blue boundary indicates clear aperture

Vortex Geometry



Experimenty: svazková konverze



LG_0^1
 (vírový svazek $l = 1$)

světelné víry

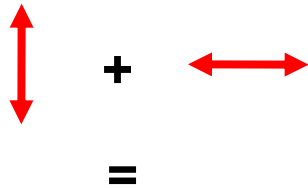
Fázový posuv $\pi/2$

$$\text{LG}_0^1 = \frac{1}{2^{1/2}} \text{HG}_{10} + \frac{i}{2^{1/2}} \text{HG}_{01}$$

$$LG_0^1 = (1/2^{1/2})(HG_{10} + i HG_{01})$$

Analogie polarizační a svazkové konverze

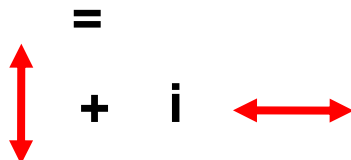
Polarizační transformace



VSTUPNÍ STAV:
Lineární polarizace



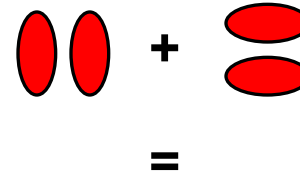
VÝSTUPNÍ STAV:
Kruhová polarizace



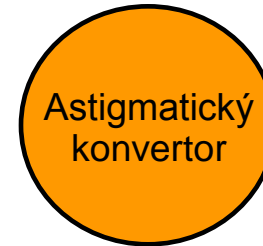
Optická anizotropie

Fázový posuv polarizačních složek
 $\pi/2$

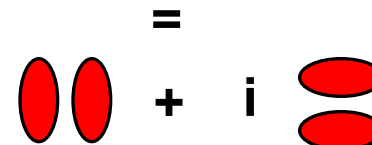
Svazková transformace



VSTUPNÍ STAV:
Diagonální HG svazek



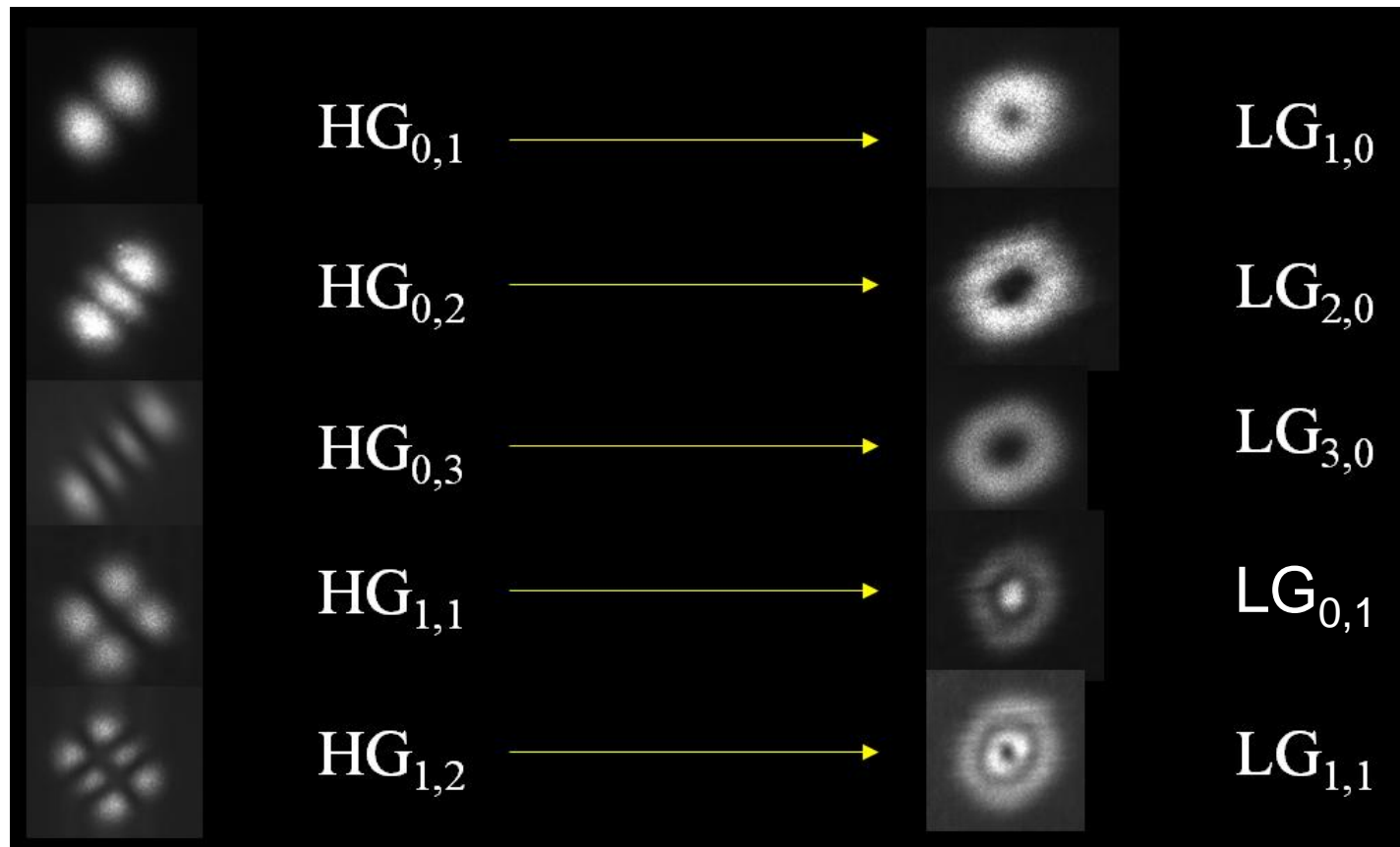
VÝSTUPNÍ STAV:
LG svazek



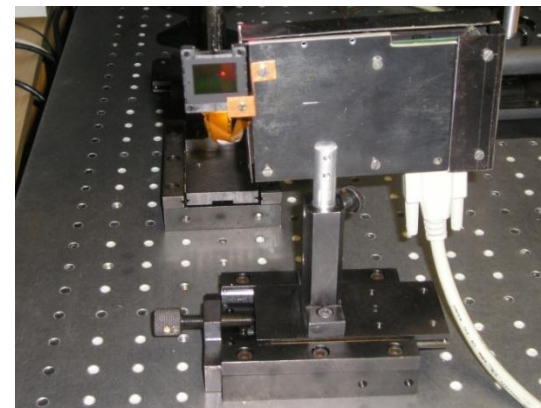
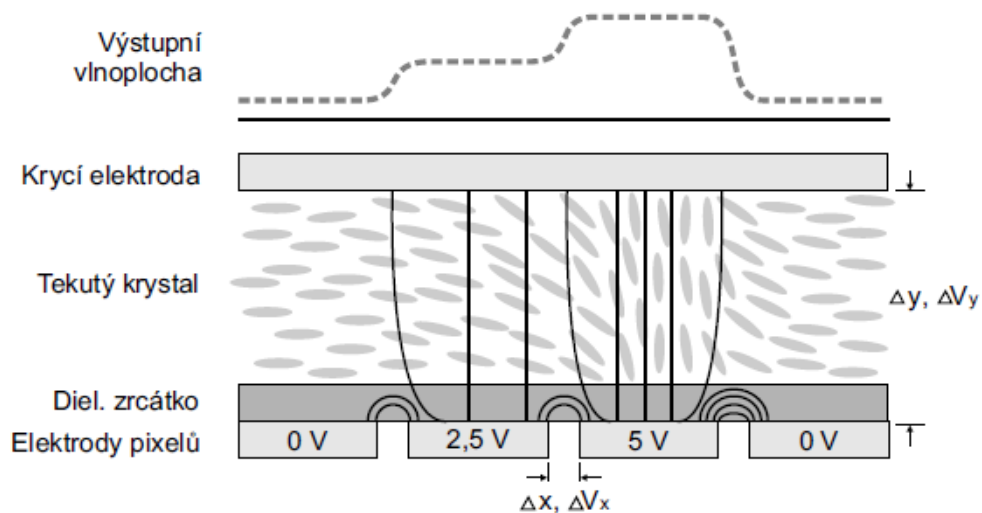
Prostorový astigmatismus

Fázový posuv HG módů
 $\pi/2$

Experimentální demonstrace vírové konverze



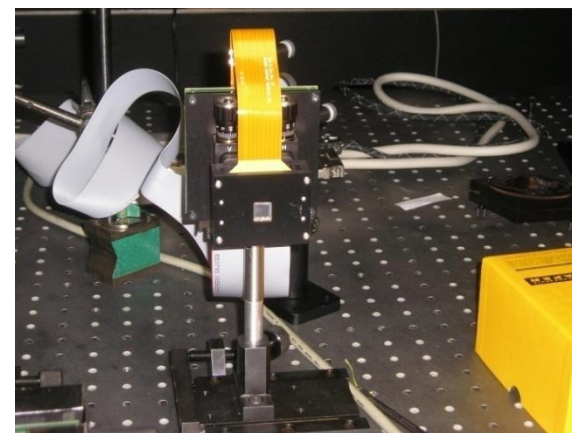
Experimenty: prostorová modulace světla



CRL Opto 1024x768

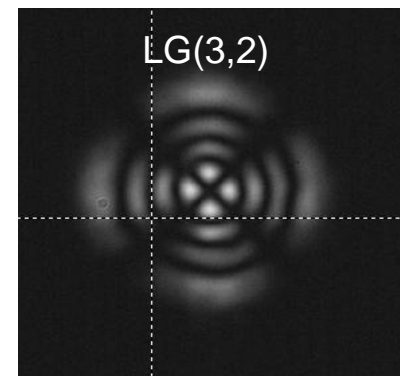
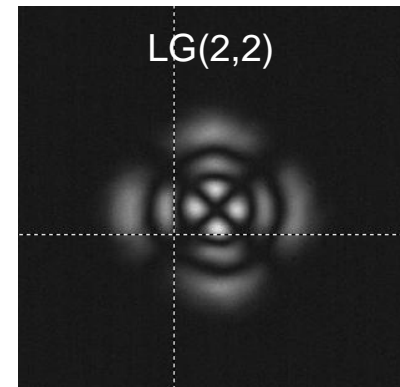
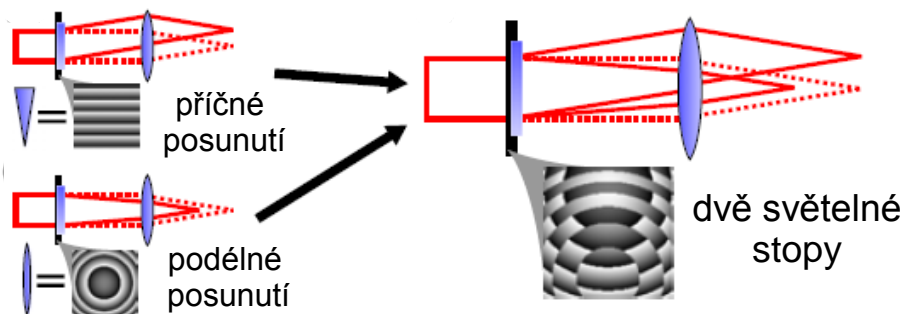
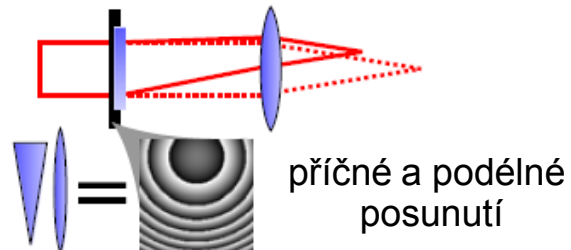
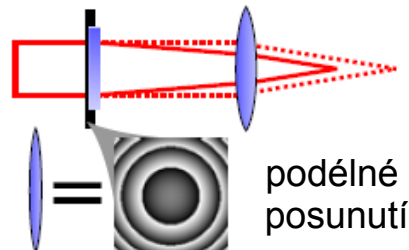
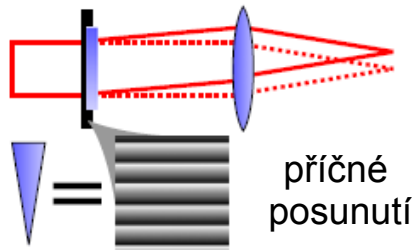


Hamamatsu 800x600

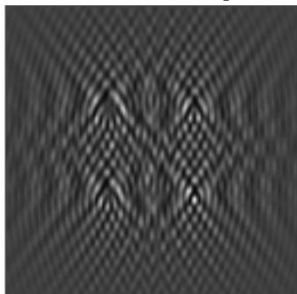


Boulder 512x512

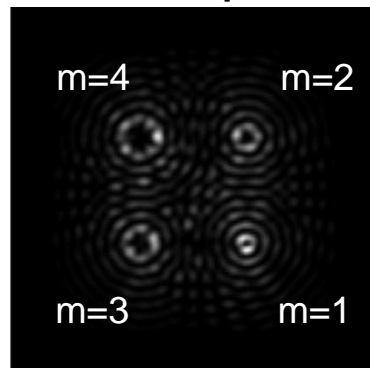
Použití prostorové modulace světla



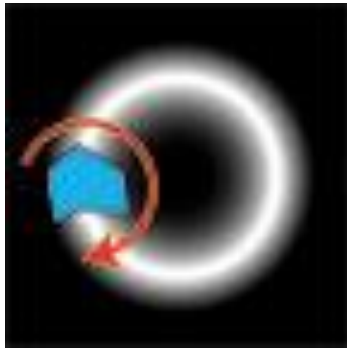
fázová mapa



vírové pole

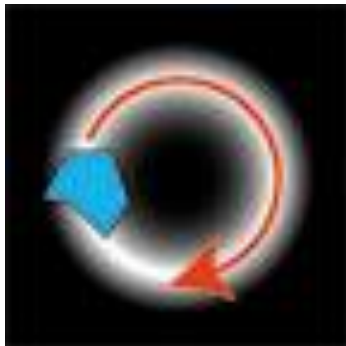
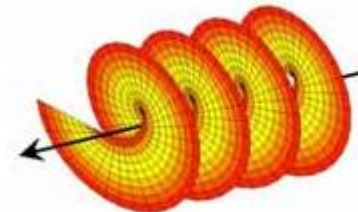


Aplikace světelných vírů



**Vírový přenos
informace**

Přenos momentu hybnosti
optické manipulace
Mikro Elektro Mechanické Systémy

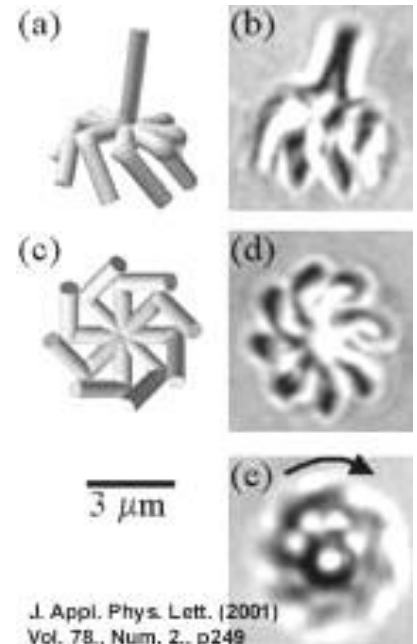
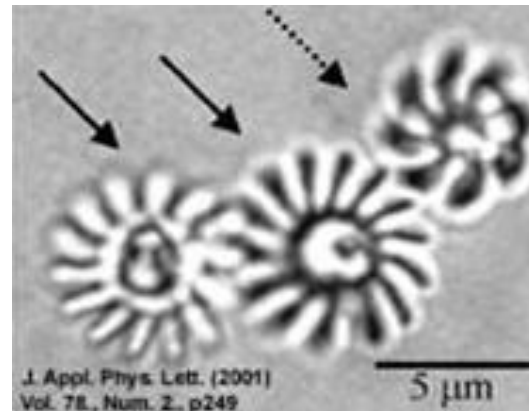
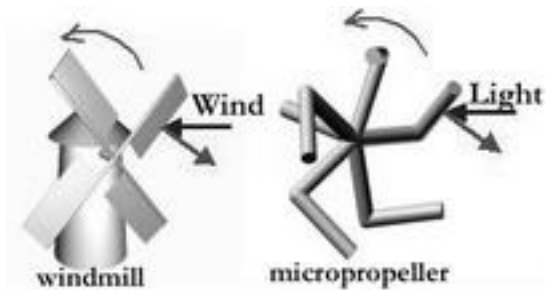


Vírové zobrazení

Přenos orbitálního momentu hybnosti v MEMS

Světlem ovládané mikrosystémy

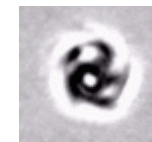
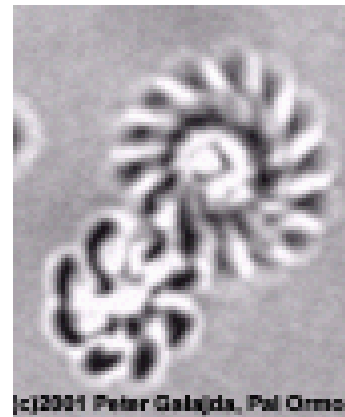
Prof. Pál Ormos, Institute of biophysics, Hungarian Academy of Sciences
<http://www.szbk.u-szeged.hu/ormosgroup/machines/machines.html>



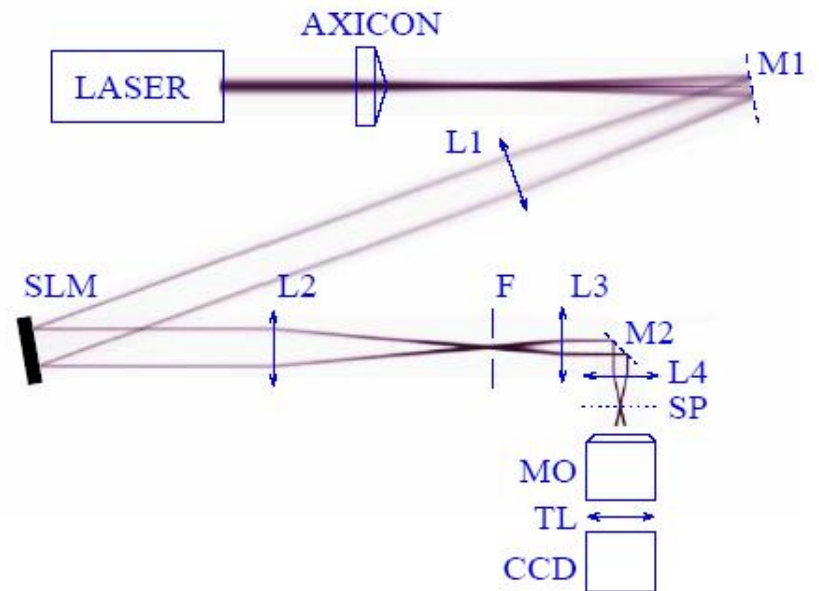
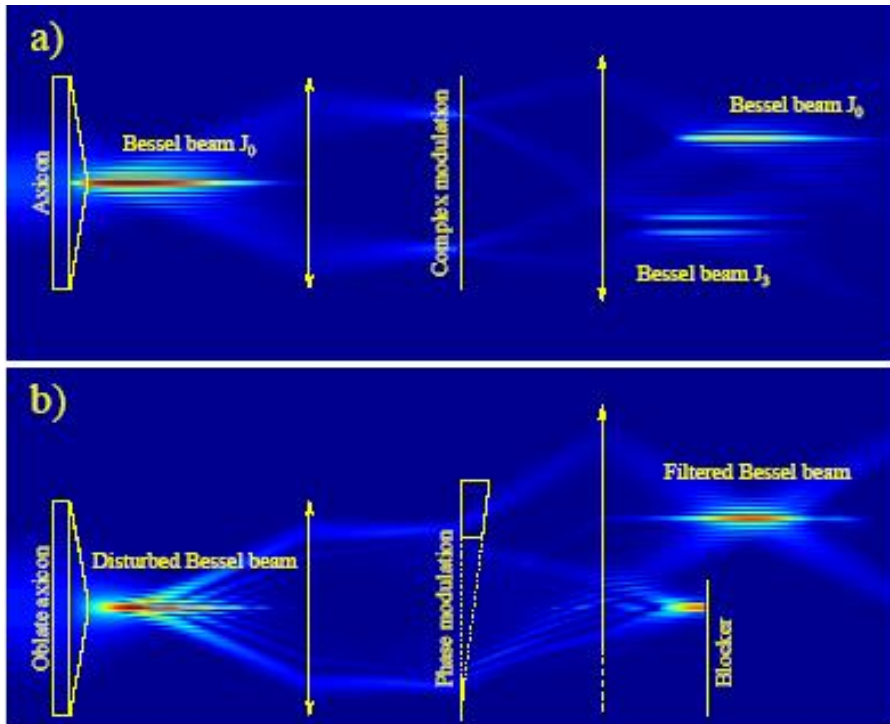
Idea



Realizace

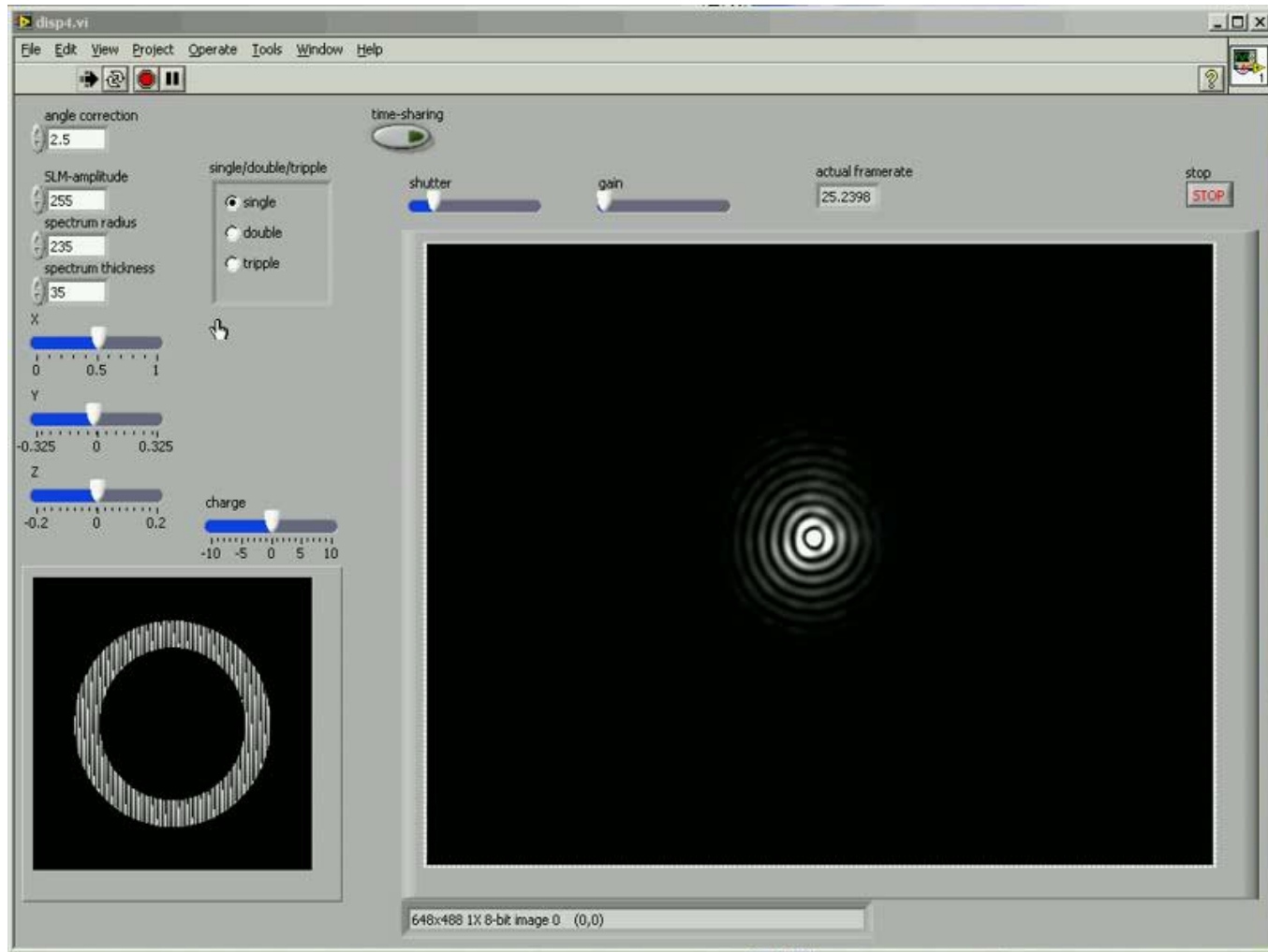


Světelné víry v optických manipulacích

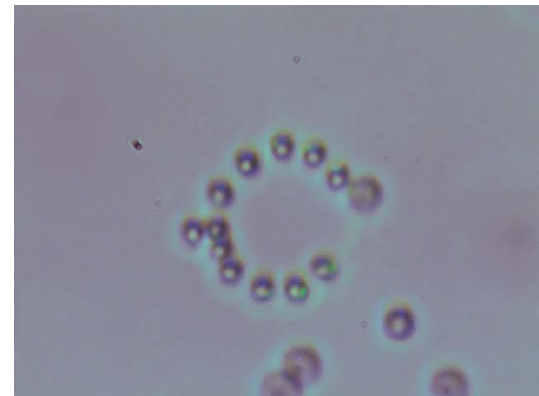
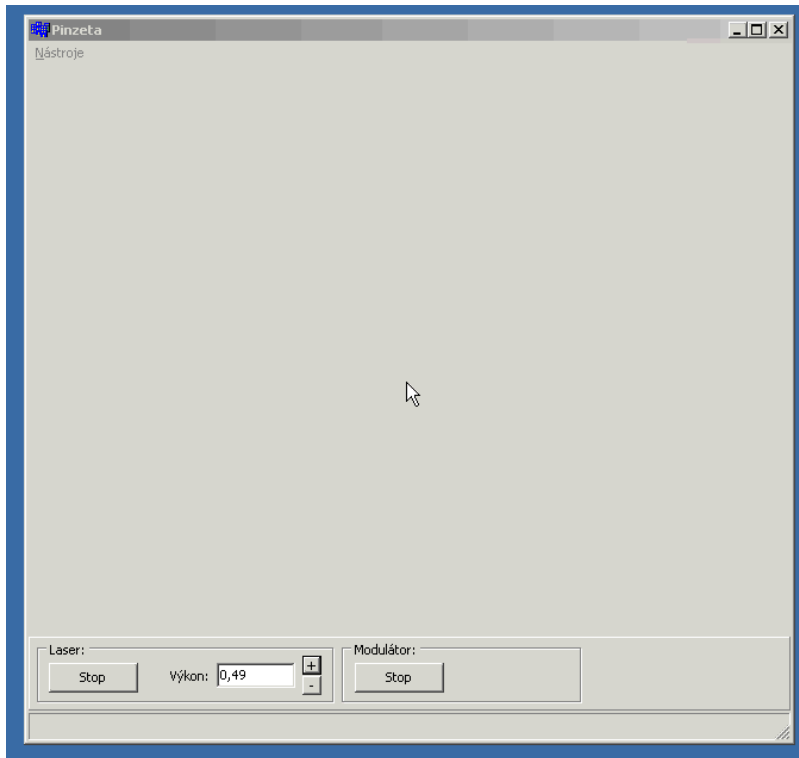
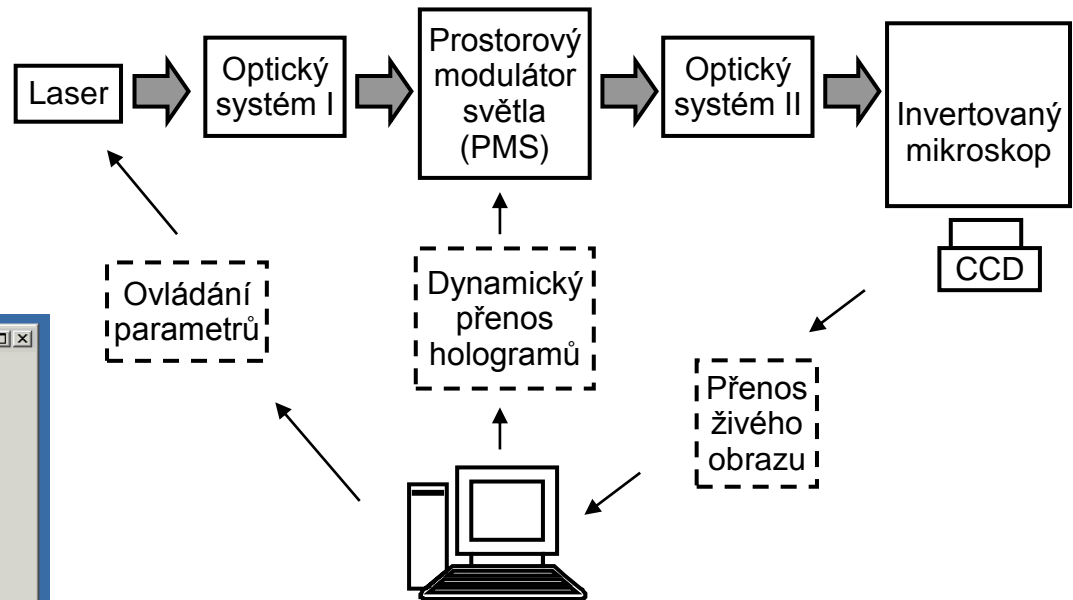
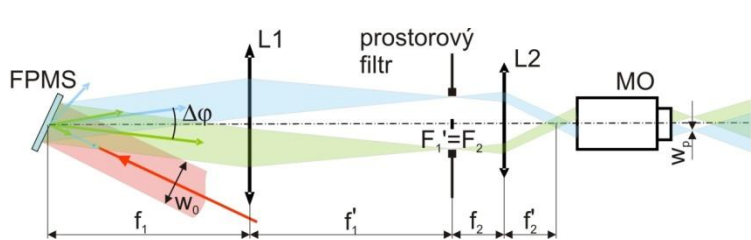


T. Čižmár, V. Kollárová, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, K. Dholakia, *Optics Express* 16, 14024, 2008.

Biofotonická pracovní stanice (Univ. St Andrews)



Holografická laserová pinzeta (UP Olomouc)



Informační obsah vírových svazků

Relace neurčitosti pro úhlové rozdělení pole a OMH

Princip experimentu

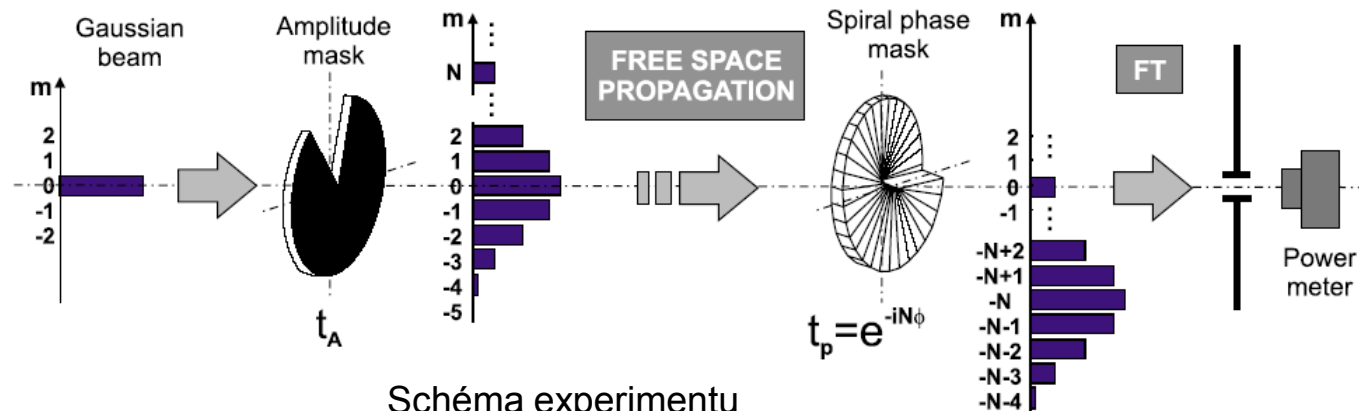
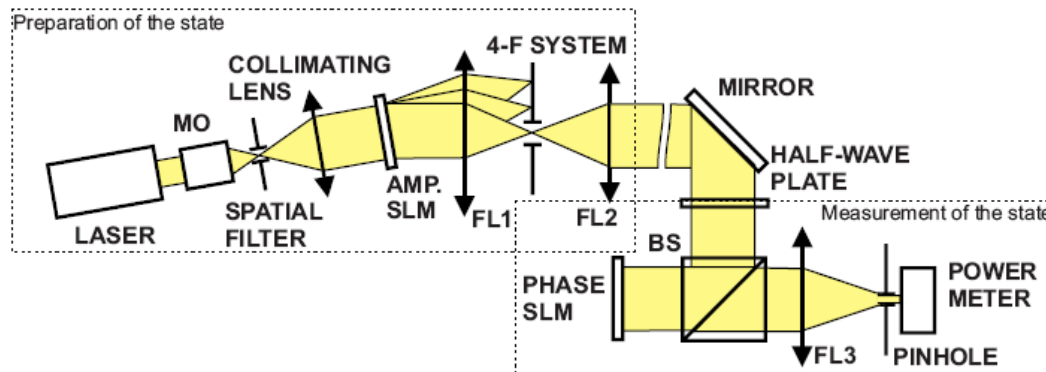


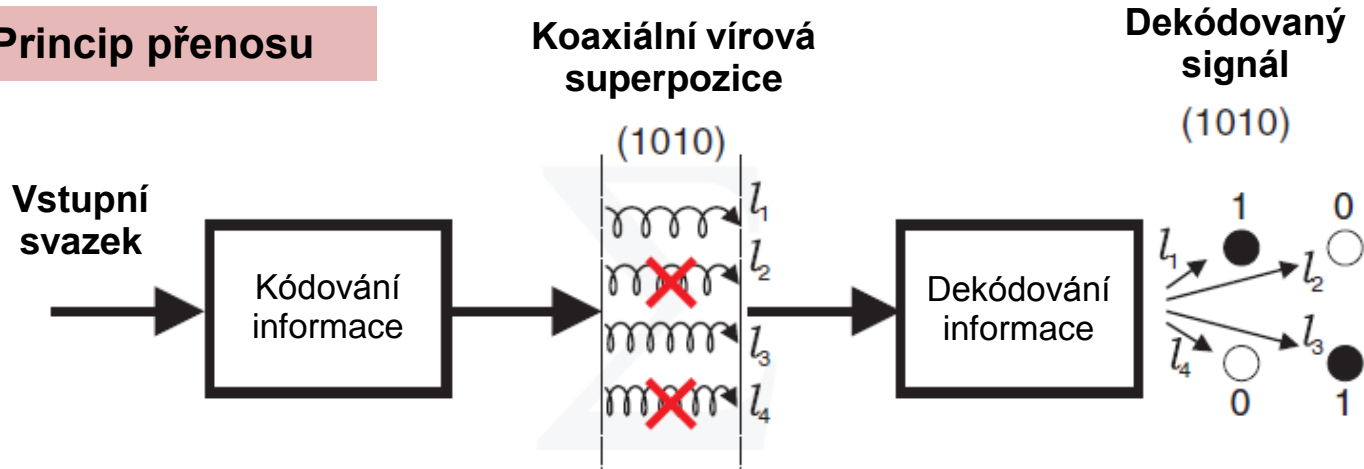
Schéma experimentu



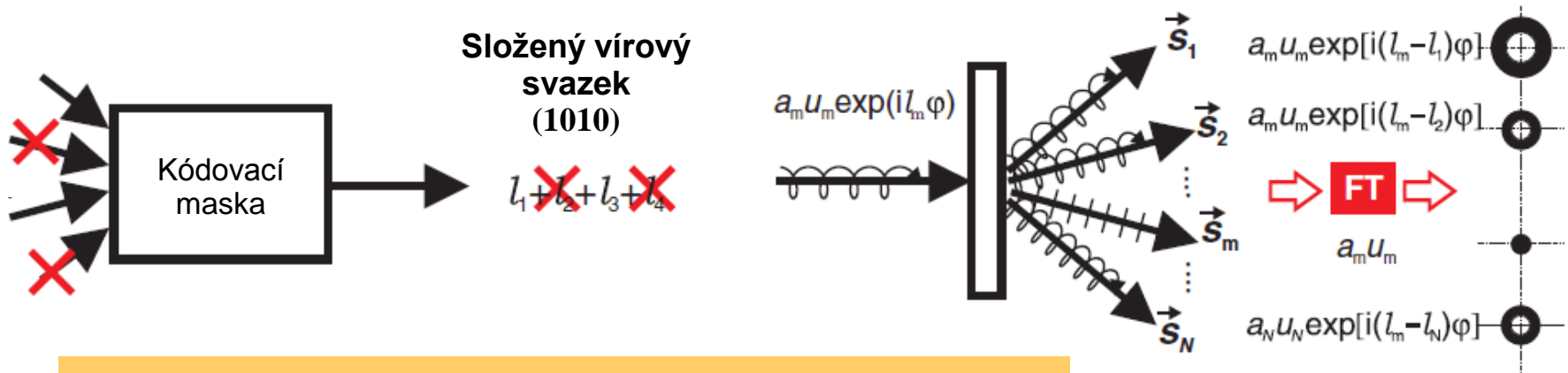
- D. Pegg, S. Barnett, R. Zambrini, S. Franke-Arnold, M. Padgett, *New J. Phys.* 7, 62 (2005).
Z. Hradil, J. Řeháček, Z. Bouchal, R. Čelechovský, L.L. Sánchez-Soto, *Phys. Rev. Lett.* 97, 243601 (2006).
J. Řeháček, Z. Bouchal, R. Čelechovský, Z. Hradil, L.L. Sánchez-Soto, *Phys. Rev. A* 77, 032110 (2008).
J. Řeháček, Z. Hradil, Z. Bouchal, L.L. Sánchez-Soto, *Opt. Lett.* 35, 2064, 2010.

Vírový přenos informace

Princip přenosu



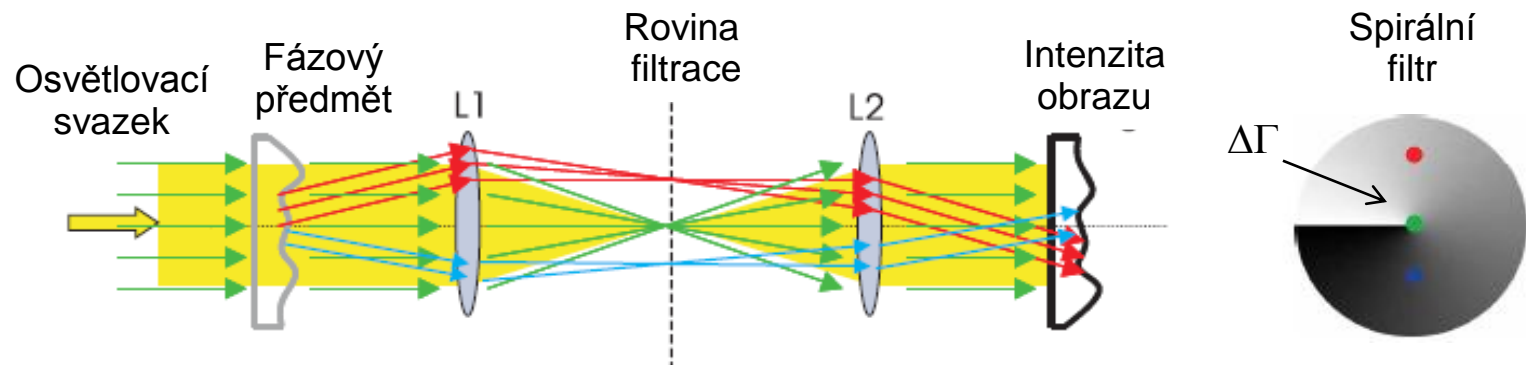
Kódování a dekódování



Z. Bouchal, R. Čelechovský, *New J. Phys.* 6, 131, 2004.
 G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, *Opt. Express* 12, 5448, 2004.
 R. Čelechovský, Z. Bouchal, *New J. Phys.* 9, 328, 2007.

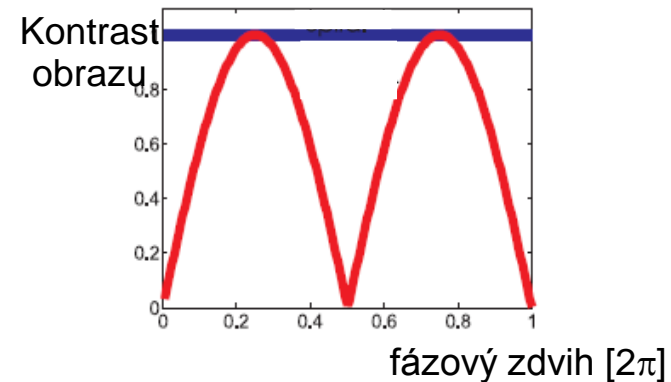
Vírové zobrazení - spirální mikroskopie

Zobrazení fázových objektů metodou spirálního kontrastu

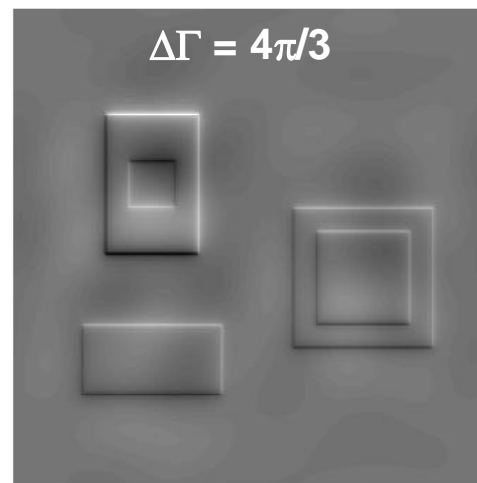
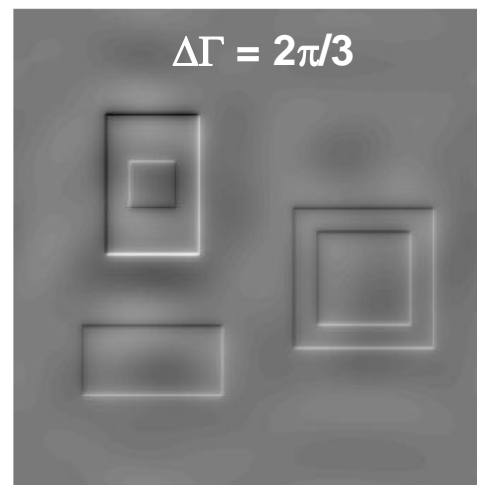
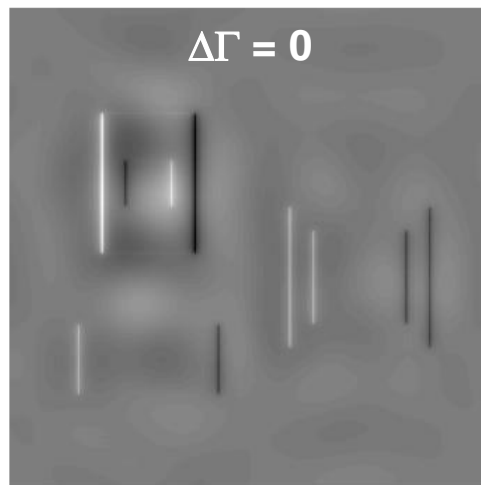


Výhody metody:

- Vysoký kontrast hrany fázového přechodu (teoreticky nezávislý na velikosti fázového skoku).
- Izotropní zvýraznění hrany (nastává při eliminaci přímého světla - nulové prostorové frekvence).
- Řízená anizotropie zvýraznění hrany (nastává při ovládaném posuvu fáze nulové prostorové frekvence)



Demonstrace anizotropního spirálního kontrastu



Kvantitativní spirální kontrast

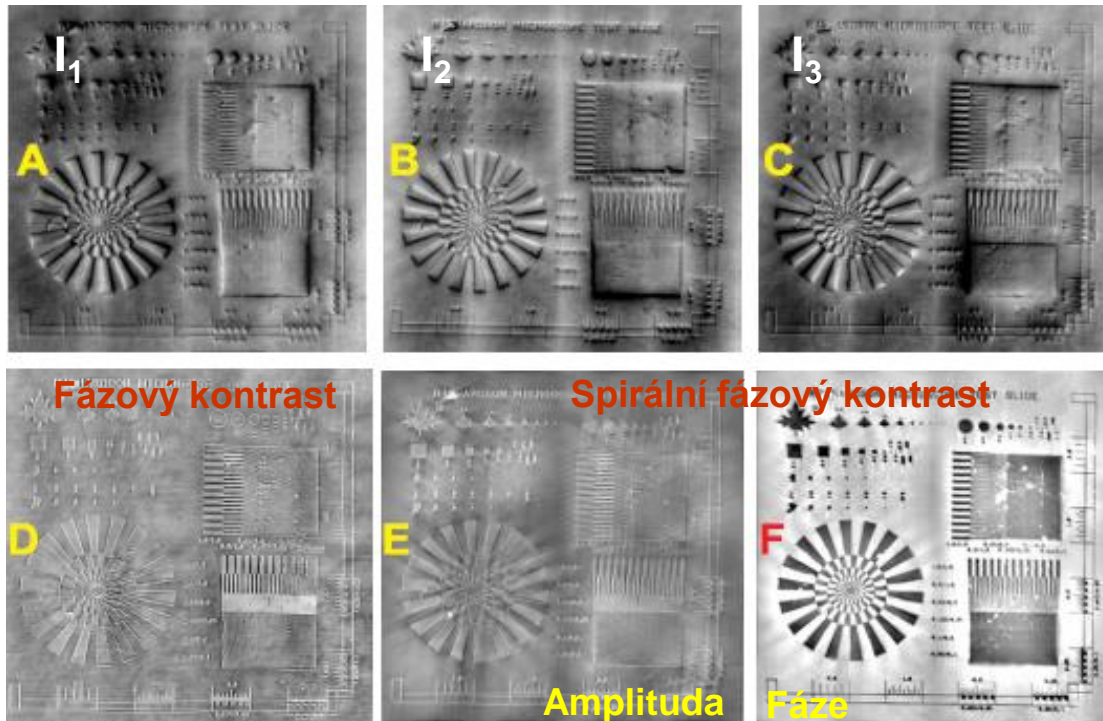
$$E_{IN} = |E_{IN}| \exp(i\theta_{IN})$$

FT
➔

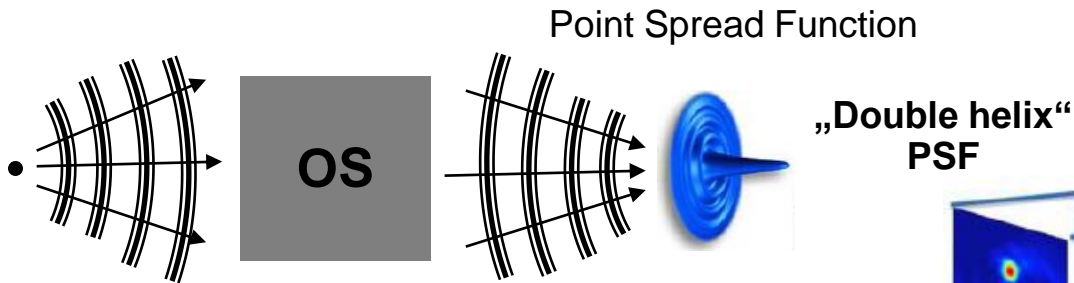
Spirální filtrace
+
změna fáze
přímého světla
 $\Delta\Gamma_1, \Delta\Gamma_2, \Delta\Gamma_3$

IFT
➔

Detekce intenzit obrazů
 I_1, I_2, I_3



Vírové zobrazení – rotující PSF



2D zobrazení x 3D zobrazení

V každém zobrazení je 3D informace zakódovaná v rozostřeném obrazu !!

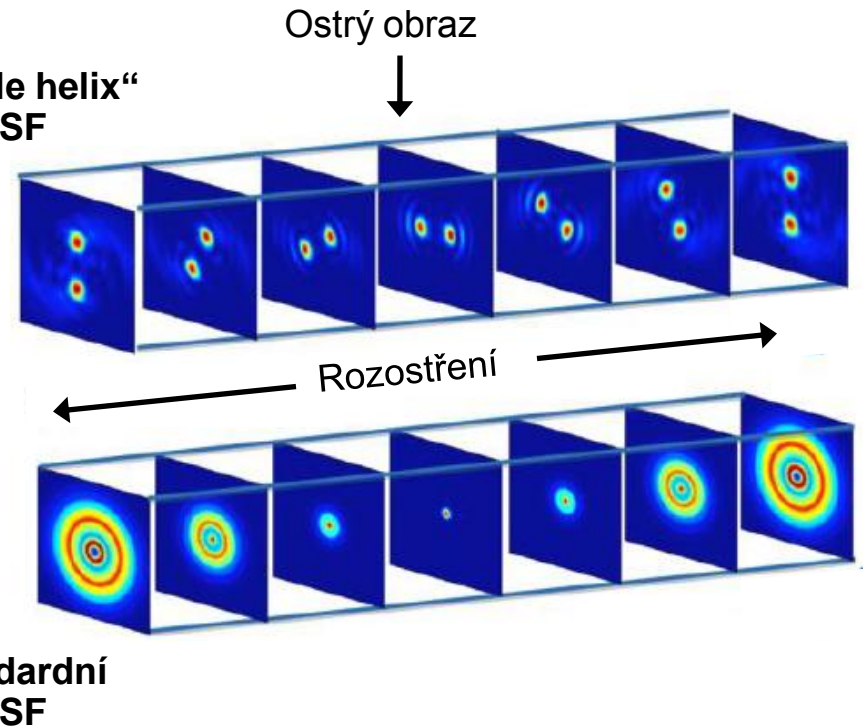
Cíle pro návrh PSF:

- Jednoduchý odhad hloubky
- Rychlá změna PSF při rozostření

Řešení:

„Double helix“ PSF

A. Greengard, Y. Y. Schechner, and R. Piestun,
Opt. Lett. 31, 181-183 2006

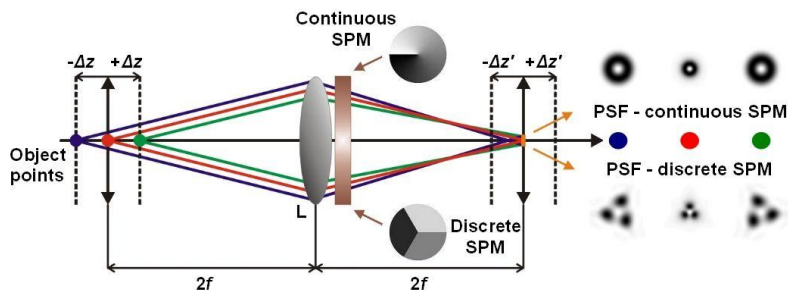


Experimentální realizace:

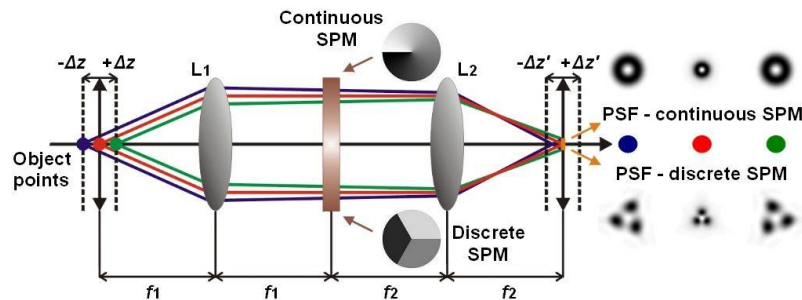
- Superpozice 6 LG svazků
 - Fourierovská filtrace
- Amplitudová i fázová modulace
 - Nízká účinnost 1.8 %

Rotace PSF - azimutální diskretizace spirální masky

Modulace v prostoru



Modulace ve spektru



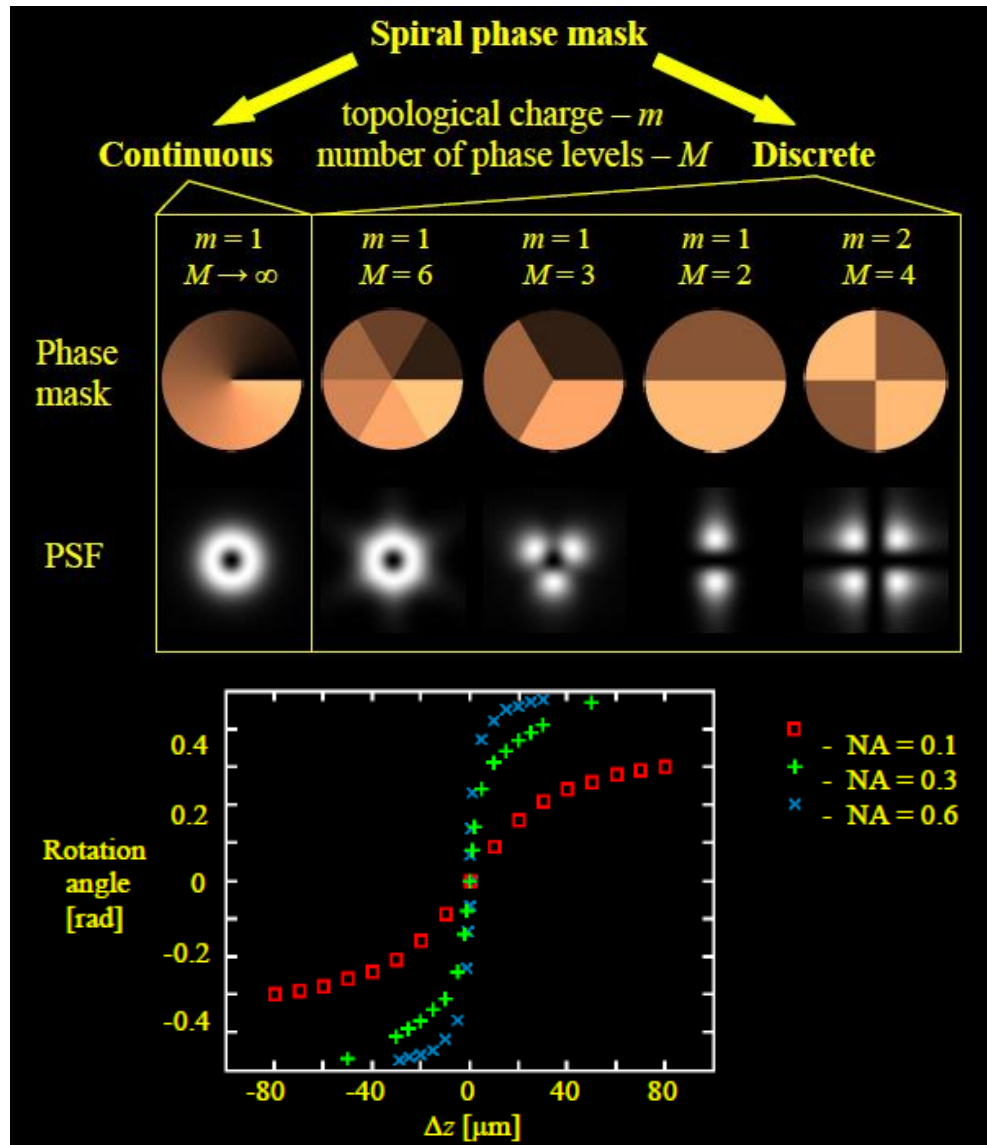
Výhody:

- jednoduchost a vysoká účinnost
- možnost tvarování PSF
- funkční při modulaci v prostoru i ve spektru

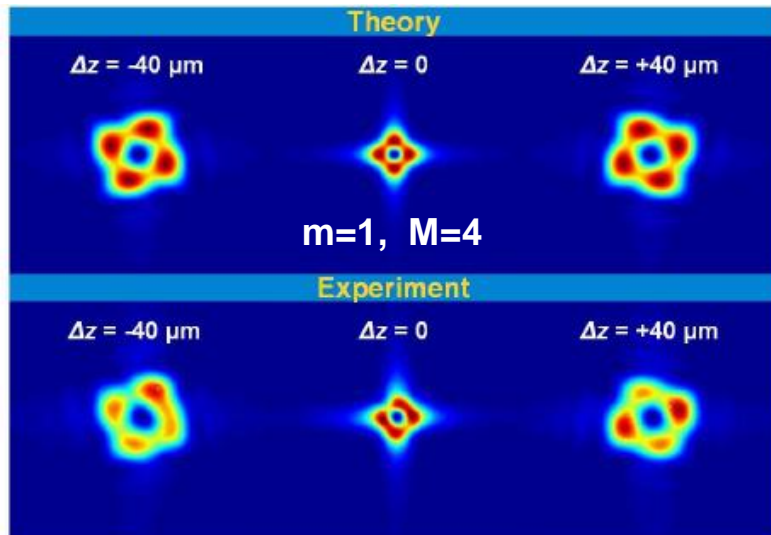
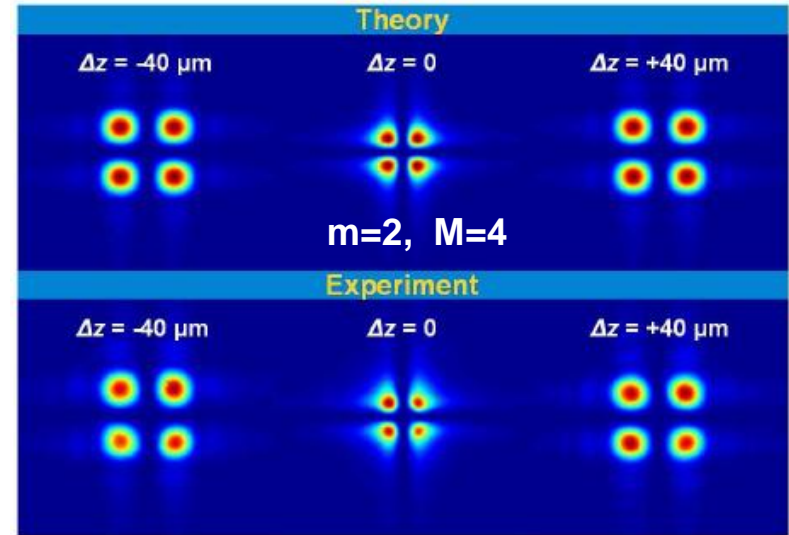
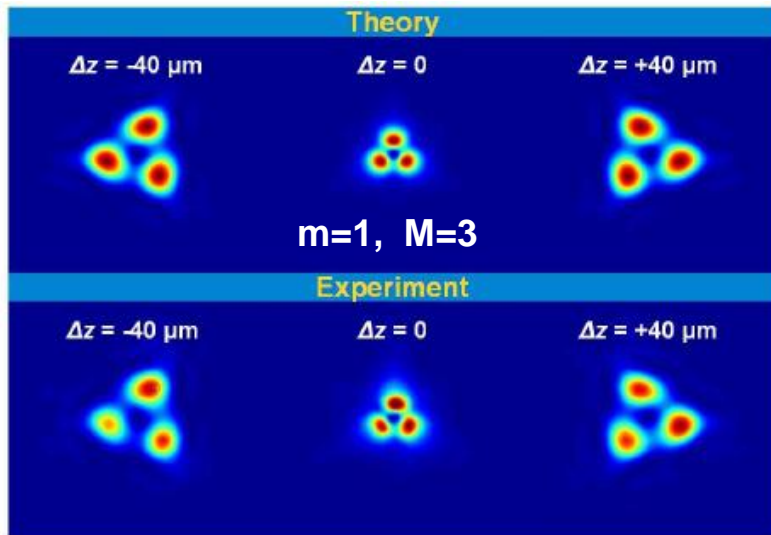
Nevýhody:

- omezený rozsah rotace

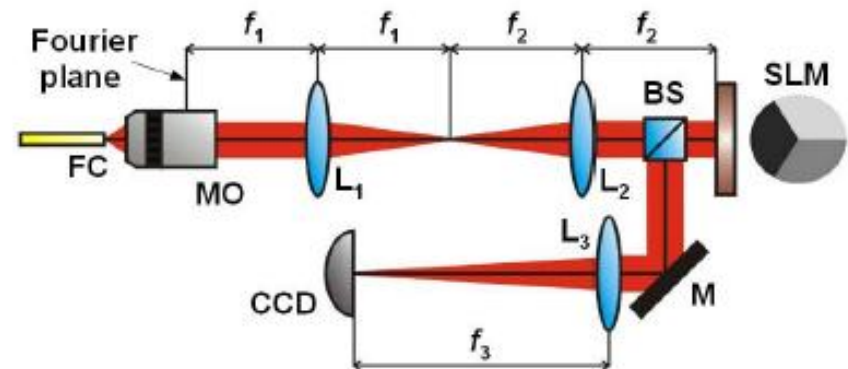
M. Baránek, Z. Bouchal, J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public, 8, 13017, 2013.



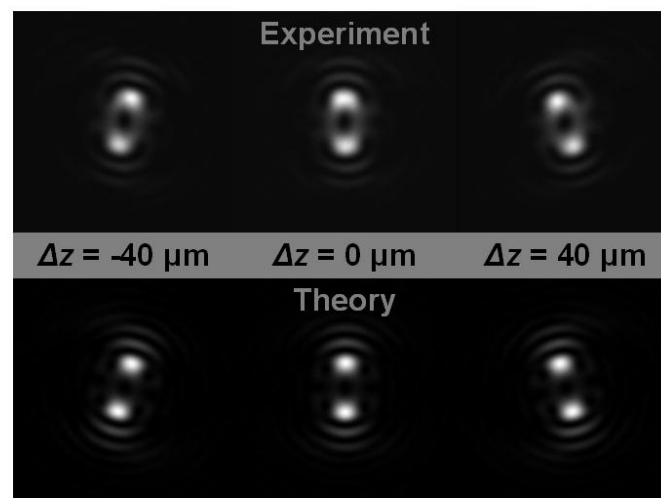
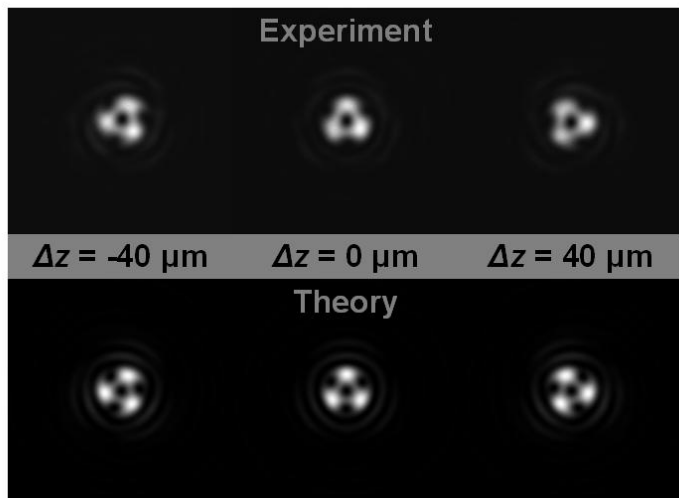
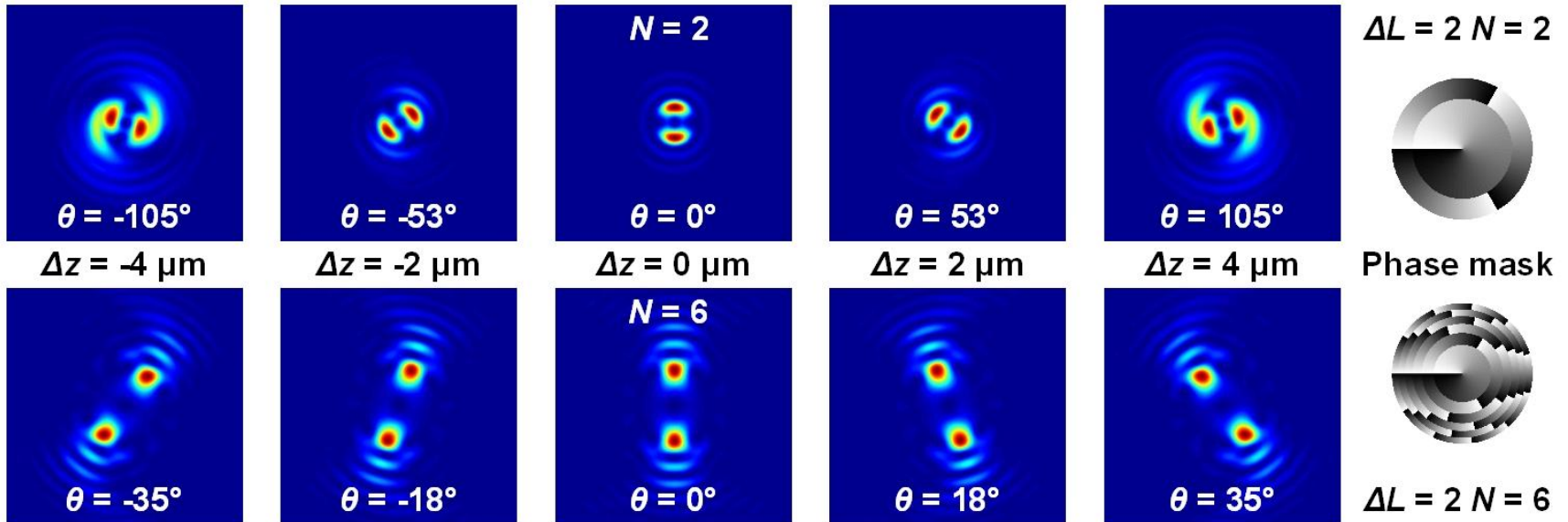
Rotace PSF při diskrétní spirální modulaci



Nerotující PSF: $M=2m$



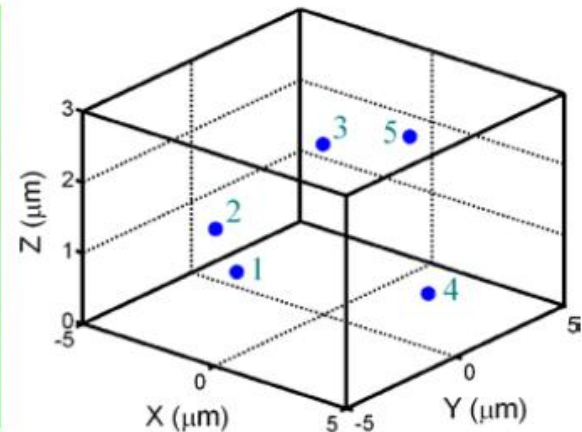
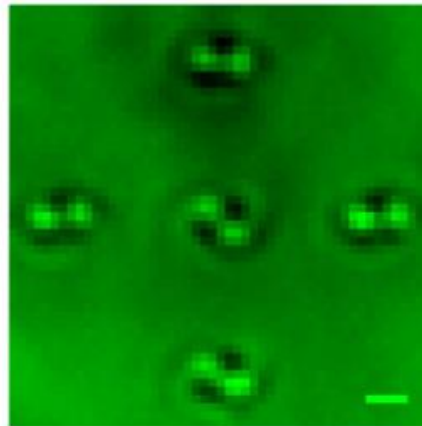
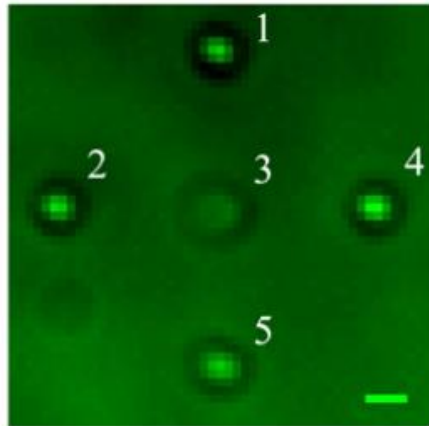
Rotace PSF - radiální diskretizace spirální masky



Výhody:

- kontrola rychlosti rotace
- kontrola rozsahu rotace
- tvarová invarianost
- energetická účinnost

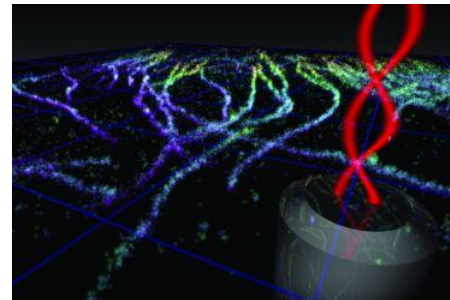
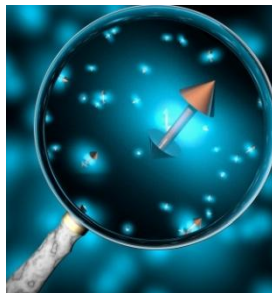
Mikroskopie s rotující PSF



http://www.stanford.edu/group/moerner/sms_3Dsmacm.html

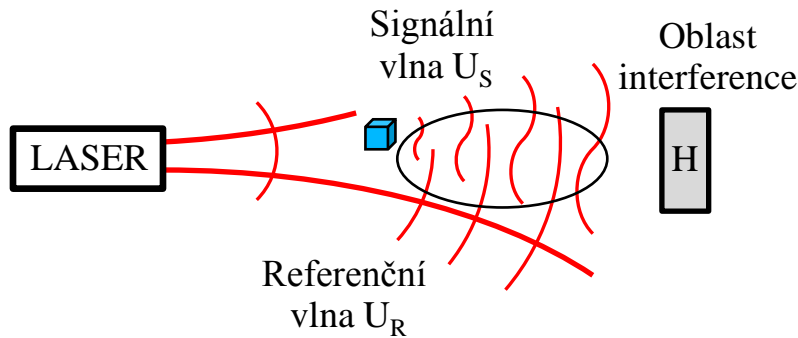
Simultaneous, Accurate Subdiffraction Measurement of the 3D Position and Orientation of Single Molecules Enabled by the Double-Helix Point Spread Function Microscope

The double-helix microscope super-resolves extended biological structures by localizing single blinking molecules in three dimensions with nanoscale precision



Vývoj a nové trendy nekoherentní holografie

Klasická holografie



Hologram – koherentní součet vln U_S a U_R :

$$H \approx |U_S + U_R|^2$$

Optická holografie

- mimoosová geometrie záznamu
- optická rekonstrukce hologramu

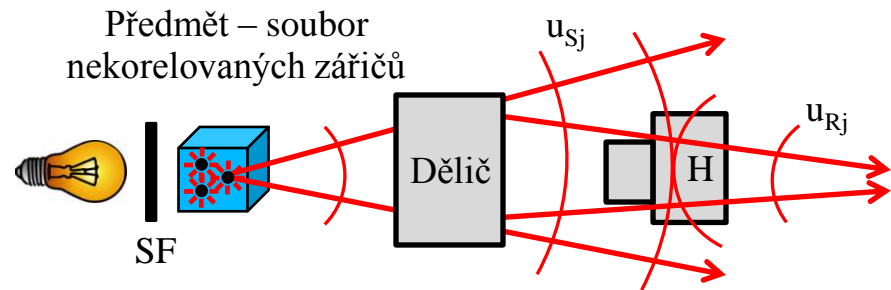
Digitální holografie

- elektronický záznam
- osová geometrie
- digitální rekonstrukce hologramu

D. Gabor, Microscopy by reconstructed waveforms, Proc. Royal Society, A197, 454 (1949).

T. Huang, Digital Holography, Proc. of IEEE 59, 1335 (1971).

Nekoherentní korelační holografie



G.W.Stroke, R.C.Restrict, Holography with spatially noncoherent light, Appl. Phys. Lett. 7, 229 (1965).

Hologram – nekoherentní součet samointerferenčních bodových záznamů:

$$H \approx \sum_j |u_{Sj} + u_{Rj}|^2$$

Dvoucestná mimoosová holografie

P. Kolman, R. Chmelík, Coherence-controlled holographic microscope, Opt. Express 18, 21990 (2010).

Jednocestná osová korelační holografie

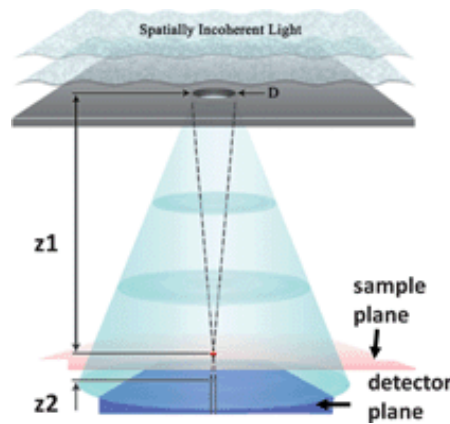
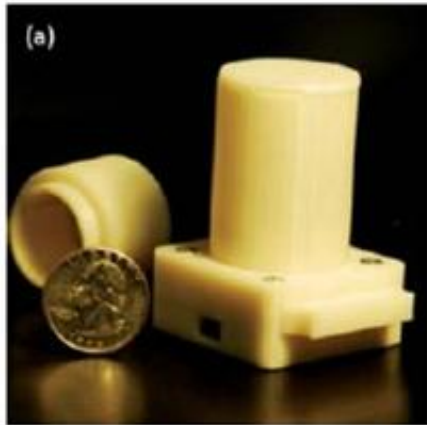
J. Rosen, G. Brooker, Digital spatially incoherent Fresnel holography, Opt. Lett. 32, 912 (2007).

Skenovací korelační holografie

B. Schilling et al, 3D holographic fluorescence holography, Opt. Lett. 22, 1506 (1997).

Digitální holografie s nekoherentním zdrojem

Digitální holografický mikroskop s nekoherentním osvětlením



Parametry mikroskopu:

- osvětlení LED, 591 nm
- váha ~ 45 g
- rozměry 42 mm x 42 mm x 58 mm
- zorné pole ~ 24 mm²
- průměr clony 1-2 μ m

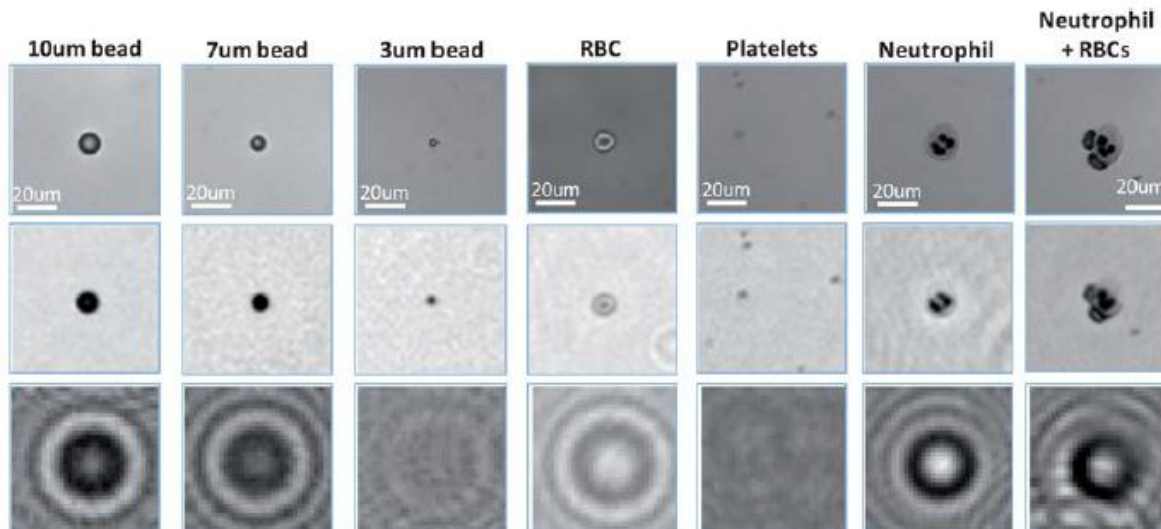
Převzato:

O. Mudanyali et al, Compact and cost-effective microscope based on lensless incoherent holography for telemedicine applications, Lab Chip 10, 1417 (2010).

Optický obraz
40x, NA=0.6

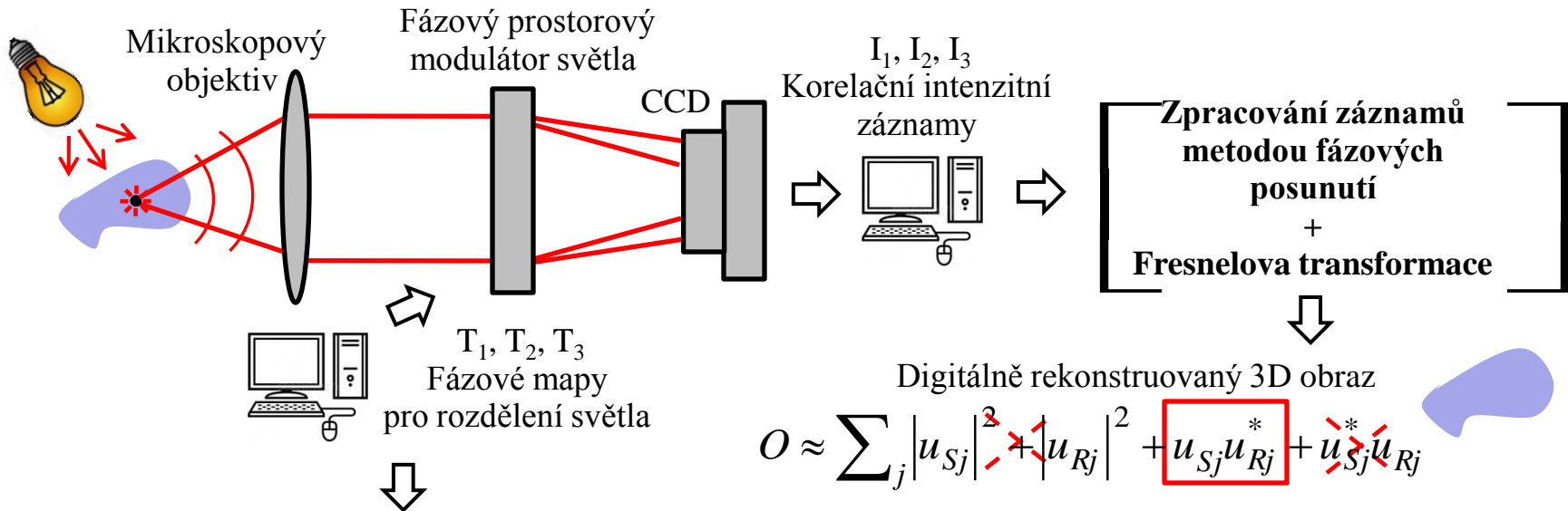
Rekonstruovaný
obraz

Holografický
záznam

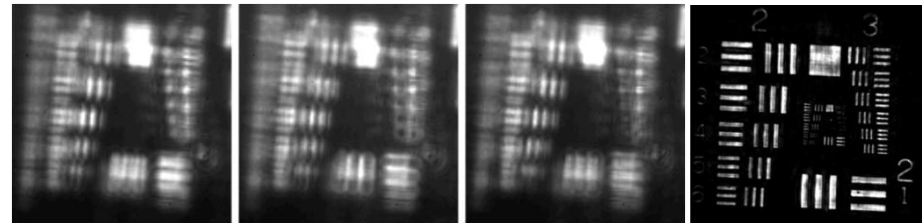
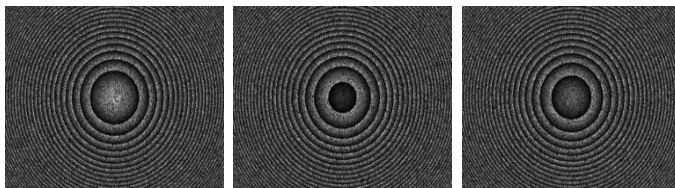


Fresnelova nekoherentní korelační holografie (FINCH)

Princip záznamu a rekonstrukce



$$O \approx \sum_j |u_{Sj}|^2 + |u_{Rj}|^2 + u_{Sj}^* u_{Rj} + u_{Sj} u_{Rj}^*$$



Speciální vlastnosti metody FINCH

Hybridní režim koherence

- **nekoherentní** záznam (intenzitní součet bodových hologramů) \otimes **koherentní** rekonstrukce (bodové obrazy se sčítají s ohledem na fázi).



Vírová rekonstrukce obrazu

- optické nebo digitální anizotropní zvýraznění hran v nekoherentním světle

P. Bouchal, Z. Bouchal, Selective edge enhancement in 3D vortex imaging with incoherent light, Opt. Letters 37, 2949, 2012.

P. Bouchal, J. Kapitán, R. Chmelík, Z. Bouchal, Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent correlation holography, Opt. Express, 19, 15603, 2011.

Porušení Lagrangeova invariantu

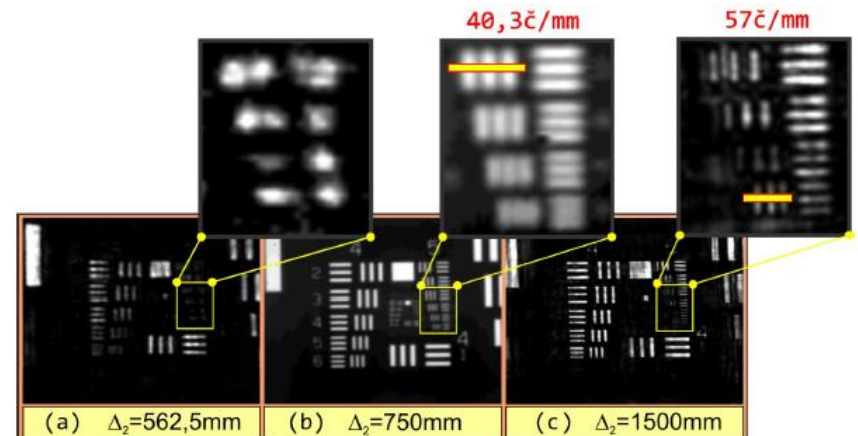
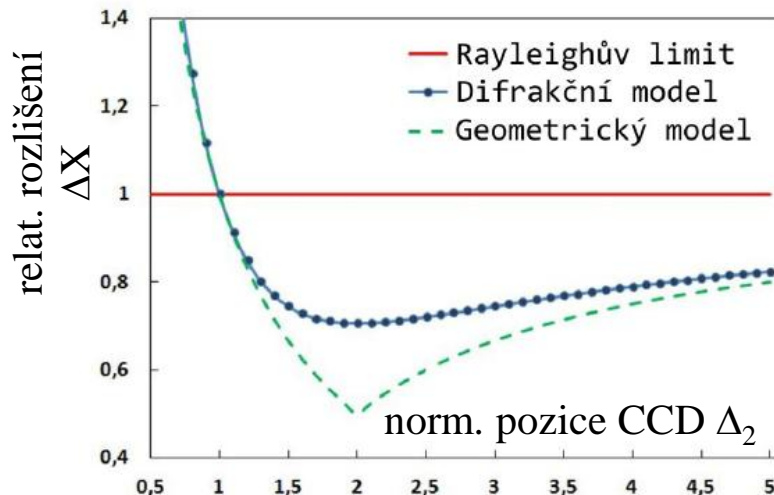
- $M = Q \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'}$, $Q \begin{cases} = 1 & \text{optické zobrazení} \\ \neq 1 & \text{FINCH zobrazení} \end{cases}$



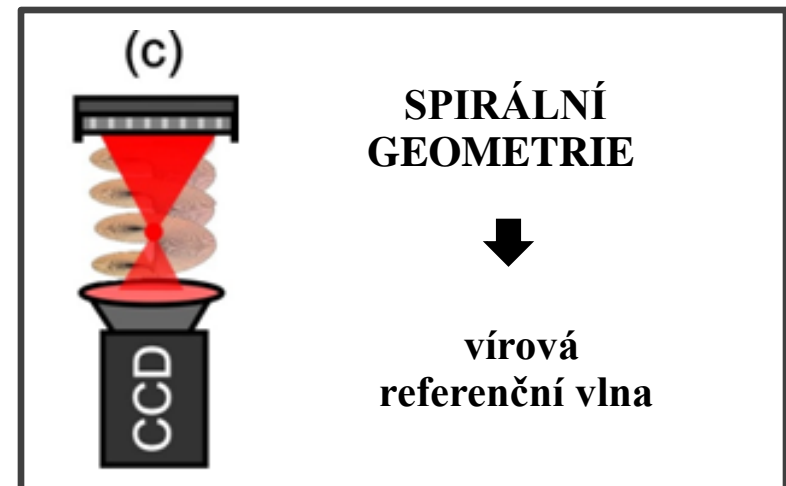
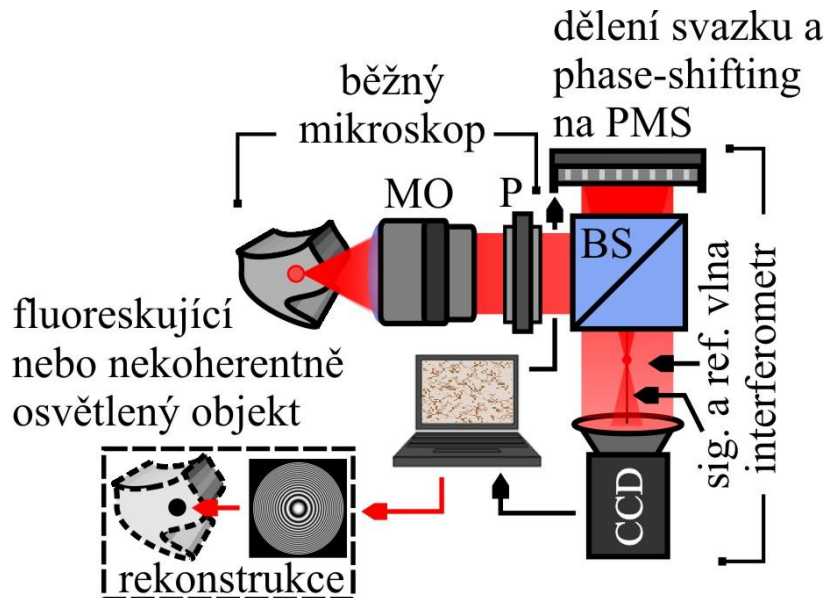
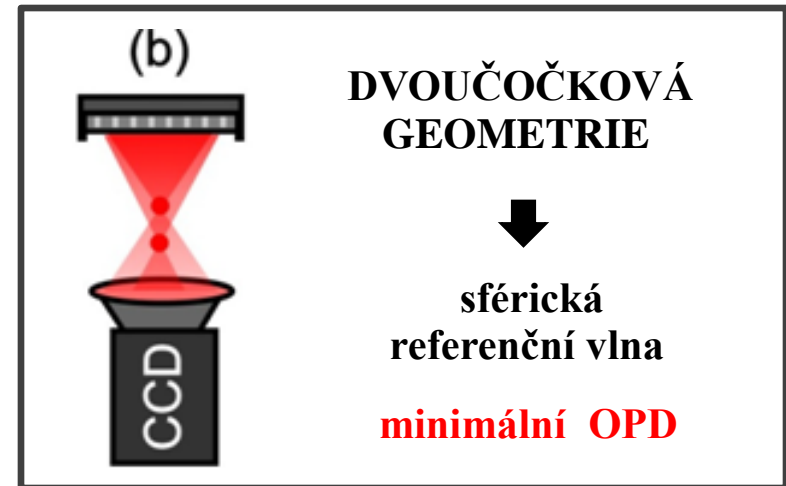
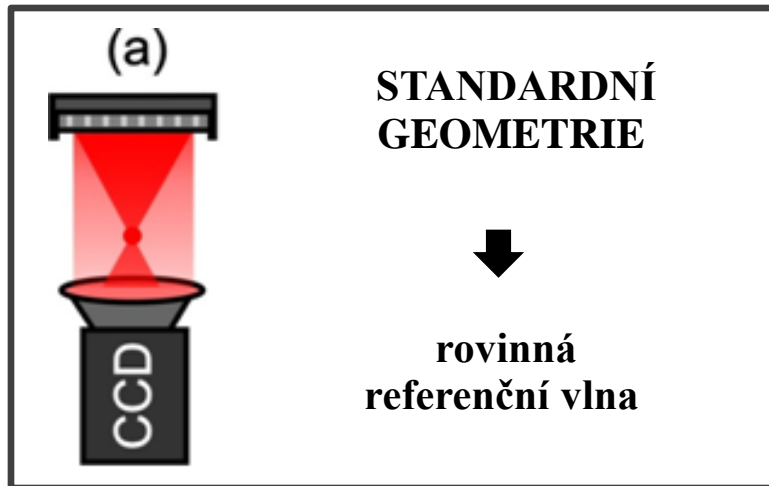
Subdifrakční rozlišení

- $\Delta x = \frac{\lambda}{Q \sin \sigma}$, $Q_{\max} \approx 2$

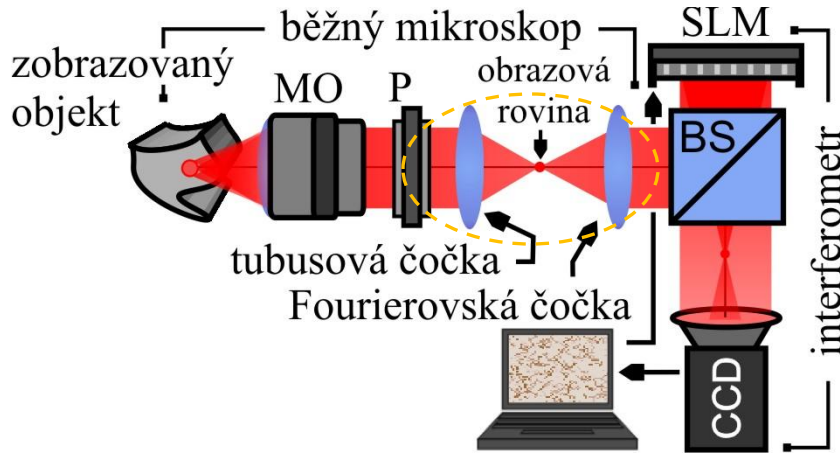
J. Rosen et al, Opt. Express 19, 26249 2011.



Základní záznamové konfigurace

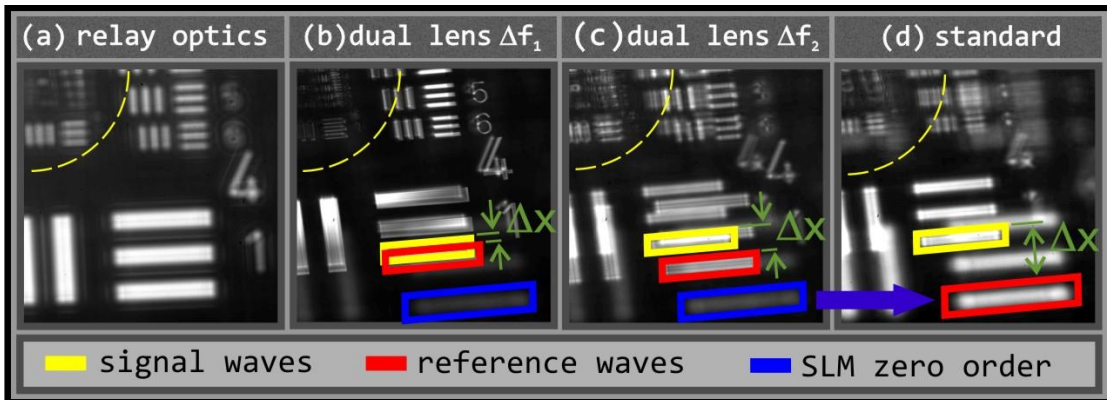
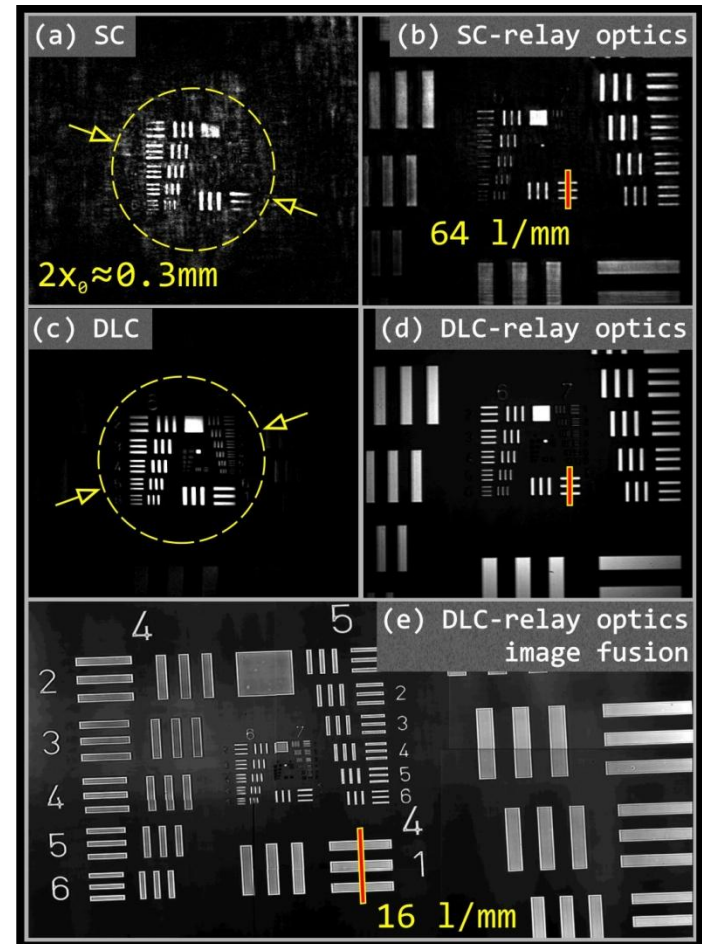


Rekonstrukce s plným korelačním překrytím



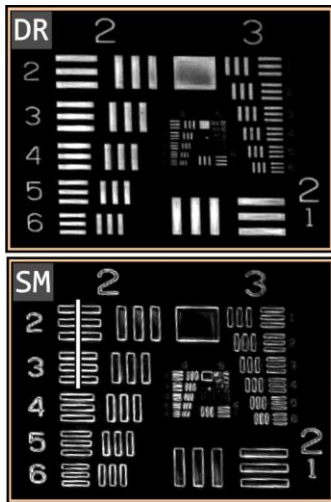
P. Bouchal, Z. Bouchal, Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams, J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public 8 13011, 2013.

- Přínos vložené optiky:**
- perfektní překrytí interferujících vln
 - výrazné rozšíření zorného pole
 - zachování rozlišení v celém zorném poli
 - přenos prostorového spektra na modulátor



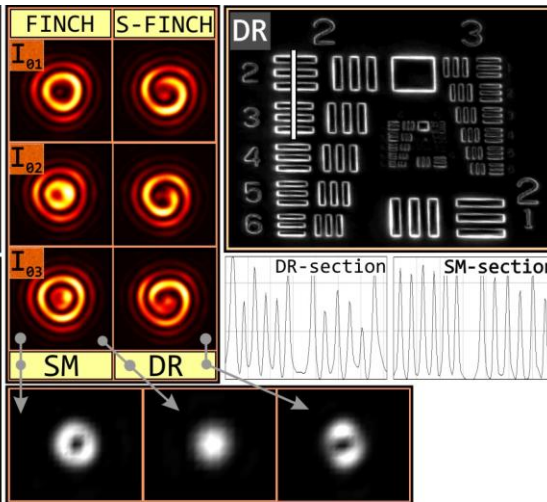
Spirální anizotropní kontrast v nekoherentním světle

Standardní rekonstrukce



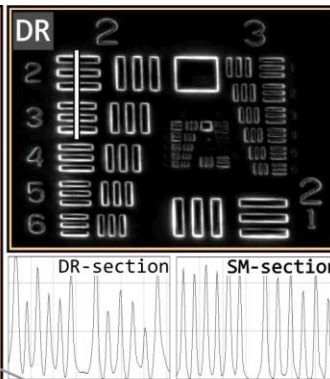
Digitální spirální rekonstrukce

Bodový záznam



Vířová a standardní PSF

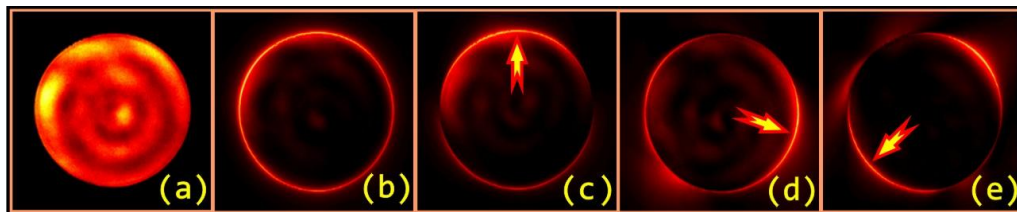
Optický spirální záznam



Přímý obraz

Izotropní spirální zobrazení

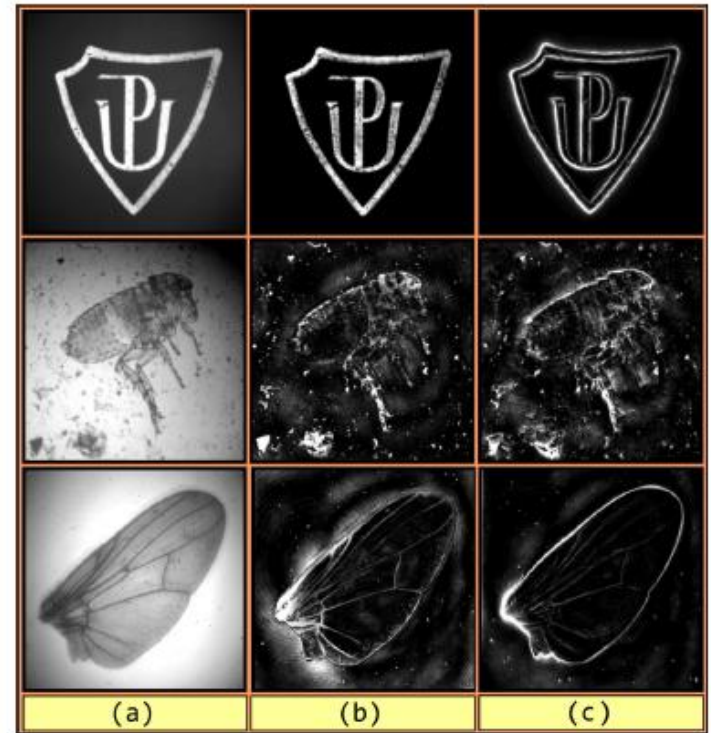
Anizotropní spirální zobrazení



Přímý obraz

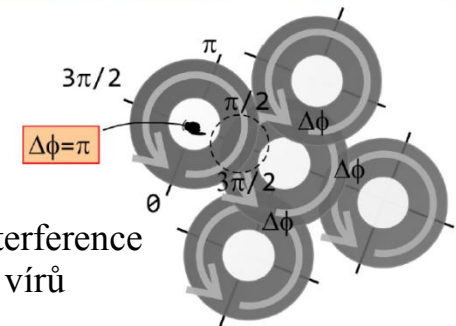
Standardní rekonstrukce

Spirální rekonstrukce



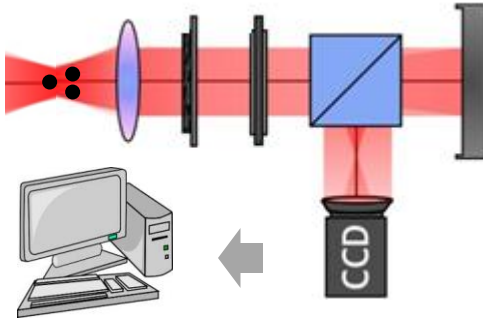
P. Bouchal, Z. Bouchal, *Opt. Letters* 37, 2949, 2012.

Destruktivní interference světelných vířů



Rotující PSF v korelační holografii

Standardní záznam

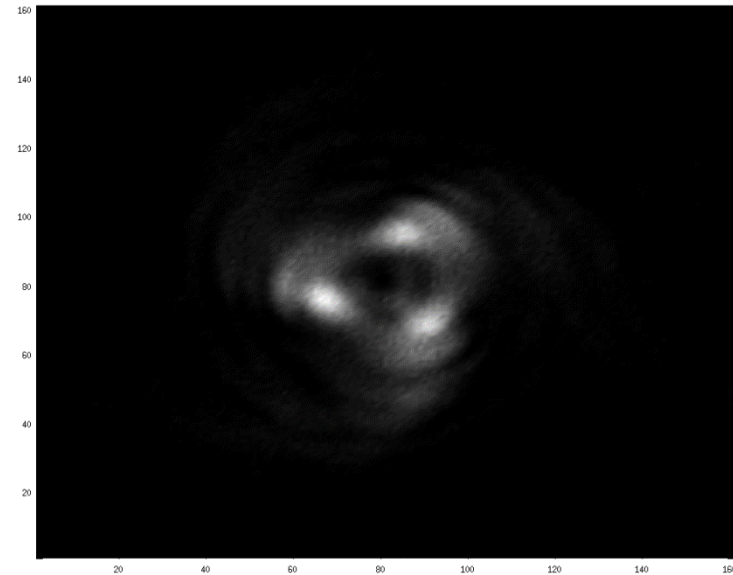


Digitální rekonstrukce
s diskrétní spirální modulací



Defokusací indukovaná
rotace PSF

Numerické rozostření experimentálně pořízeného záznamu



Využití

- Přesná lokalizace objektů v korelační mikroskopii.
- Metrologické aplikace.
- Fázové korelační zobrazení ??

Časová koherence v korelační holografii

Monochromatický režim

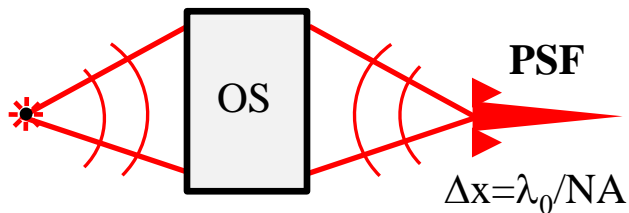
- ✓ extrémní koherenční délka
- ✓ přípustný velký rozdíl optických drah (OPD)
- ✓ možnost vysokého (sub-difrakčního) rozlišení
- ⊗
- ❖ spektrální filtry $\Delta\lambda \sim 5$ nm
- ❖ nízká intenzita signálu
- ❖ špatný poměr signál/šum

Širokospektrální režim ??

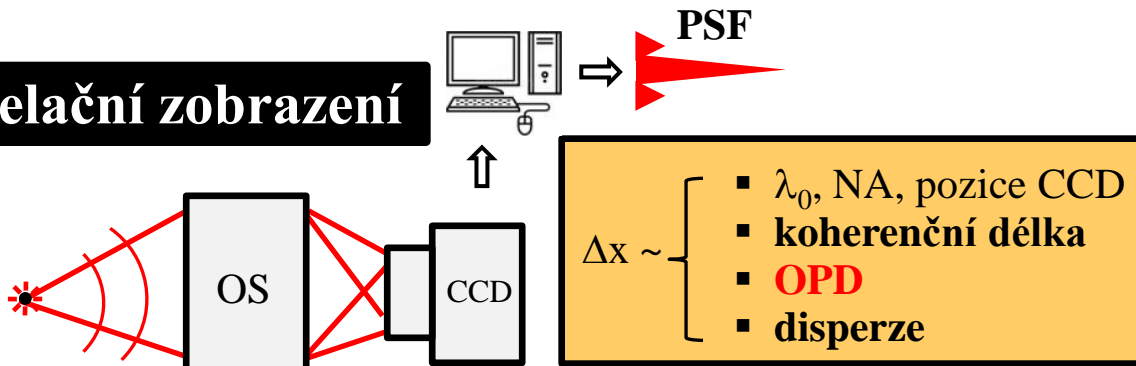
- možnost záznamu a rekonstrukce obrazu při nízké časové koherenci světla ??
- souvislost časové koherence a rozlišení ??
- zachování rozlišení při širokospektrálním osvětlení ??

Rozlišení při částečné časové koherenci světla

Optické zobrazení

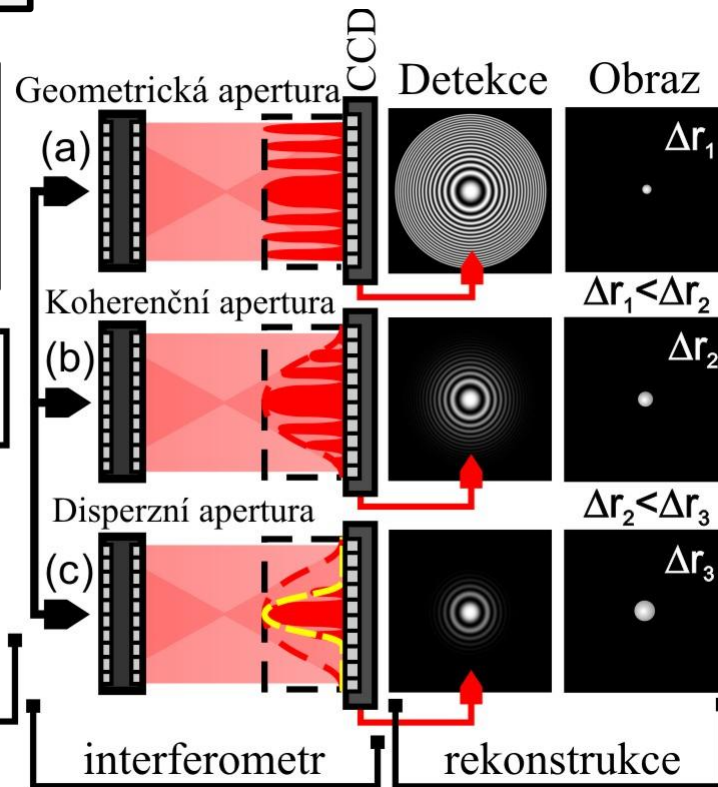
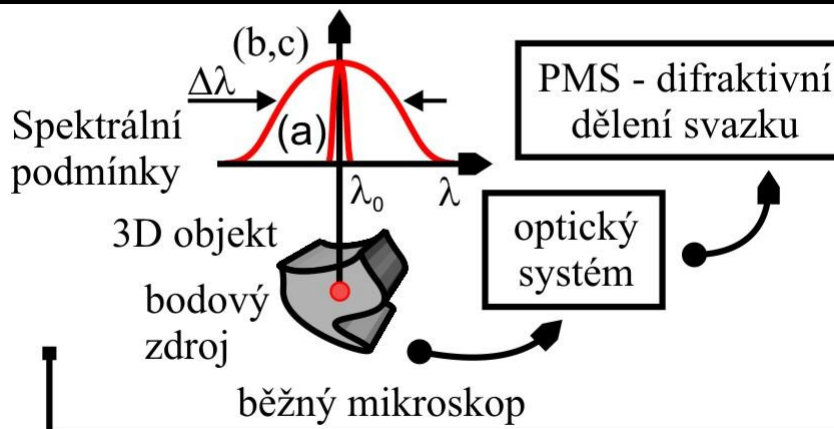


Korelační zobrazení



Koherenci indukovaná apertura

- (a) Monochromatické záření
- (b) Širokopásmové osvětlení bez vlivu disperze
- (c) Širokopásmové osvětlení s disperzí



Koherenční apertura při odstraněné disperzi

Interpretace koherenční apertury

Nekoherentní superpozice plně koherentních monofrekvenčních záznamů s vahou určenou spektrální hustotou zdroje $|g(\nu)|^2$

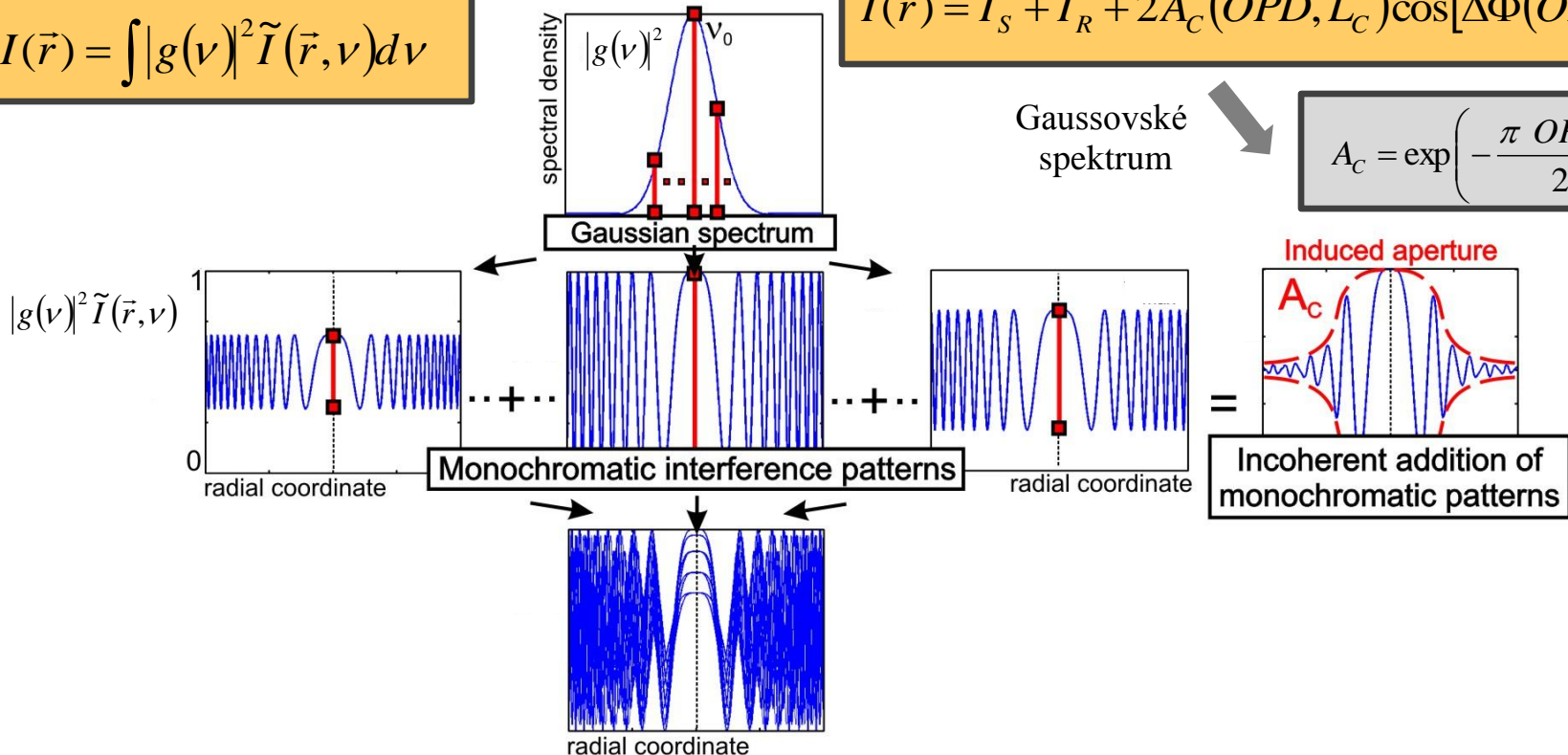
$$I(\vec{r}) = \int |g(\nu)|^2 \tilde{I}(\vec{r}, \nu) d\nu$$

Stupeň koherence s projekcí částečné časové koherence (koherenční délky L_C) do prostorové pozice

$$I(\vec{r}) = I_S + I_R + 2A_C(OPD, L_C) \cos[\Delta\Phi(OPD, \nu_0)]$$

Gaussovské spektrum

$$A_C = \exp\left(-\frac{\pi OPD^2(\vec{r})}{2L_C^2}\right)$$



Cesta k subdifrakčnímu rozlišení v bílém světle

Koherenční délka
(šířka spektra)

Fyzikální limity
rozlišení

OPD
(konfigurace experimentu)



Standardní
geometrie

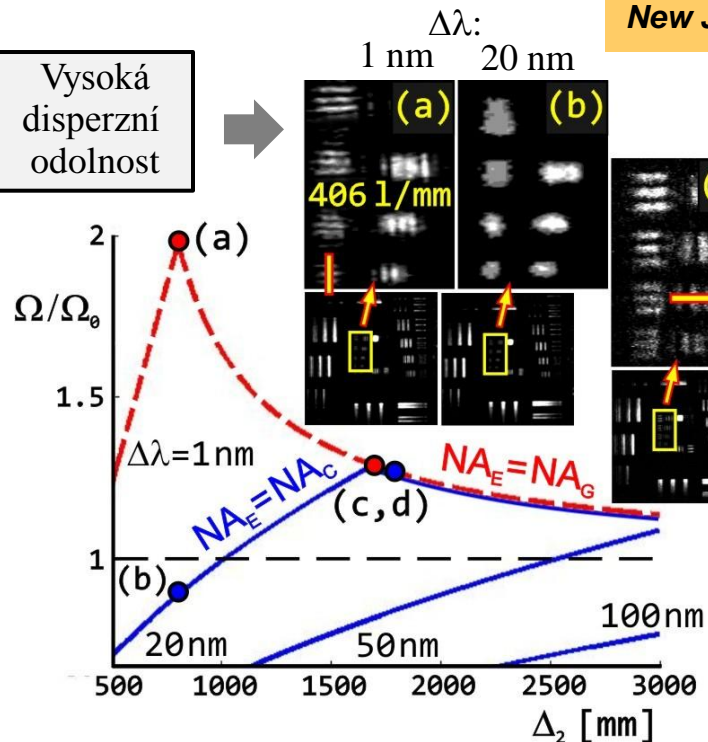
Disperze



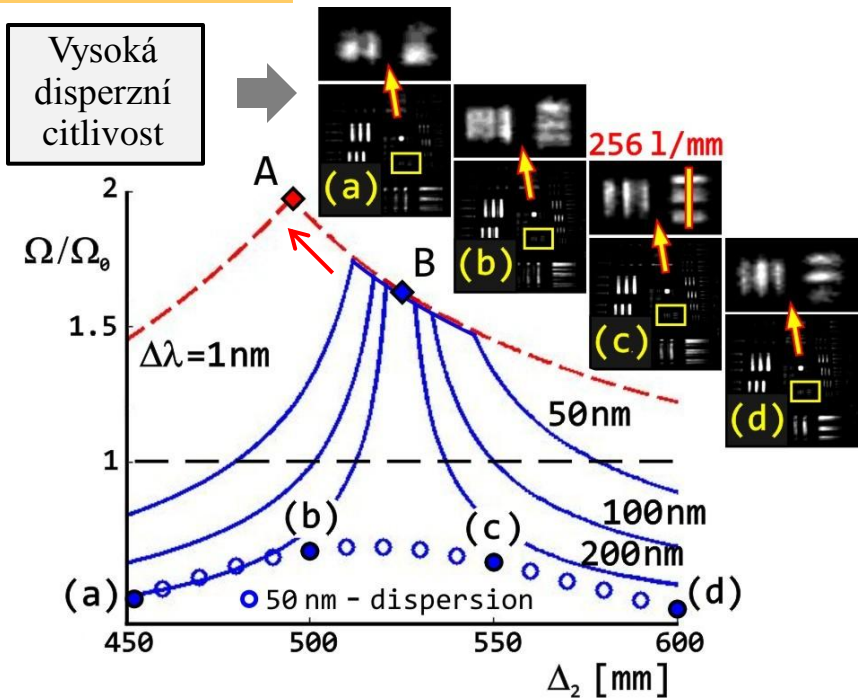
Dvoučočková
geometrie

*P. Bouchal, Z. Bouchal,
New Journal of Physics (2013, in print).*

Vysoká
disperzní
odolnost

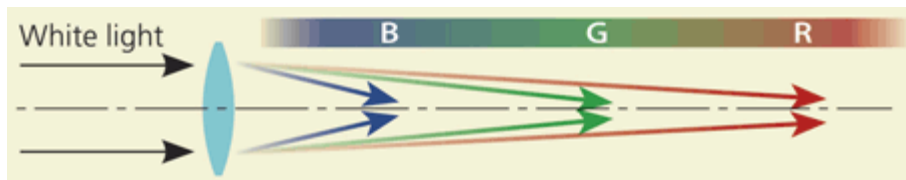


Vysoká
disperzní
citlivost

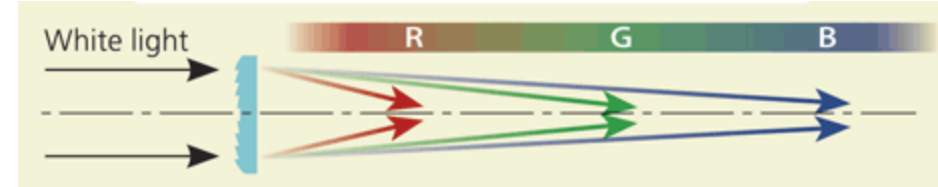


Nedisperzní korelační experimenty

Refraktivní prvek



Difraktivní prvek

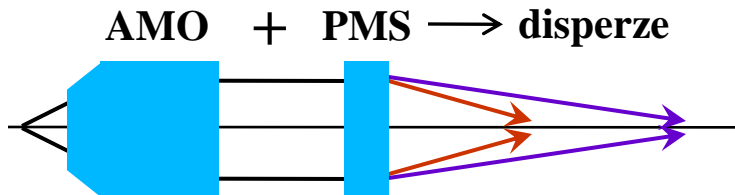


$$V_{ref} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad 35 < V_{ref} < 65$$

Abbeovo
číslo

$$V_{dif} = \frac{\lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad V_{dif} = -3.45$$

Základní experimenty



Nedisperzní experimenty

Řešení:

- hyperchromatický objektiv + PMS
- achromatický objektiv + achromatický difraktivní prvek (MOD)
- dělení vln pomocí reflexních prvků
- achromatický objektiv + korektor + PMS

Aplikační potenciál korelační holografie s PMS

Výhody

- Optický holografický záznam v širokospektrálním nekoherentním světle.
- Vysoká stabilita experimentu (jednocestný interferometr).
- Osová geometrie záznamu (možnost fázových posunutí pomocí PMS).
- Trojrozměrná numerická rekonstrukce obrazu.
- Možnost dosažení sub-difrakčního rozlišení.
- Univerzálnost metody (dynamická změna pozorovacích režimů pomocí PMS).

Nevýhoda

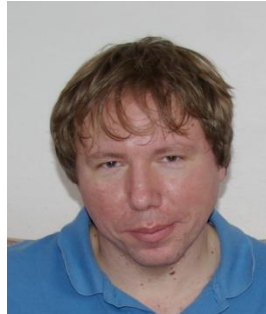
- ❖ V současném provedení nelze pozorovat fázové objekty.

Využití

- **Fluorescenční mikroskopie.**
- Rekonstrukce obrazu vzdálených objektů (holografický teleskop).
- Bezčočkový holografický záznam a rekonstrukce.
- Princip metody použitelný pro všechny oblasti EM spektra.

Spolupráce a podíl na prezentovaných výsledcích

Jaroslav Řeháček
řešitel CDO, PřF UP



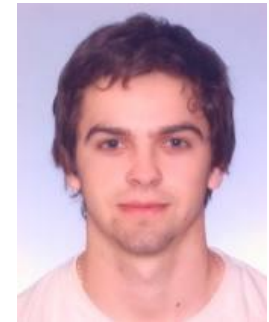
Teoretická analýza neurčitosti
úhlu a momentu hybnosti

Michal Baránek
Ph.D. student, PřF UP



Rotující PSF,
spirální mikroskopie

Petr Bouchal
Ph.D. student, VUT, CEITEC



Korelační mikroskopie,
vírová rekonstrukce obrazu

Zdeněk Hradil
vedoucí KO, PřF UP



Tomografická analýza
světelných vírů

Věra Kollárová
FSI VUT



Optické manipulace,
laserová pinzeta

Tomáš Čížmár
Univ. St. Andrews



Optické manipulace,
biofotonická pracovní stanice

Radek Čelechovský
PřF UP, Pramacom



Vírový přenos informace,
holografická pinzeta

Centrum digitální optiky TA ČR

VUT Brno

Meopta-optika, s.r.o.

Pramacom-HT, s.r.o.

UP Olomouc

Zebr, s.r.o.



Technická agentura
České republiky



Centra
kompetence

Projekt TE01020229 (Centrum digitální optiky) je řešen s finanční podporou TA ČR

Řešitel: doc. Mgr. J. Řeháček, Ph.D.

<http://cdo.optol.cz/>

PB1

Digitální Ramanova spektroskopie
a Ramanova optická aktivita

PB4

Zpracování dat S-H senzoru
v metrologii a zobrazování

PB2

Multisenzorické a hyperspektrální
zobrazovací systémy

PB3

Digitální zobrazování
s podporou PMS

Děkuji za pozornost