

Mechanické účinky světla

od slunečních plachetnic ke světelným motorům

Zdeněk Bouchal

Katedra optiky, PřF UP Olomouc



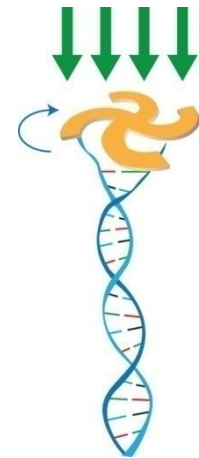
Centrum digitální optiky TA ČR



Technologická agentura
České republiky



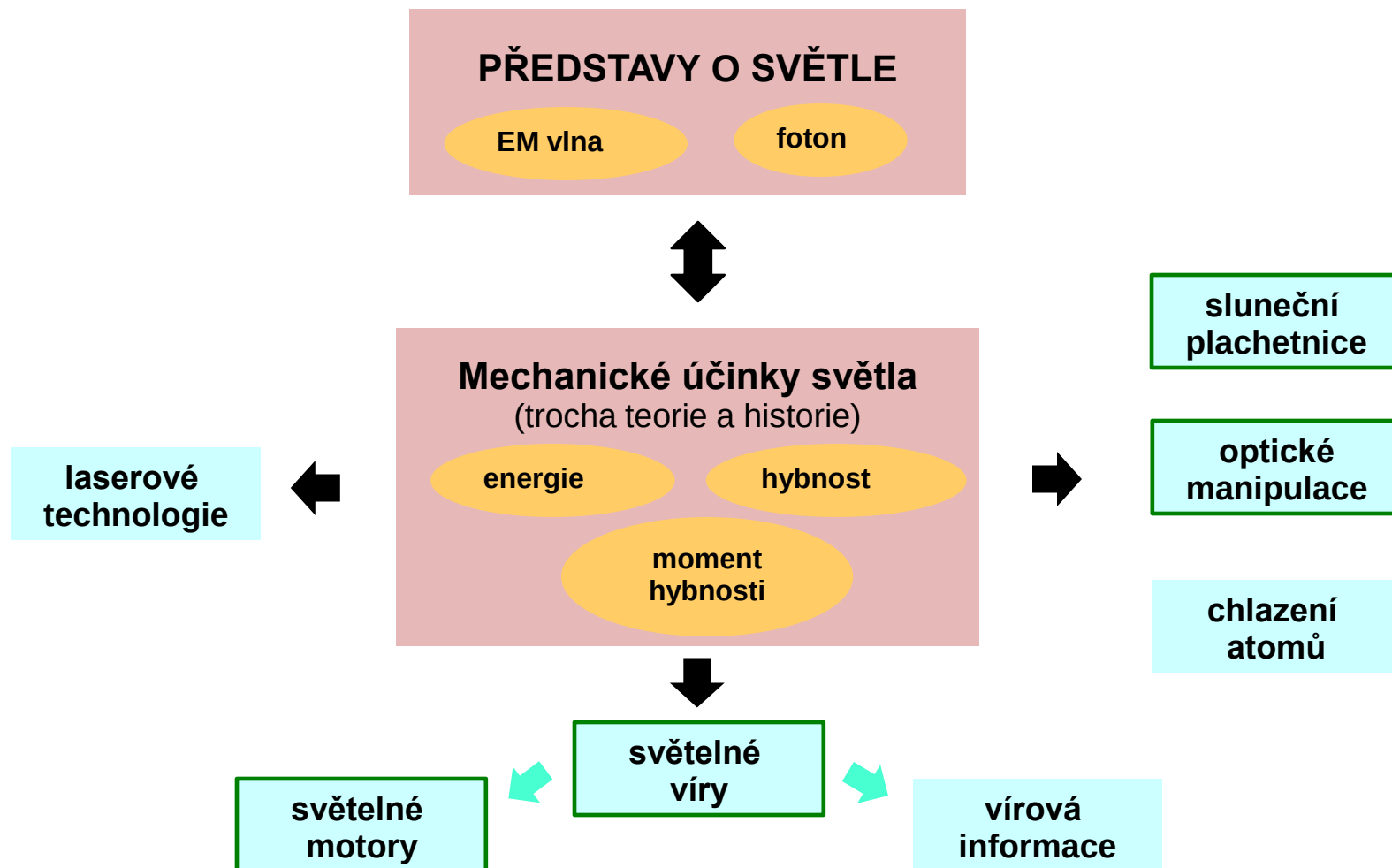
Centra
kompetence



17 listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc

Fyzikální kaleidoskop 10. 1. 2014

Obsah



Představy o podstatě světla

Světlo = elektromagnetické vlnění

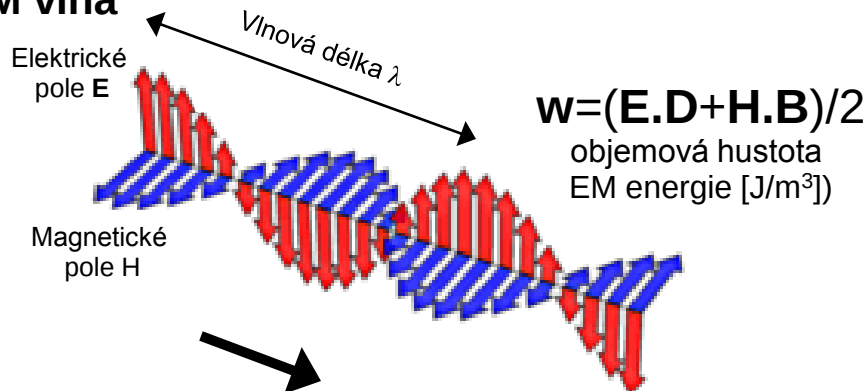
El. pole
E, D



J. C. Maxwell 1873
A treatise on electricity and magnetism

Mag. pole
H, B

EM vlna



$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

Poyntingův vektor
(hustota toku EM energie [W/m²])

$$w = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) / 2$$

objemová hustota
EM energie [J/m³]

$$g' = S / c^2$$

objemová hustota
hybnosti [Ns/m³]

Světlo = tok fotonů



M. Planck 1900
Světlo je vyzařováno a absorbováno v kvantech energie



A. Einstein 1905
Objasnění fotoelektrického jevu pomocí kvantové představy světla



G. N. Lewis 1926
Zaveden pojem foton

Foton

energie, hybnost $\times$ nulová klidová hmotnost



Spec. teorie relativity: $W^2 = (m_0 c^2)^2 + g^2 c^2$

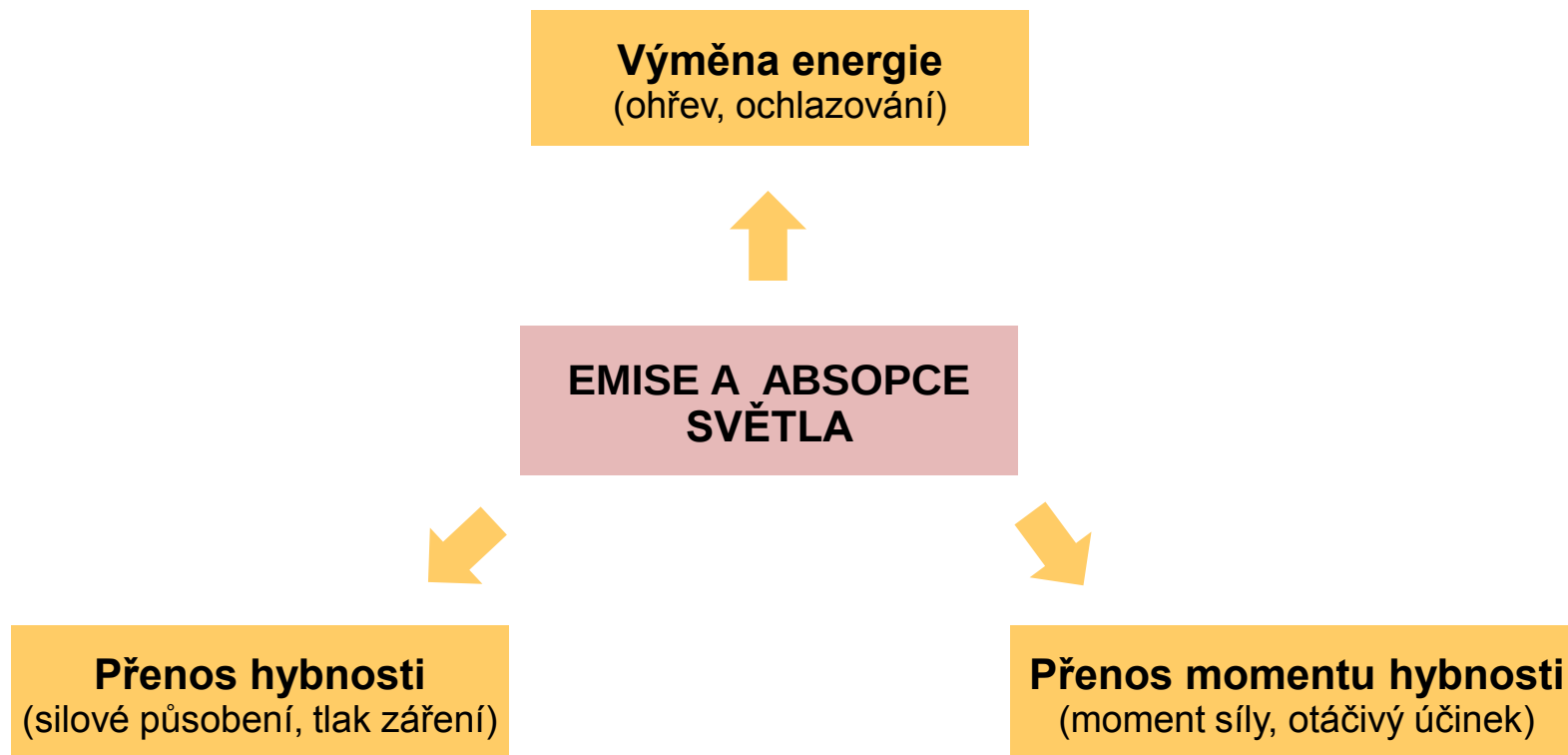
$$g = W / c = h\nu / c = h / \lambda$$

Velikost hybnosti fotonu [Ns]

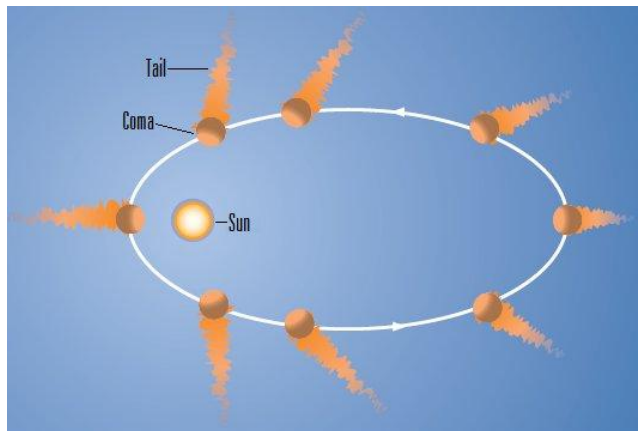
$$g = \hbar k$$

$$|k| = 2\pi / \lambda$$

Projevy při emisi a absorpci světla



Tlak záření v historických souvislostech



Klasický přístup 1600 - 1960
(Keppler, Newton, Maxwell, Lebeděv)

J. Keppler

odklon chvostu komet tlakem slunečního záření

I. Newton

hypotéza, že záření způsobuje tlak na hmotné objekty

J.C. Maxwell

předpověď hodnoty tlaku záření pomocí elektromagnetické teorie

P.N. Lebeděv

experimentální určení tlaku světla

Představa tlaku záření

Tlak na absorbující objekt

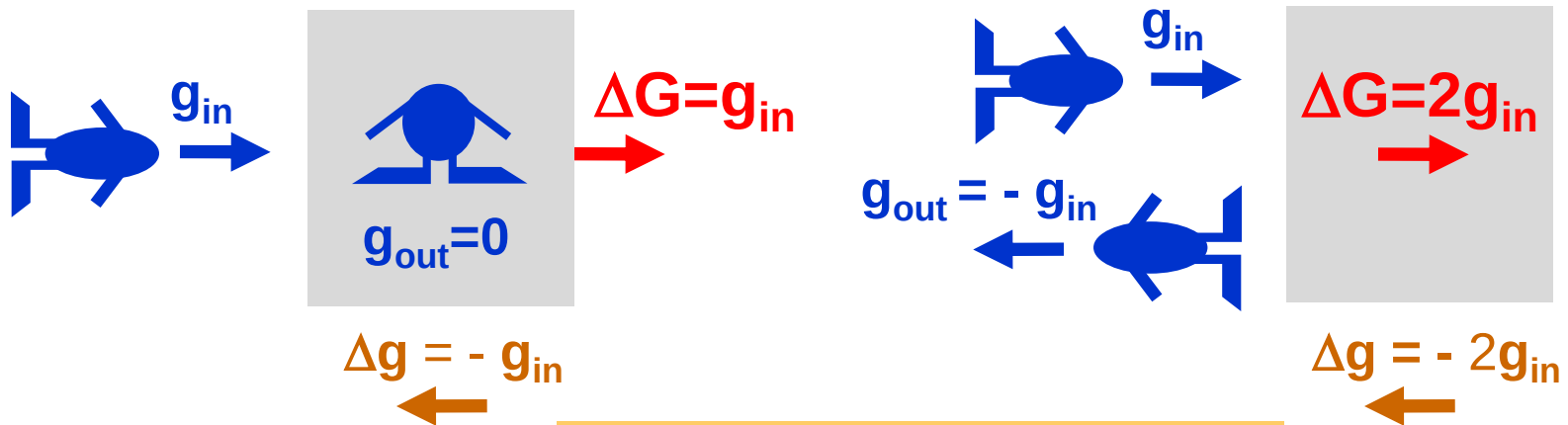
Tlak na odrážející objekt

Změna hybnosti fotonu

$$\Delta g = g_{\text{out}} - g_{\text{in}}$$

Změna hybnosti objektu

$$\Delta G$$



Zákon zachování hybnosti

$$\Delta g + \Delta G = 0$$

Neurčitost polohy a hybnosti fotonu – ohyb světla

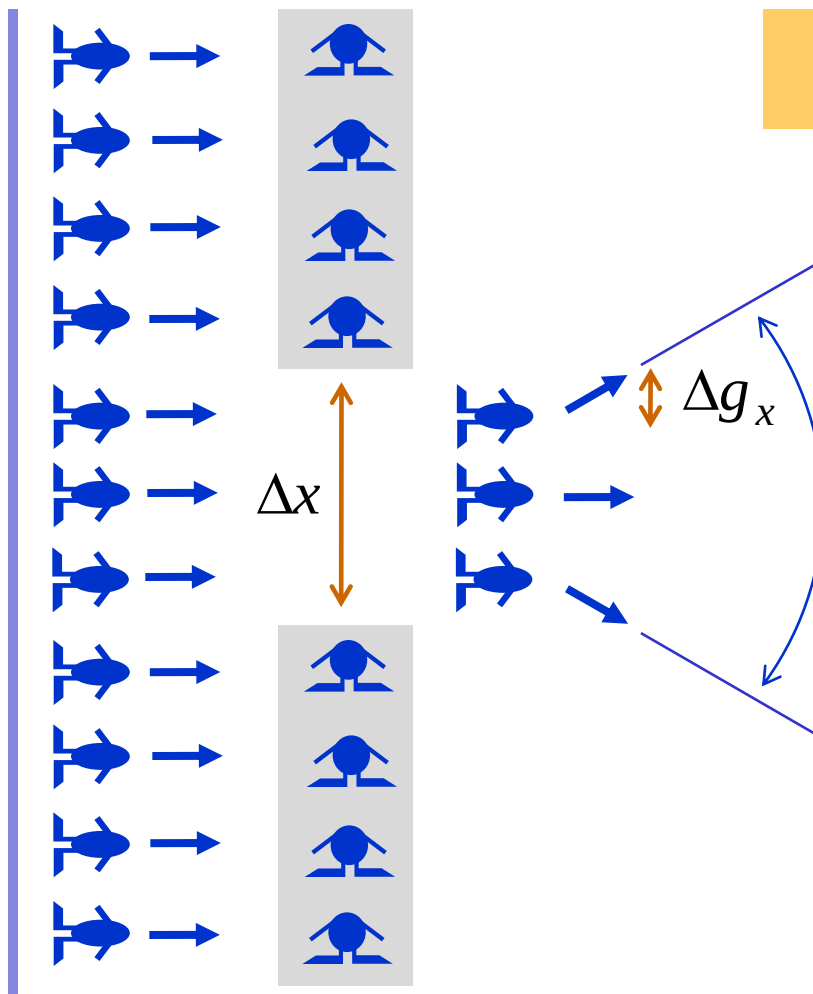
Rovinná vlna:

- úplná neurčitost polohy (konstantní amplituda)
- jednoznačně určená hybnost (směr šíření)

$$\vec{g} = \hbar \vec{k}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Štěrbina



$$\Delta x \cdot \Delta g_x = \text{konst}$$



$$\varphi \propto \frac{\lambda}{\Delta x}$$



**Ohyb světla
(difrakce)**

Proč se točí Crookesův mlýnek ?



William Crookes 1873

Konstrukce Crookesova mlýnku

Skleněná baňka s vyčerpaným vzduchem a v ní malá vrtulka uložená na jehlovém ložisku.

Vrtulka má čtyři slídové listy z jedné strany bílé a z druhé začerněné.

Vysvětlení otáčení mlýnku

▪ Původní (nesprávný) výklad :

Mlýnek se otáčí působením radičního tlaku světla, tlak na odrážející straně lopatky je 2x větší než na absorbující straně – lesklá strana se pohybuje ve směru dopadajícího světla.

Při demonstracích se mlýnek otáčí na opačnou stranu !!!

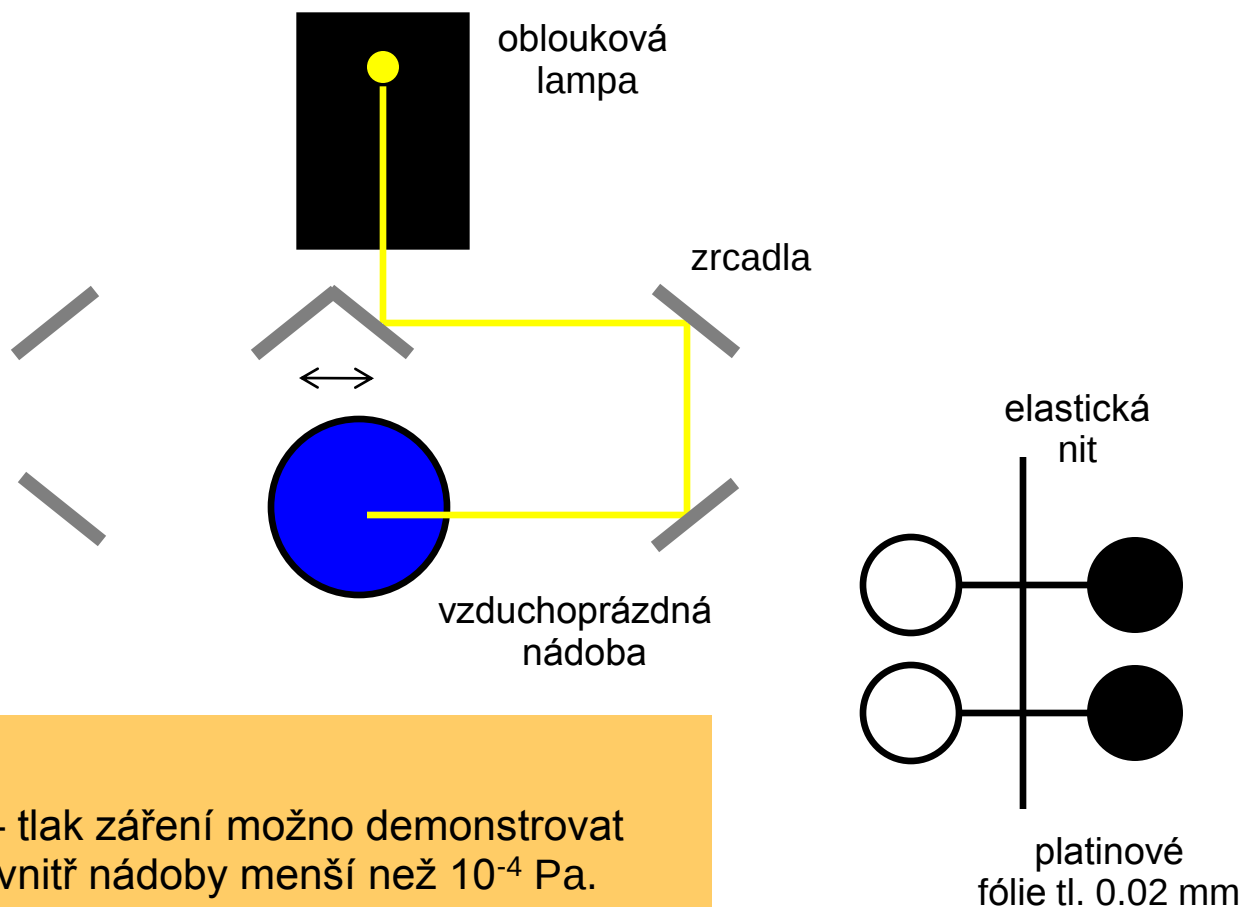
▪ Současná interpretace:

Vzduch není z baňky dokonale vyčerpán – lopatky jsou ve zředěném plynu, který se u absorbující strany lopatky více zahřívá (molekuly plynu mají vyšší kinetickou energii) a působí vyšším tlakem než na odrážející straně lopatky.

Tlak záření je nesrovnatelně menší než tepelné efekty.

Experimentální demonstrace tlaku záření

P. N. Lebeděv Annalen der Physik, 6, 433, 1901.



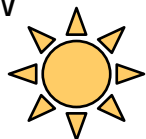
Nežádoucí vliv:

- radiometrické jevy – tlak záření možno demonstrovat tehdy, pokud je tlak uvnitř nádoby menší než 10^{-4} Pa.

Odhad velikosti tlaku záření

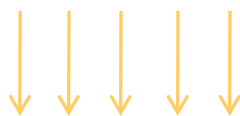
Tlak slunečního záření na Zemi

Vyzářený výkon
 $P = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$



1 AU = $1.5 \times 10^8 \text{ km}$

Intenzita na
povrchu Země
 $I = 1360 \text{ W/m}^2$



$p = 4.5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$

Tlak záření [Pa]:

I Intenzita [W/m^2]

$$p = \frac{I}{c}$$

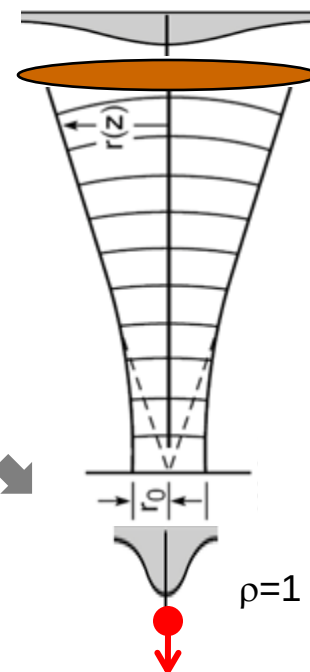
Vstupní svazek - HeNe laser :
 $P = 20 \text{ mW}$, $\lambda = 632 \text{ nm}$, $r = 0.5 \text{ mm}$
 $I = 50 \text{ W/m}^2$

$$P = \frac{1}{2} \pi I r_0^2$$

Fokusevaný svazek, $r_0 = 5 \mu\text{m}$:
 $I = 5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$

$p = 1.7 \text{ Pa}$

Tlak laserového svazku



$\rho = 1 \mu\text{m}$

$F = 5 \text{ pN}$

Využití hybnosti světla

Sluneční plachtění (pohyb vesmírem)



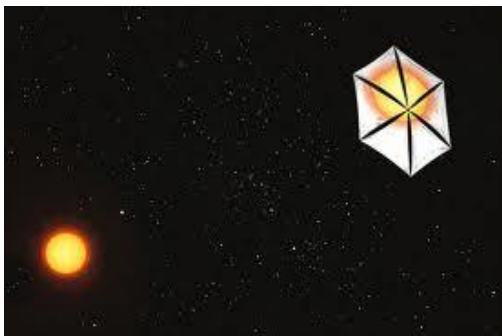
K. Ciolkovskij 1920

první úvahy o praktickém
využití slunečního plachtění



F. Tsander 1924

představa meziplanetárního
létání pomocí obrovských
tenkých zrcadel



Optické manipulace (ovládání mikrosvěta)



A. Ashkin 1970

objev principu zachycení mikroobjektů
pomocí laseru (laserová pinzeta)



Princip a podmínky slunečního plachtění

Sluneční pohon:

přenos hybnosti EM (slunečního) záření na odraznou plachtu

Malá hybnost (tlak) fotonu

Velké rozměry plachty

(nutnost zachycení velkého počtu fotonů)

Malá hmotnost plachty

(dosažení co největšího zrychlení)

Plachetnice navržená pro Luna Cup 1994

rozměry plachty:

$$A=62 \times 62 \text{ m}^2$$

celková hmotnost :

$$m=250 \text{ kg}$$

odrazivost plachty:

$$R=85\%$$



tlak záření při absorpci (1AU):

$$p=4.5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

síla působící na plachtu:

$$F=2 p R A=3 \times 10^{-2} \text{ N}$$

zrychlení:

$$a=F/m=0.12 \text{ mm/s}^{-2}$$

Výhody slunečního pohonu

Malá ale stálá akcelerace:

$a=1 \text{ mm/s}^2$, 1 rok, $\Delta v=32 \text{ km/s}$, náklad 1.5x těžší než plachetnice

Vysoká hodnota specifického impulsu:

$I_{sp} \sim 8 \times 10^4 \text{ Ns/kg}$ (raketový pohon $I_{sp} \sim 4.5 \times 10^3 \text{ Ns/kg}$)

Raketová rovnice:

$$m = m_0 \exp\left(-\frac{\Delta v}{I_{sp}}\right)$$

Spotřeba paliva rakety:

$$\frac{m_0}{m} = \exp\left(\frac{3.2 \times 10^4}{4.5 \times 10^3}\right) = 1225$$

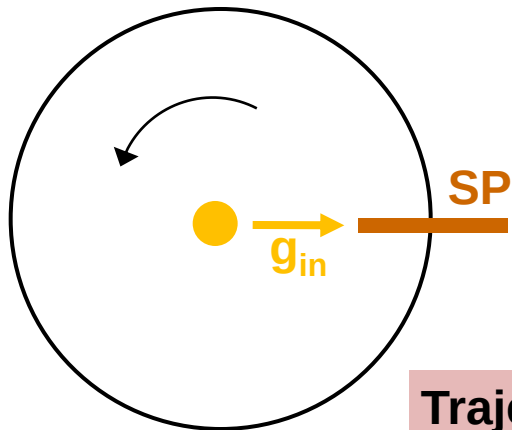


Se solárním pohonem je možné pronikat do hlubokého vesmíru.

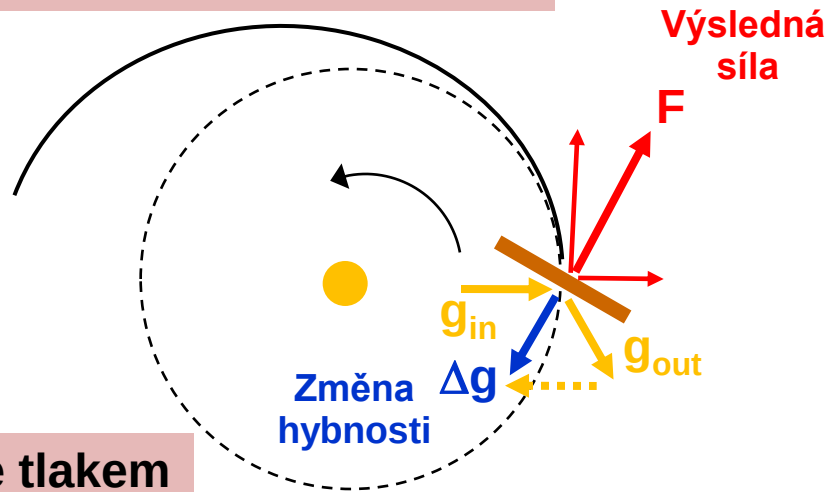
Sluneční plachetnice se mohou pohybovat mimo Keplerovské oběžné dráhy – je možné dosáhnout libovolné pozice ve sluneční soustavě.

Řízení směru pohybu sluneční plachetnice

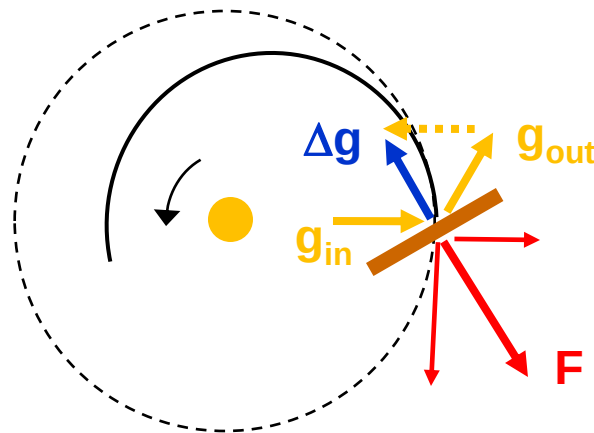
Trajektorie neovlivněná tlakem záření



Trajektorie se tlakem záření otevírá



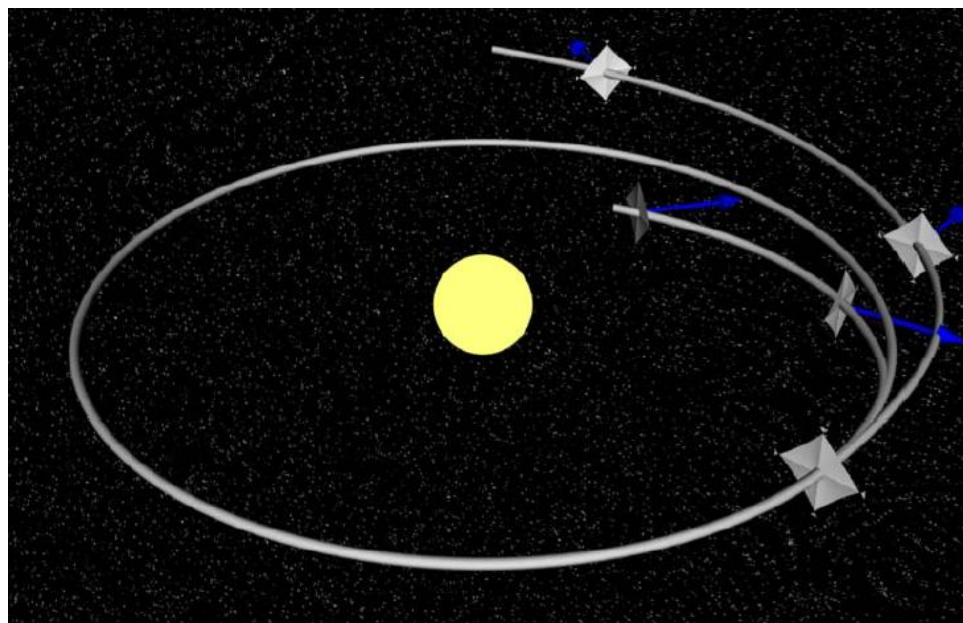
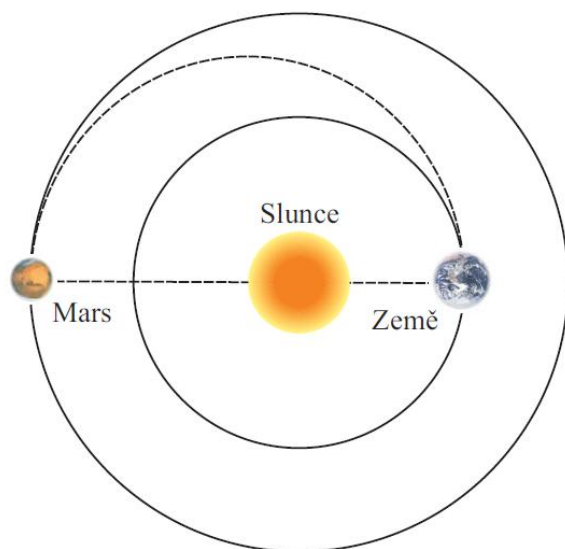
Trajektorie se tlakem záření uzavírá



Změna oběžné dráhy plachetnice

Hohmannova elipsa

optimální dráha pro přelet mezi
dvěma blízkými planetami

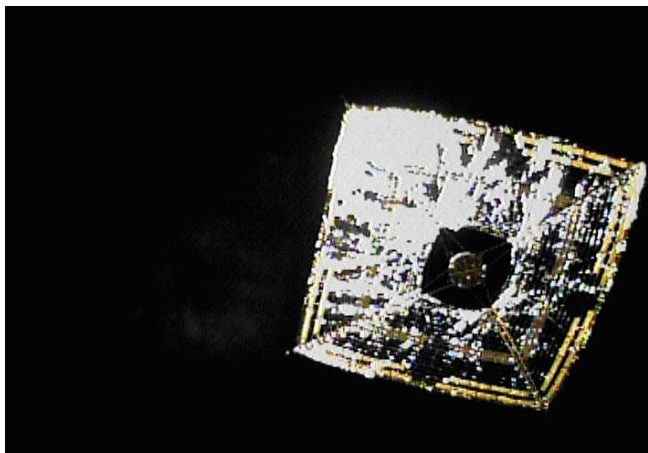


První ověření slunečního plachtění



IKAROS - Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun

květen 2010 první solární plavidlo – pohon zajištěn tlakem slunečního záření, systém doplněn slunečními články

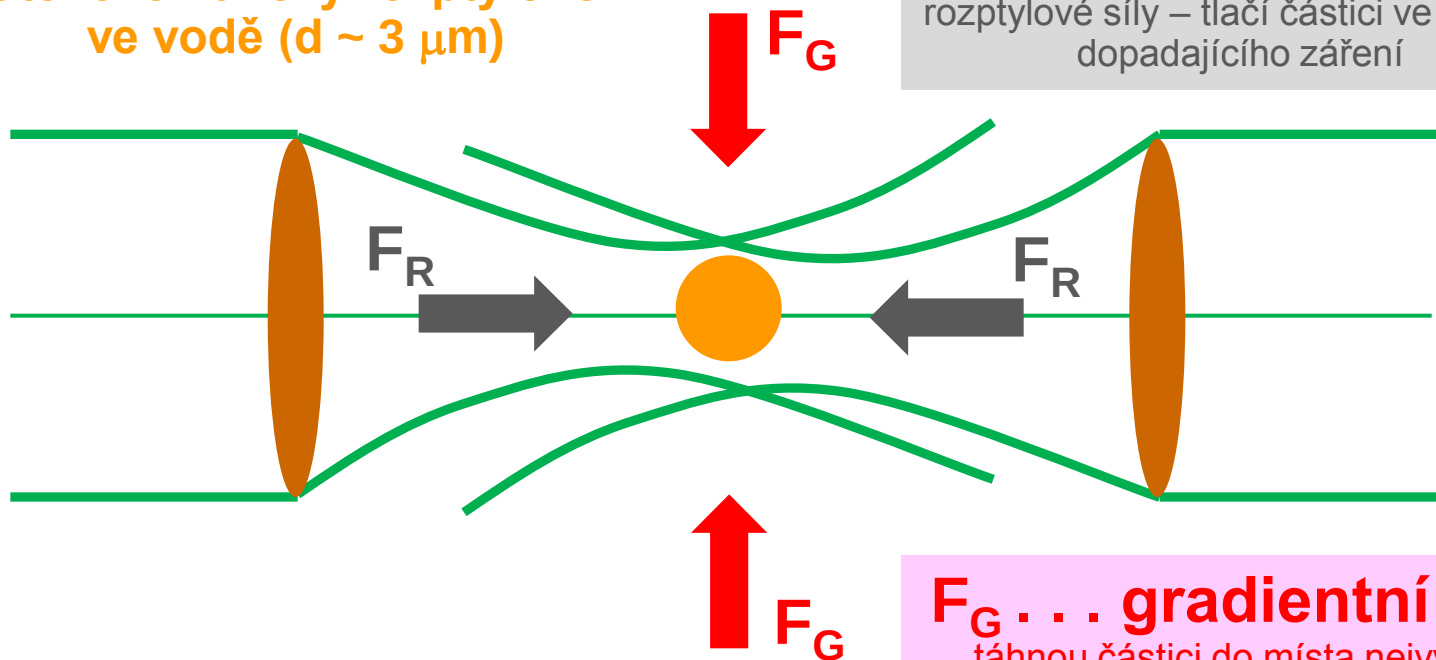


Rozměry plachty: 14x14 m², tl. 7.5 μm
Náklad: 310 kg

Počátky optických manipulací

A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. 24, 156, 1970

latexové kuličky rozptýlené
ve vodě ($d \sim 3 \mu\text{m}$)



F_R . . . **radiační síly**
rozptylové síly – tlačí částici ve směru
dopadajícího záření

F_G . . . **gradientní síly**
táhnou částici do místa nejvyšší
intenzity svazku

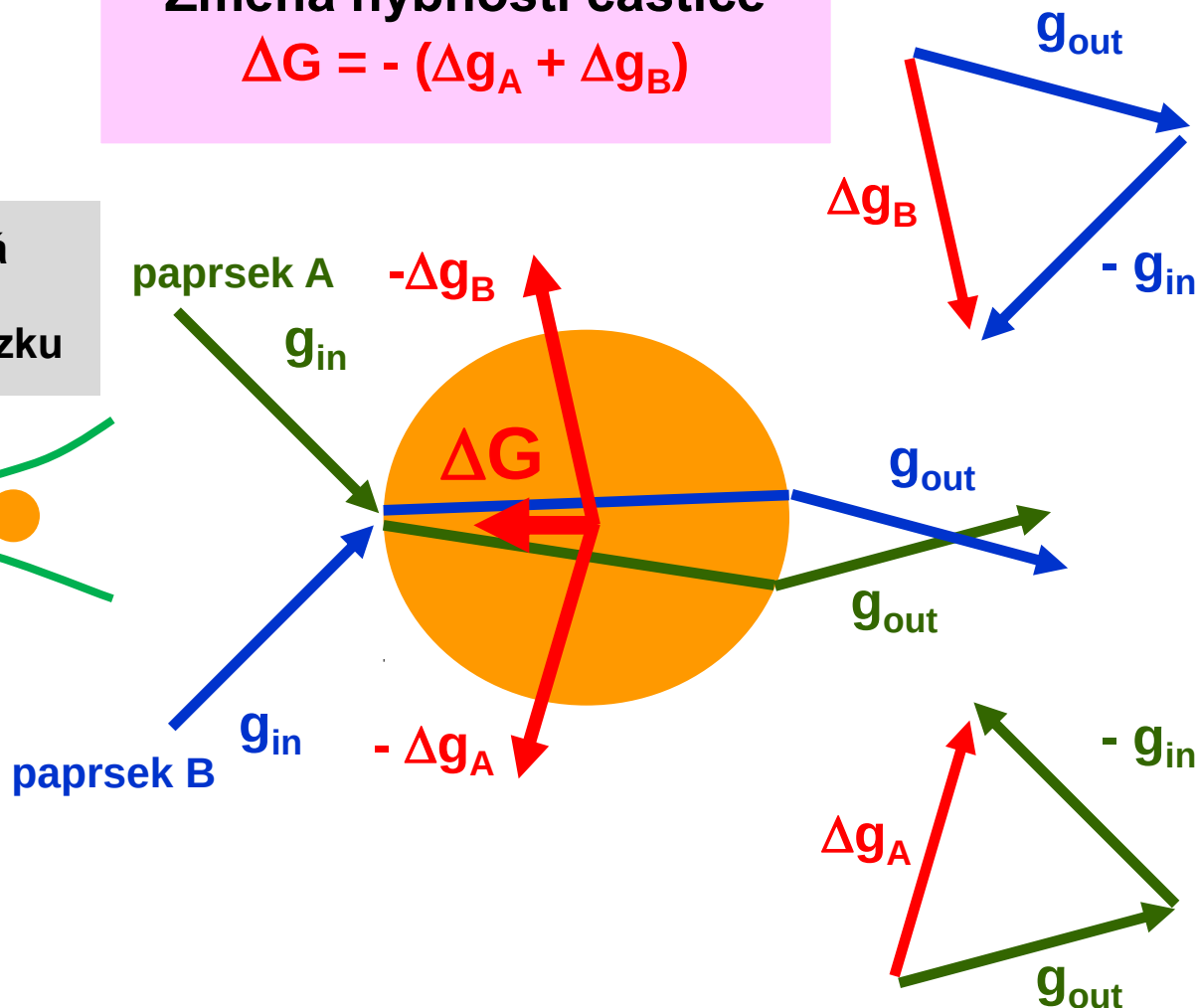
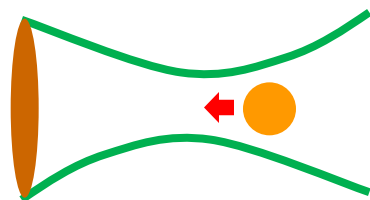
pološířka pasu svazku $w_0 \sim 6 \mu\text{m}$
výkon svazku 10 mW

Axiální působení gradientní síly

Změna hybnosti částice

$$\Delta G = -(\Delta g_A + \Delta g_B)$$

částice umístěná
za pasem
fokusevaného svazku

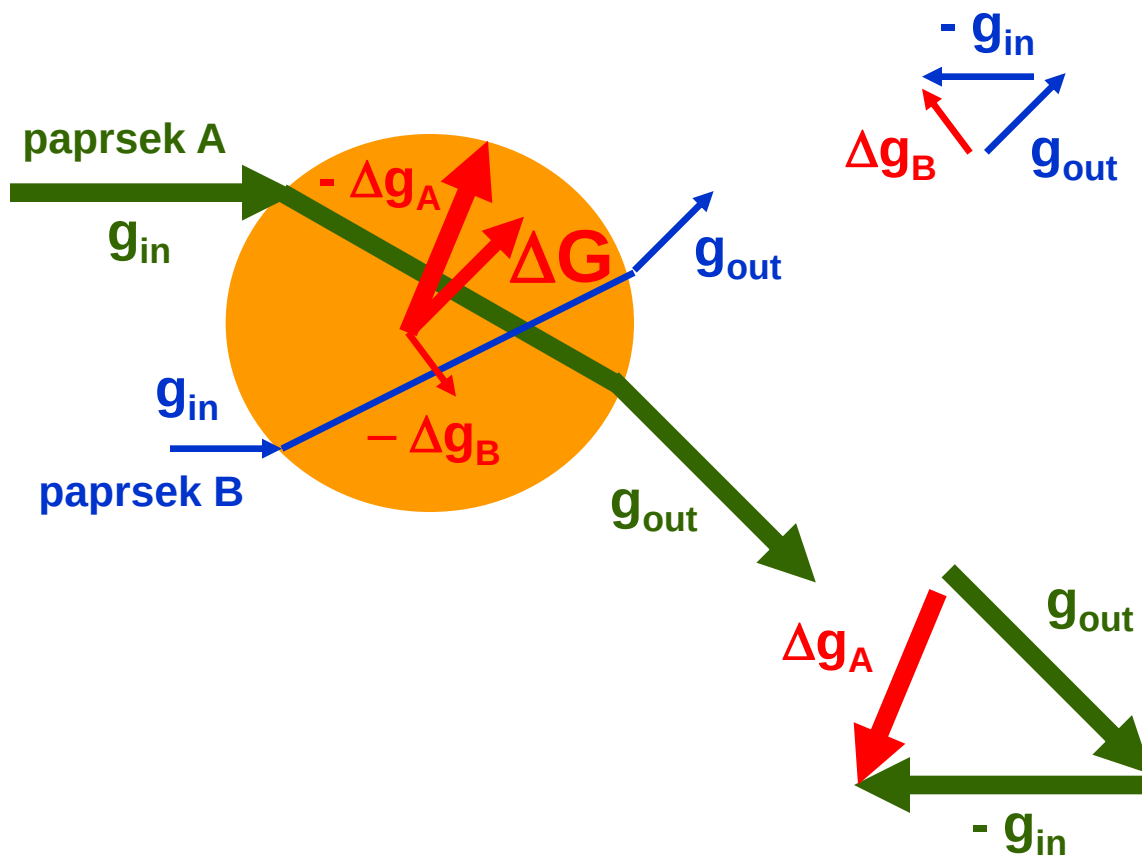
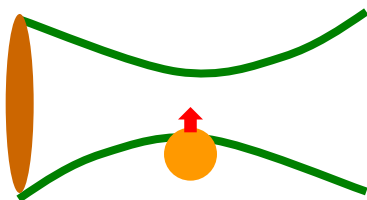


Příčné působení gradientní síly

Změna hybnosti částice

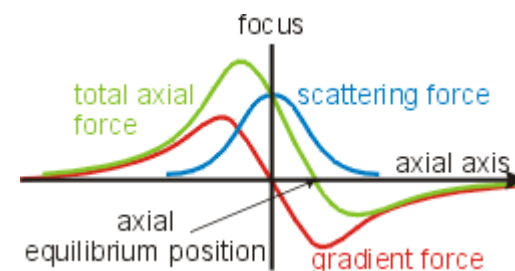
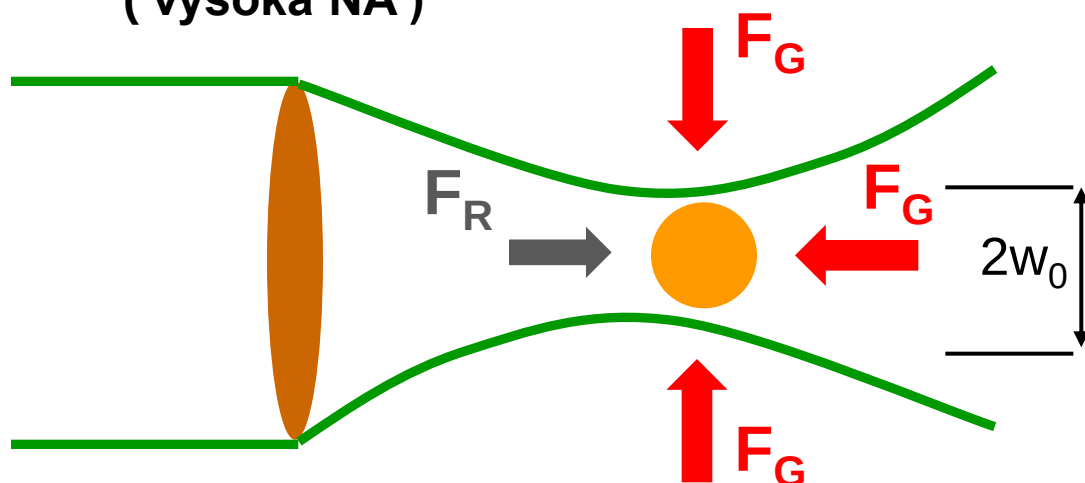
$$\Delta G = -(\Delta g_A + \Delta g_B)$$

částice v nesymetrické poloze vzhledem k pasu svazku



Jednosvazkové laserová pinzeta

mikroskopový objektiv
(vysoká NA)



F_R . . . rozptylová síla

F_G . . . gradientní síly

w_0 . . . poloměr pasu

q_0 . . . Rayleighova vzdálenost

Účinky sil:

Rozptylová síla tlačí částici
ve směru šíření svazku.

Gradientní síly přemísťují
částici do místa největší
intenzity svazku.

Rozměry zachycených částic
10 nm – 10 μ m

Základní konstrukce laserové pinzety

ARTICLE PREVIEW
[view full access options](#)

NATURE COMMUNICATIONS | ARTICLE

Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers

Min-Cheng Zhong, Xun-Bin Wei, Jin-Hua Zhou, Zi-Qiang Wang & Yin-Mei Li

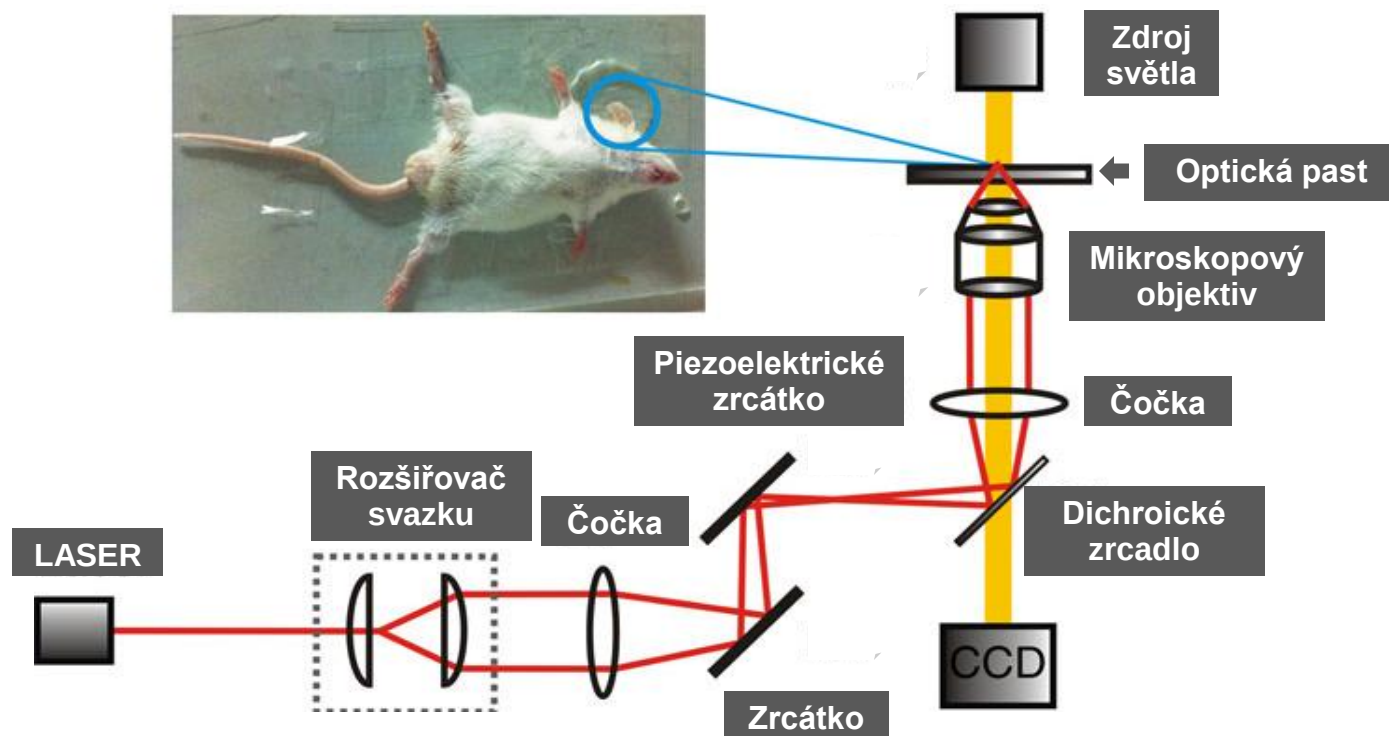
[Affiliations](#) | [Contributions](#) | [Corresponding authors](#)

Nature Communications 4, Article number: 1768 | doi:10.1038/ncomms2786
Received: 31 July 2012 | Accepted: 22 March 2013 | Published: 23 April 2013

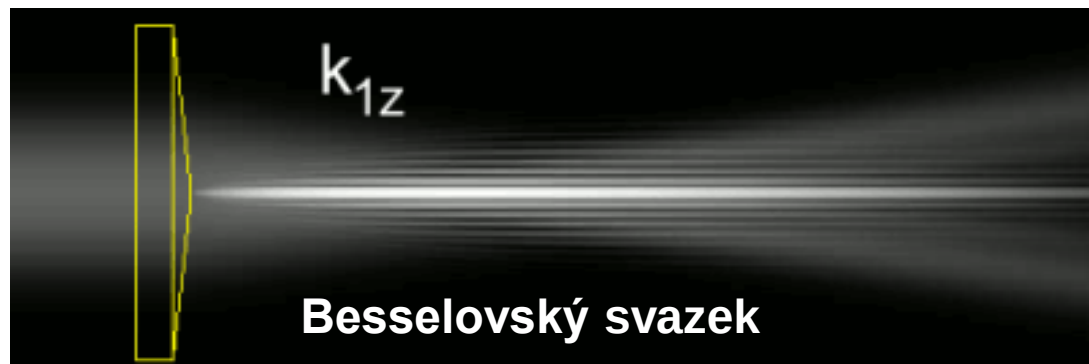
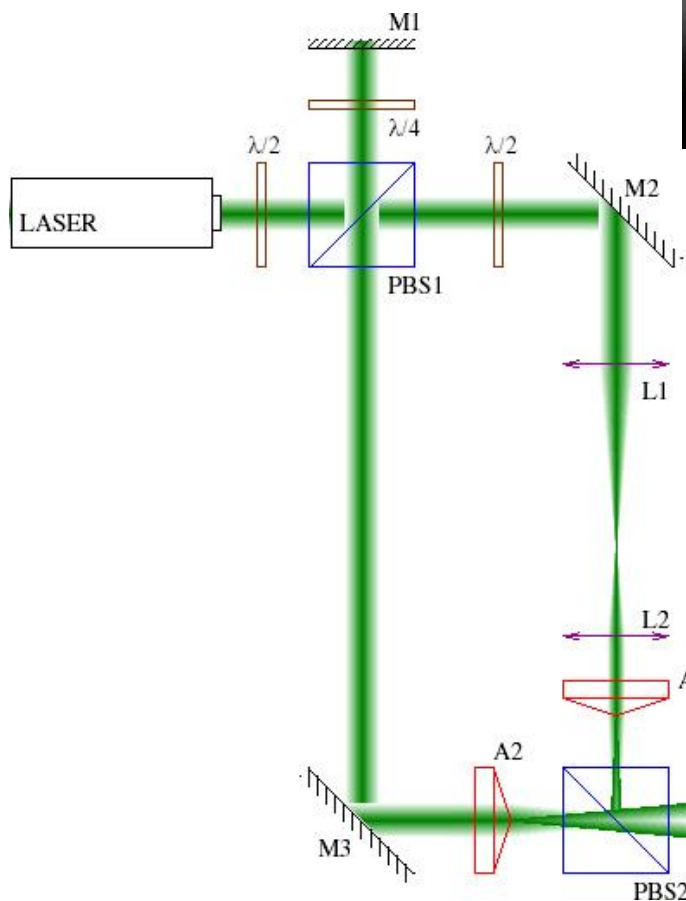


Science jobs

Science events



Optický transport částic



New Journal of Physics
The open-access journal for physics

Sub-micron particle organization by self-imaging of non-diffracting beams

Tomáš Čížmár¹, Věra Kollárová², Zdeněk Bouchal²
and Pavel Zemánek¹

¹ Institute of Scientific Instruments, Academy of Sciences of the Czech Republic, Královopolská 147, 612 64 Brno, Czech Republic

² Department of Optics, Palacky University, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, Czech Republic

Demonstrace optického dopravníku



KATEDRA OPTIKY
UP OLOMOUC



Video dostupné na: <http://iopscience.iop.org/1367-2630/8/3/043/fulltext/>

Demonstrace optické vazby

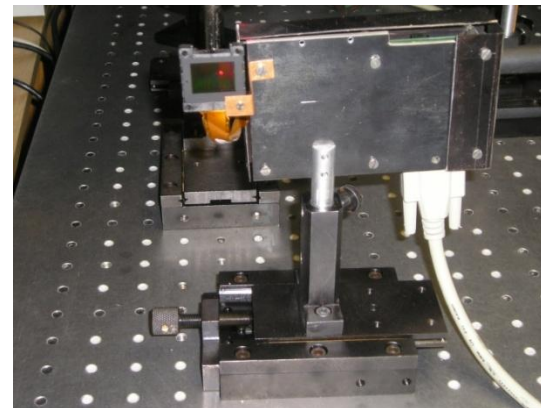
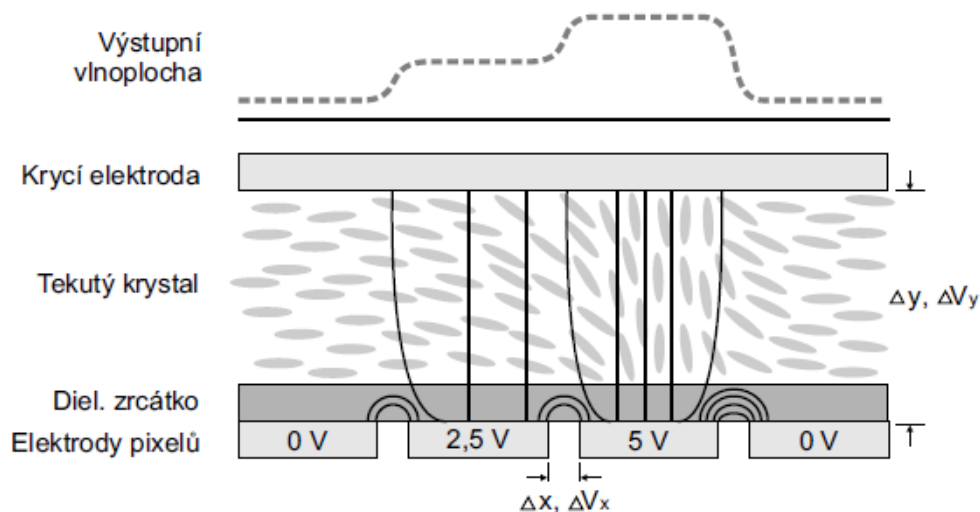


KATEDRA OPTIKY
UP OLOMOUC



Video dostupné na: <http://iopscience.iop.org/1367-2630/8/3/043/fulltext/>

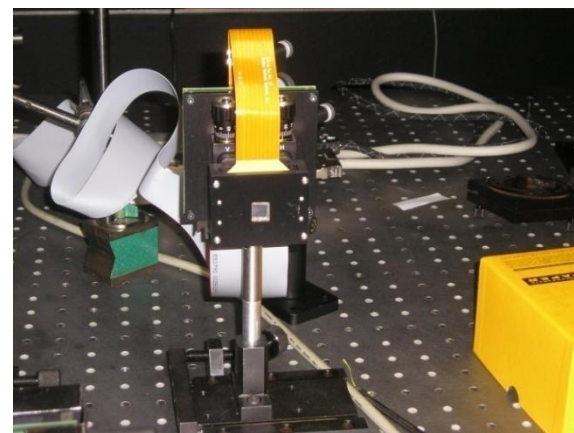
Dynamické pasti – prostorová modulace světla



CRL Opto 1024x768

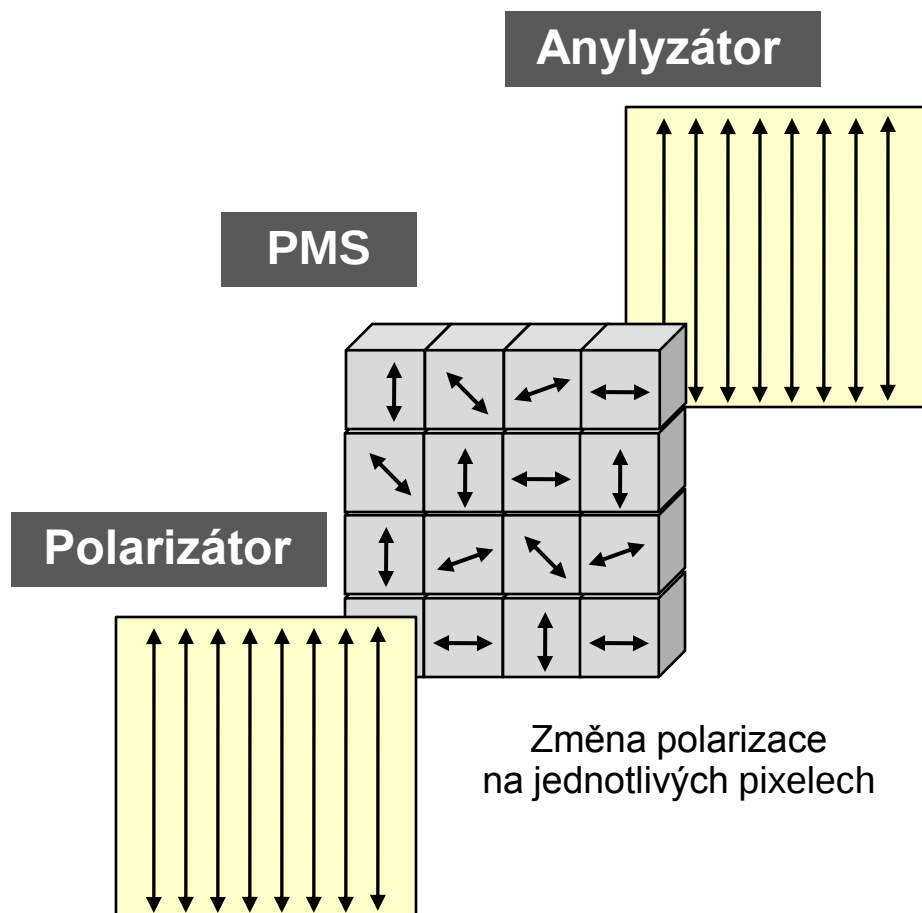


Hamamatsu 800x600

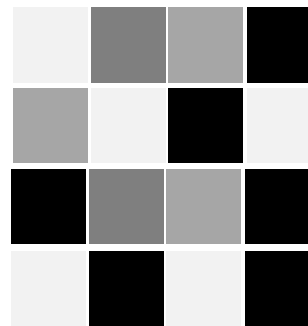


Boulder 512x512

Princip amplitudové modulace světla



Intenzita modulovaného svazku



Intenzita vstupního svazku



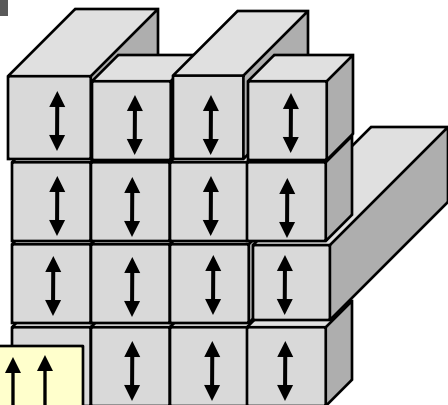
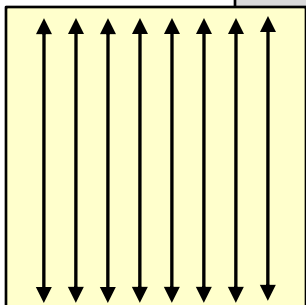
Princip fázové modulace světla

Změna optické tloušťky (OT)
jednotlivých pixelů
($OT = \text{ind lomu} \times \text{geom tloušťka}$)



PMS

Polarizátor



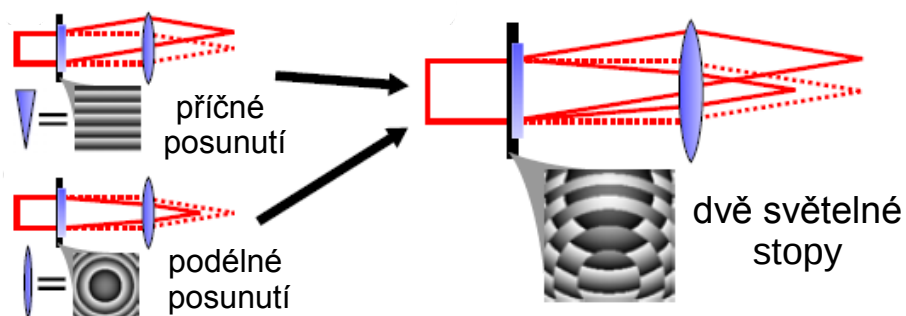
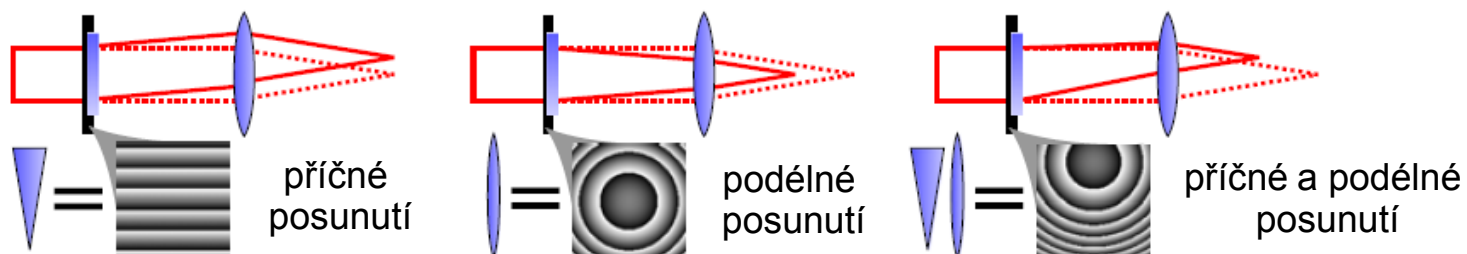
Modulovaná vlnoplocha



Vstupní vlnoplocha



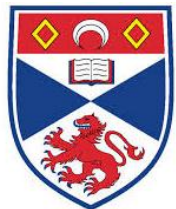
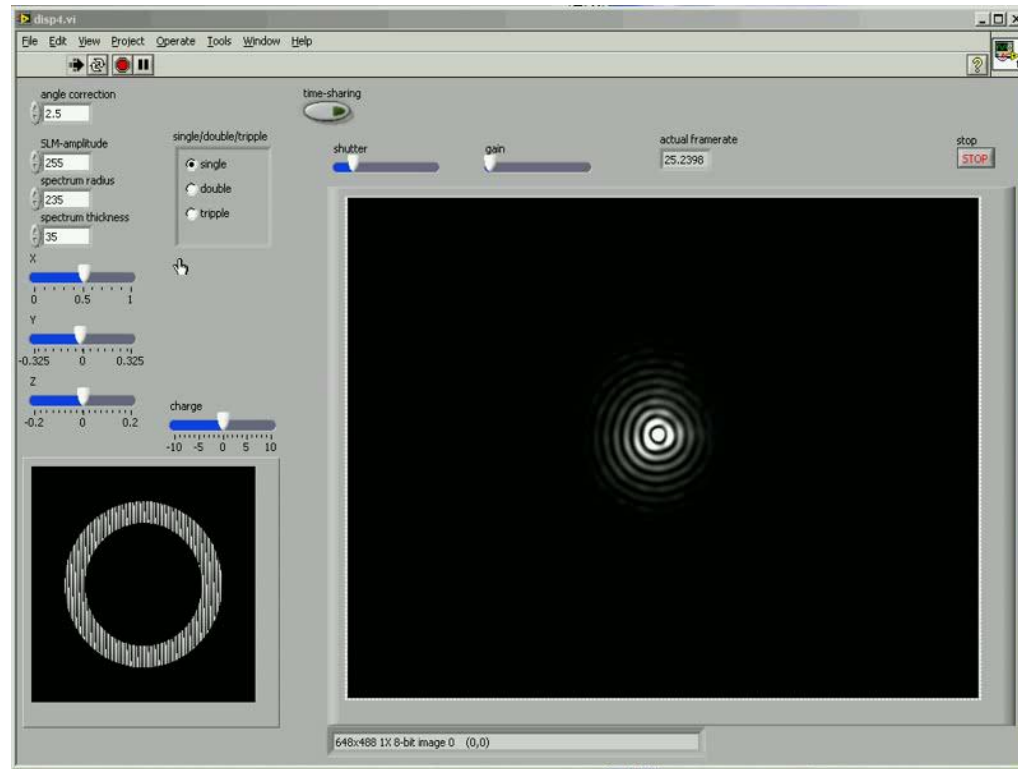
Použití prostorové modulace světla



[Home](#)[Current Issue](#)[Issues in Progress](#)[Past Issues](#)[Focus Issues](#)[Optics InfoBase](#) > [Optics Express](#) > [Volume 16](#) > [Issue 18](#) > Page 14024

Generation of multiple Bessel beams for a biophotonics workstation

T. Čižmár, V. Kollárová, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, and K. Dholakia »[View Author Affiliations](#)



University
of
St Andrews

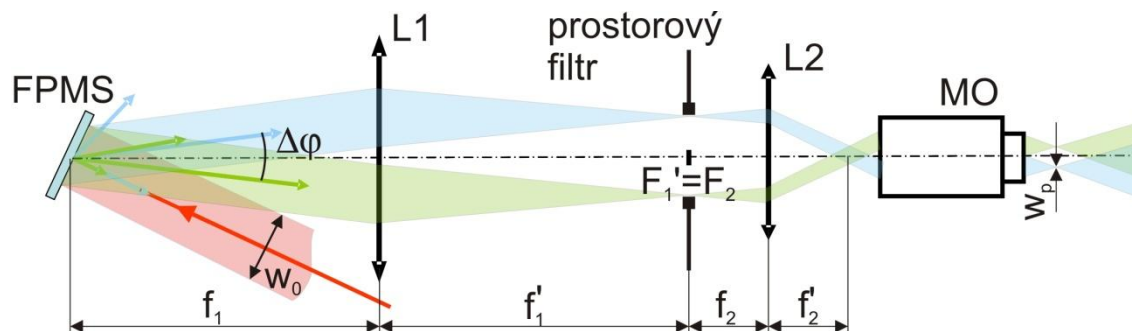
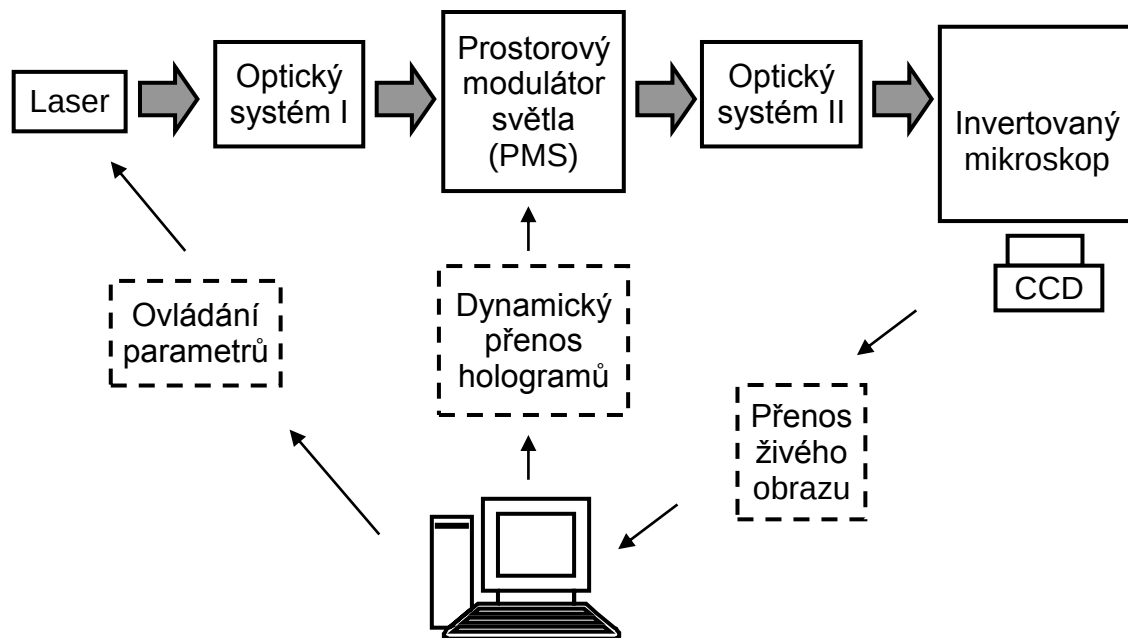


Katedra optiky
UP Olomouc

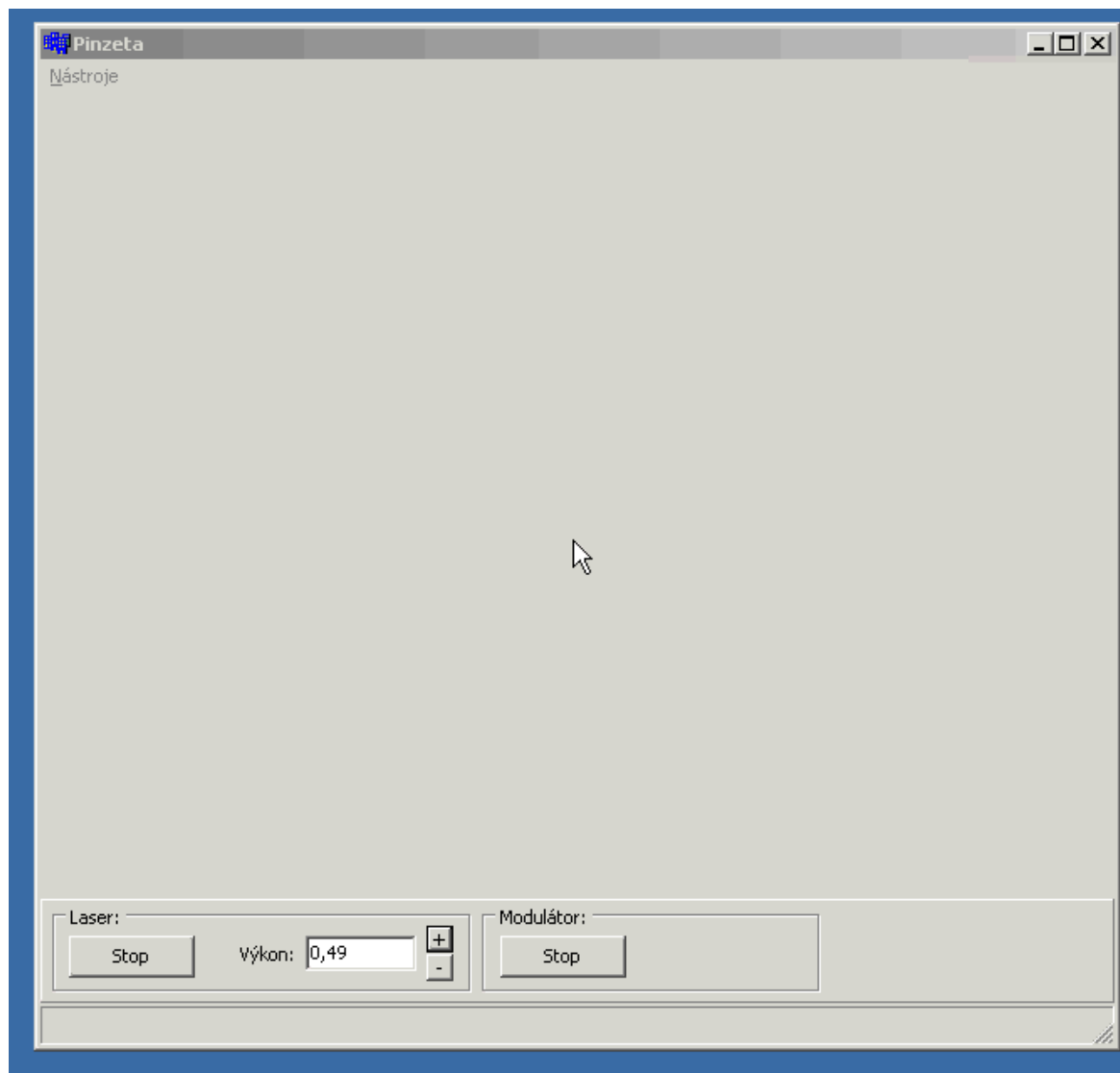
Video dostupné na:

<http://www.opticsinfobase.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-16-18-14024&id=171298>

Holografická laserová pinzeta (UP Olomouc)



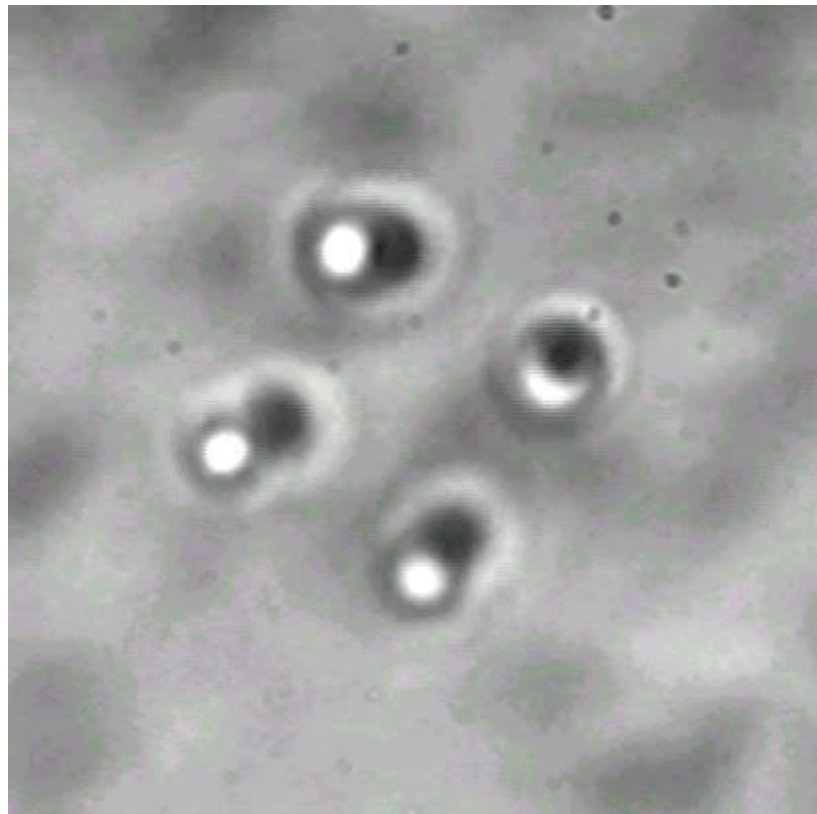
Dynamické optické manipulace (UP Olomouc)



3D optické manipulace



University
of Glasgow



Moment hybnosti světla

Spin

částice rotují
kolem vlastní osy

**Orbitální moment
hybnosti**

částice obíhá
kolem osy svazku

**EM vlna s kruhovou
polarizací**

Vírový svazek
(svazek se šroubovitou vlnoplochou)

Moment hybnosti světla – historické souvislosti

Experimentální ověření spinu světla R. Beth 1936

JULY 15, 1936

PHYSICAL REVIEW

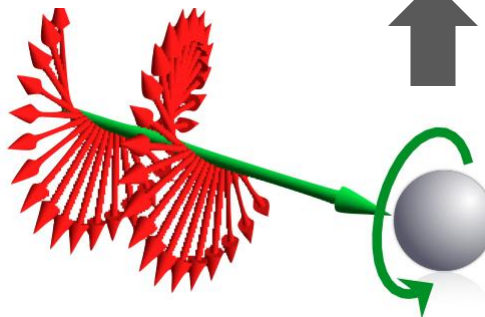
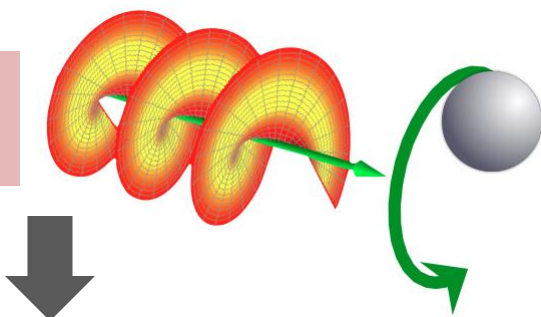
VOLUME 50

Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light

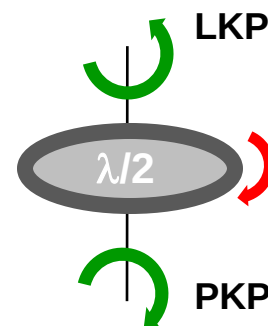
RICHARD A. BETH,* *Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Mass. and Palmer Physical Laboratory, Princeton University*

(Received May 8, 1936)

Vírový
svazek



Vlna s kruhovou
polarizací



Objevení orbitálního momentu hybnosti světla L. Allen 1992

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 45, NUMBER 11

1 JUNE 1992

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

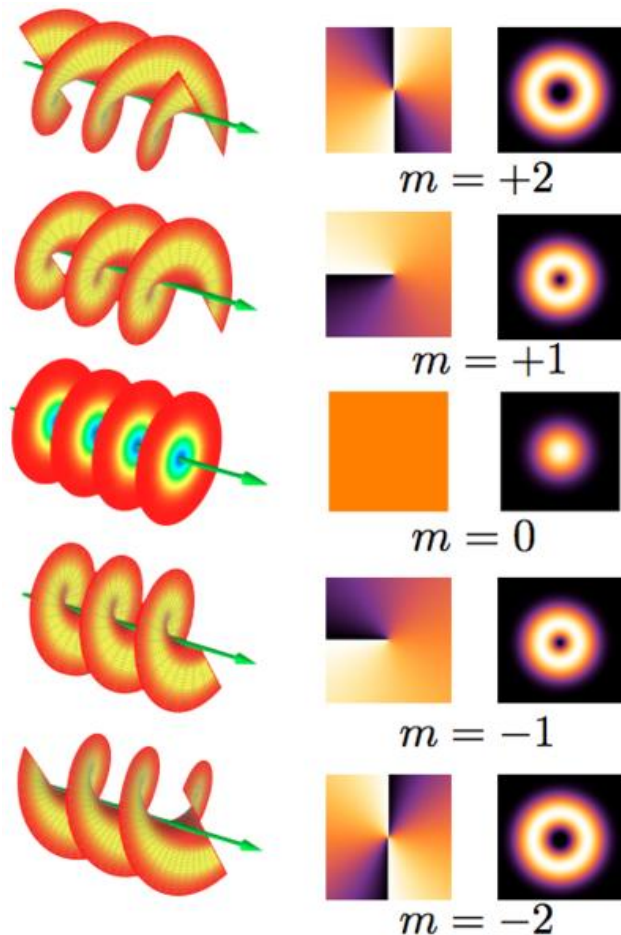
L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman
Huygens Laboratory, Leiden University, P.O. Box 9504, 2300 RA Leiden, The Netherlands

(Received 6 January 1992)



Prof. L. Allen
University of Glasgow

Světelný vírový svazek



- 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.

Identifikace světelných vírů

Matematicky:



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

Světelný vír
+
sférická vlna

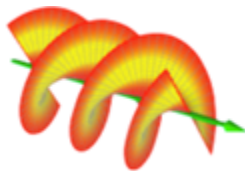


INTERFERENCE

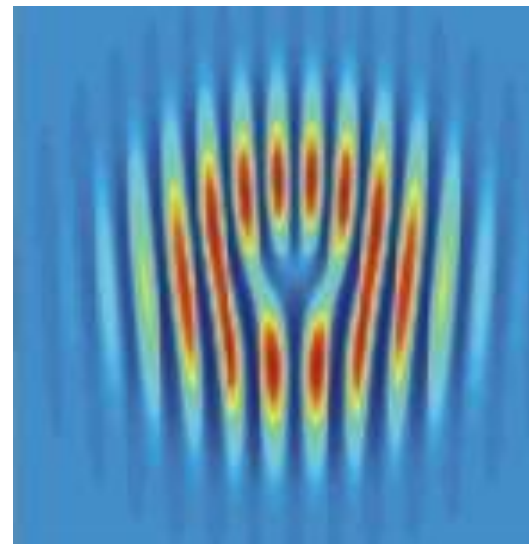
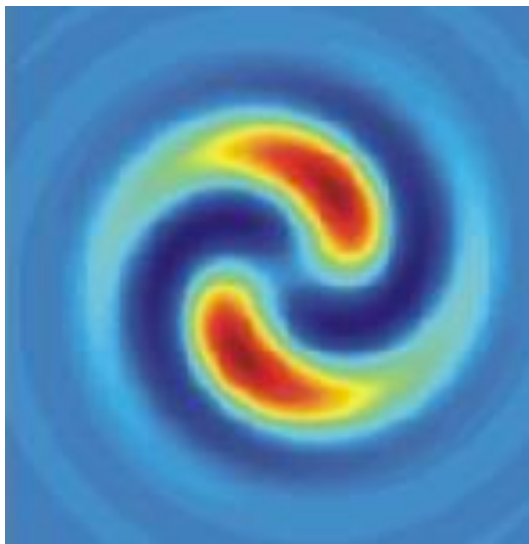


Světelný vír
+
rovinná vlna

Opticky:

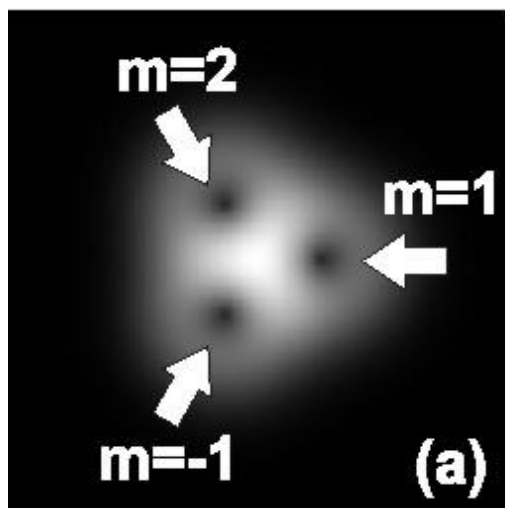


m=2



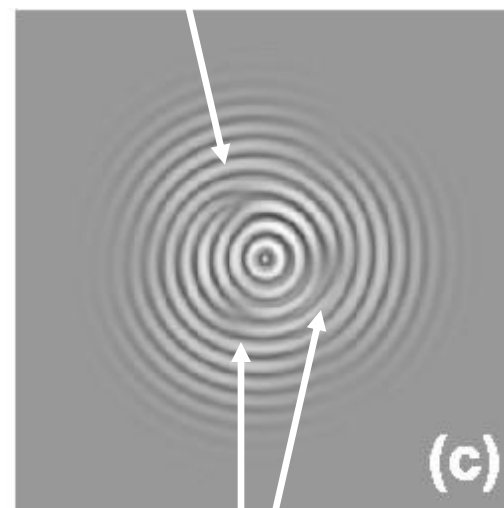
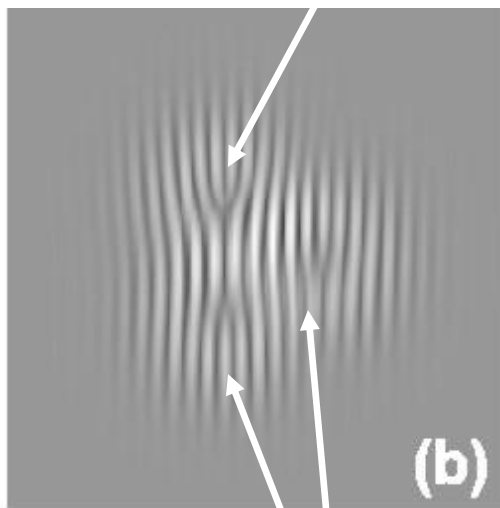
Identifikace složených vírů

Intenzitní profil



Interferenční obrazec

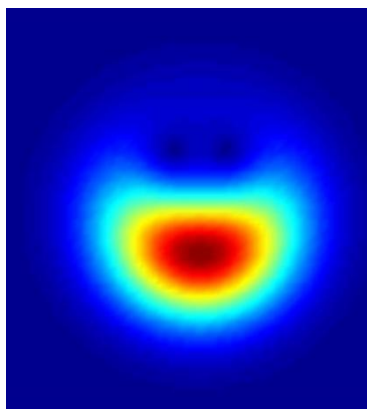
Dvojité rozštěpení
interferenčních proužků



Jednoduché rozštěpení
interferenčních proužků
Znaménko topologického náboje
určuje orientace rozštěpení proužků

Vlastnosti světelných vírů

Přitahování, odpuzování
a anihilace vírů



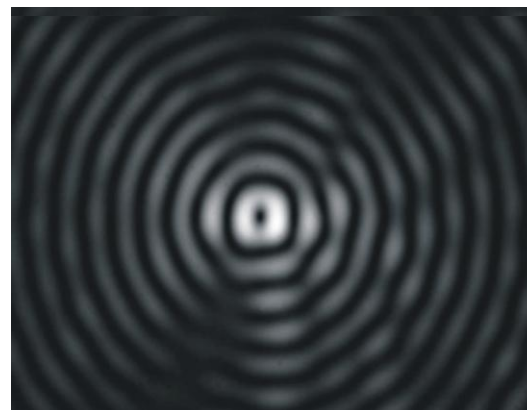
Světelné víry

*Cesta singulární optiky
k novým poznatkům
a aplikacím*

ZDENĚK BOUCHAL

VESMÍR 82, březen 2003 • <http://vesmir.cts.cuni.cz>

Samorekonstrukce
vírového svazku



OPTICKÉ VÍRY – NOVÝ SMĚR ROZVOJE SINGULÁRNÍ OPTIKY

*Zdeněk Bouchal, katedra optiky a Výzkumné centrum pro optiku, PřF UP,
tř. 17. listopadu 50, 770 00 Olomouc*

Čs. čas. fyz. 53 /2003/

Experimenty: spirální fázová maska



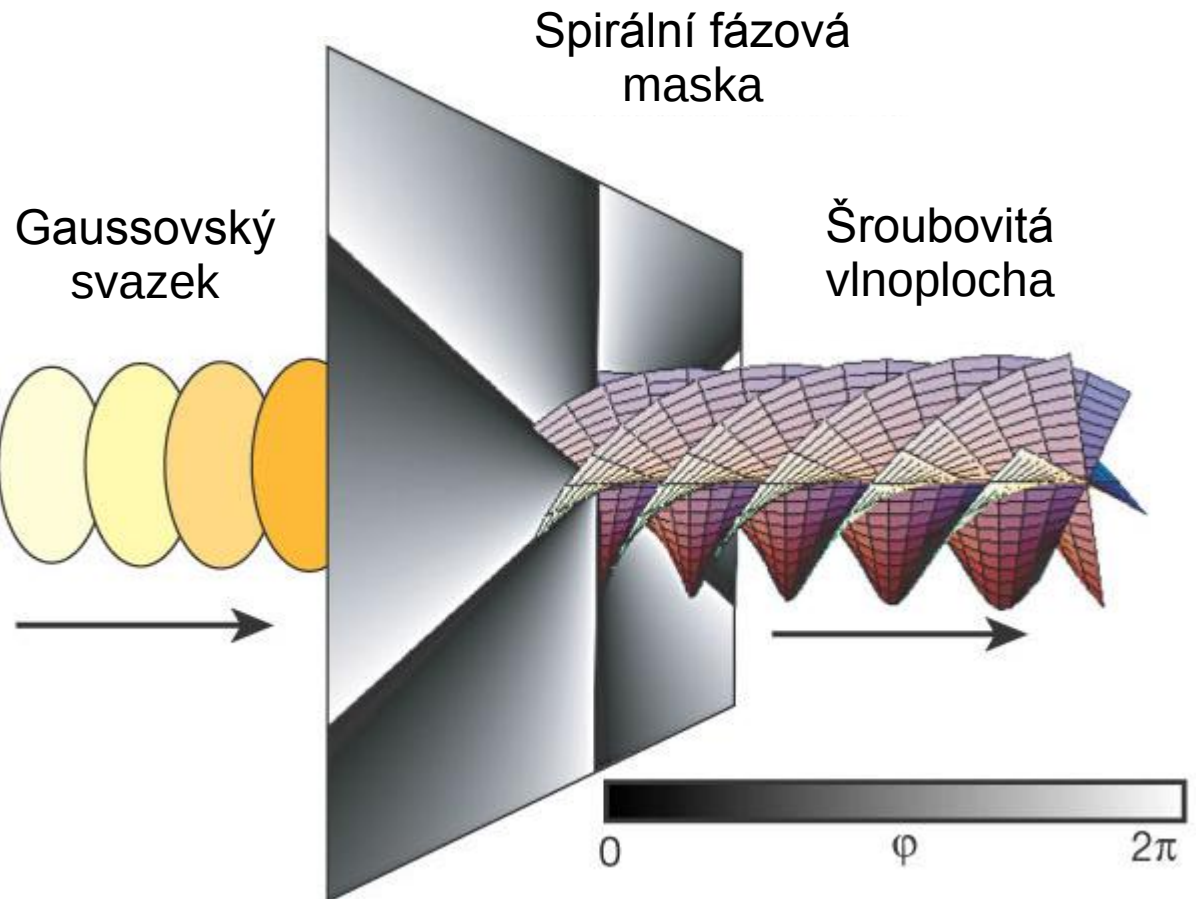
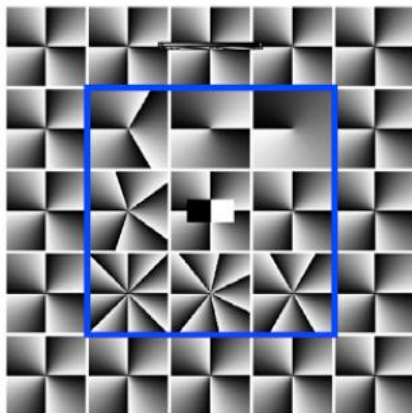
Charge Map

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

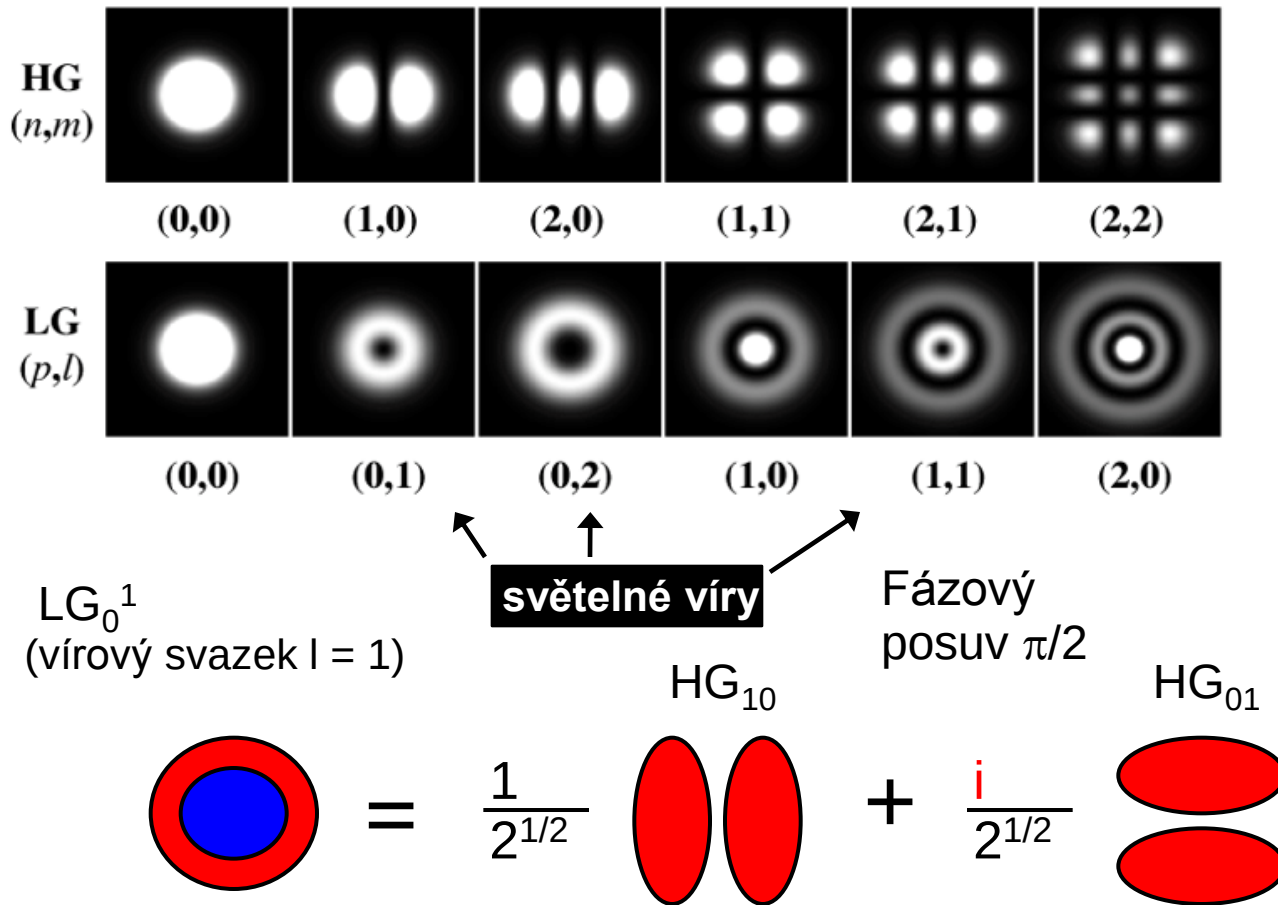
Λ

*Pattern side up
Blue boundary indicates clear aperture

Vortex Geometry



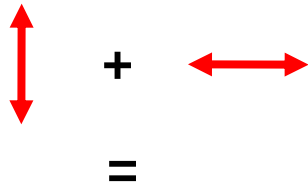
Experimenty: svazková konverze



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

Analogie polarizační a svazkové konverze

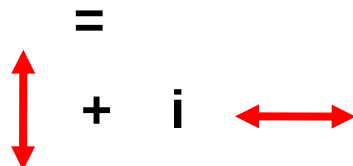
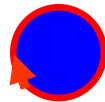
Polarizační transformace



VSTUPNÍ STAV:
Lineární polarizace



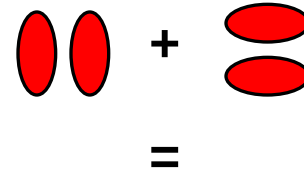
VÝSTUPNÍ STAV:
Kruhová polarizace



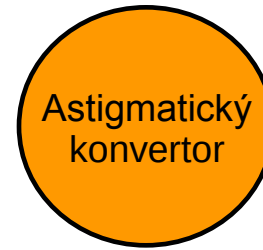
Optická anizotropie

Fázový posuv polarizačních složek $\pi/2$

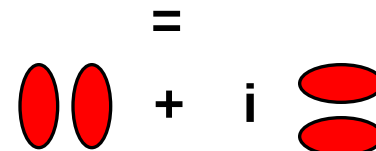
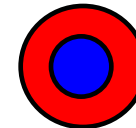
Svazková transformace



VSTUPNÍ STAV:
Diagonální HG svazek



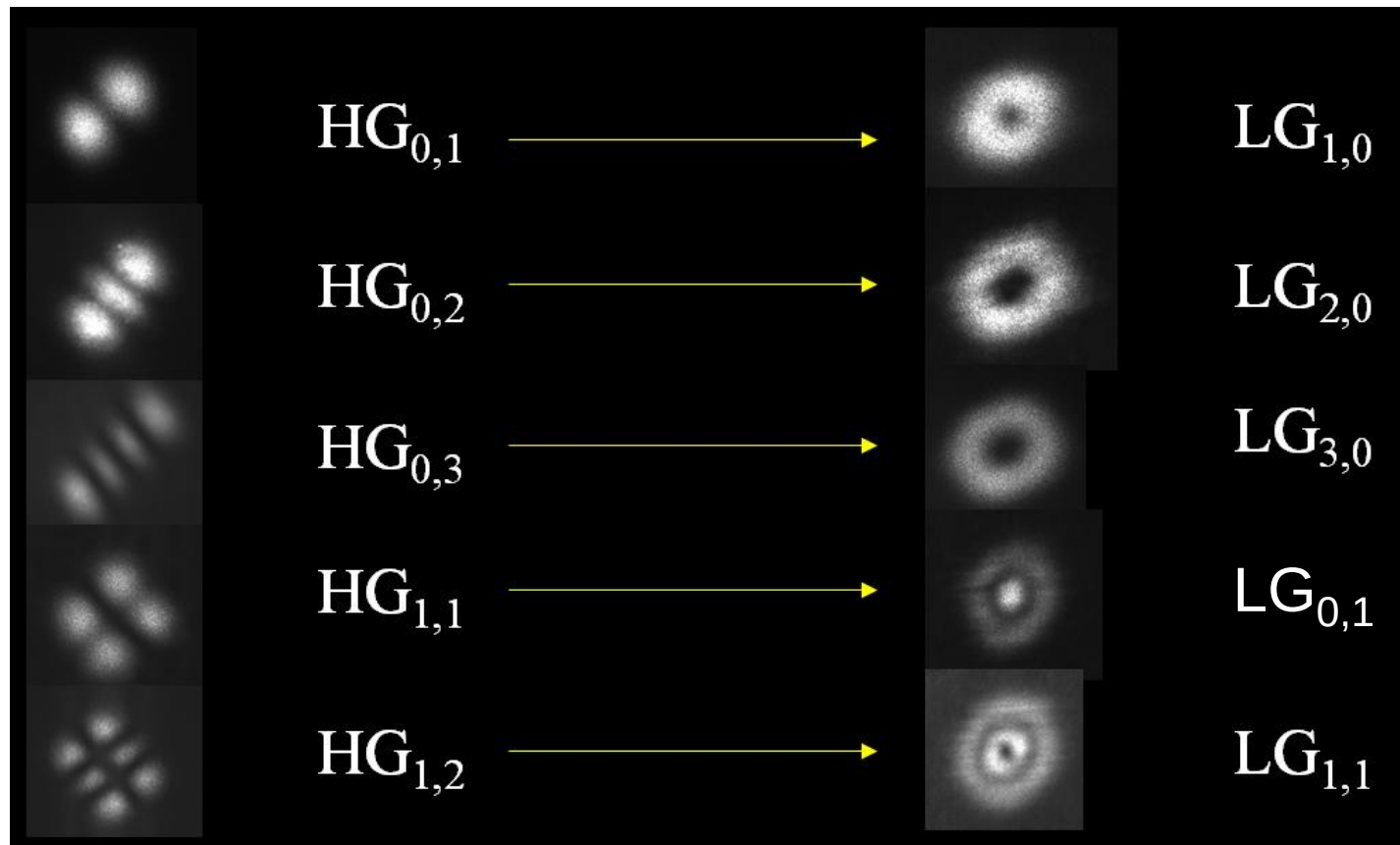
VÝSTUPNÍ STAV:
LG svazek



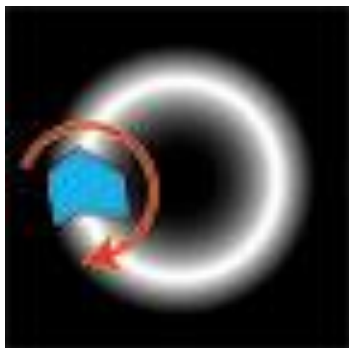
Prostorový astigmatismus

Fázový posuv HG módů $\pi/2$

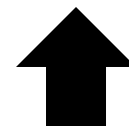
Experimentální demonstrace vírové konverze



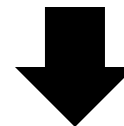
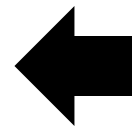
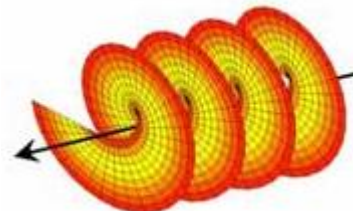
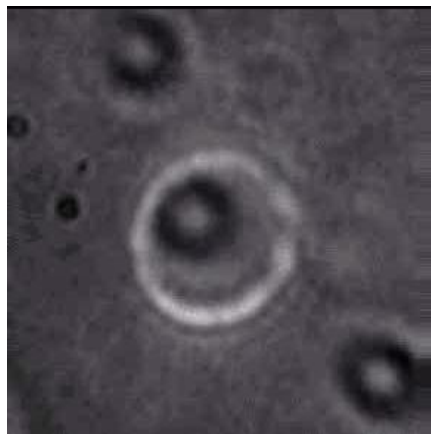
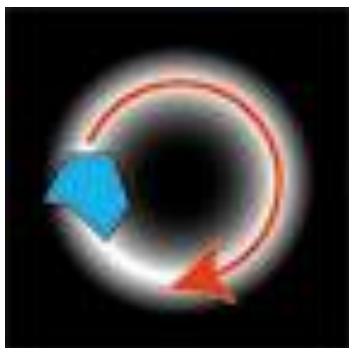
Využití světelných vírů



**Vírový přenos
informace**

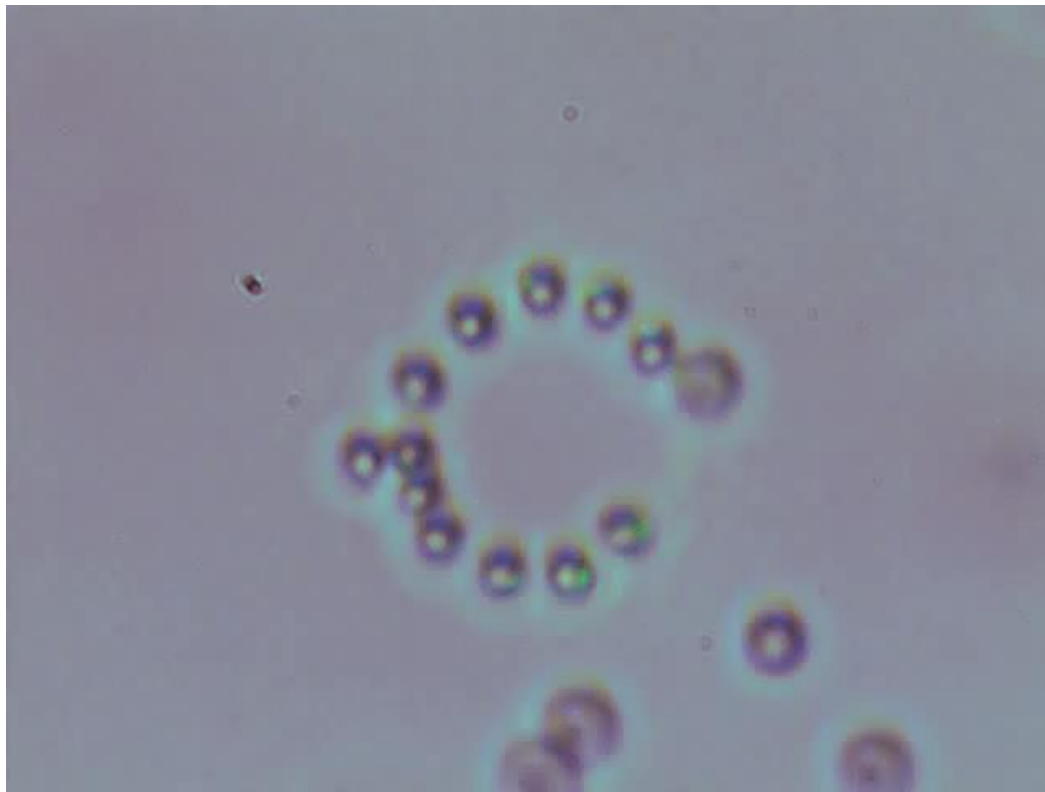


**Přenos momentu hybnosti
optické manipulace
Mikro Elektro Mechanické Systémy**



Vírové zobrazení

Rotace souboru částic – holografická pinzeta UP

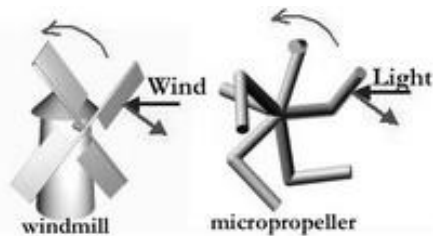


Přenos OMH v MEMS – světelné motory

Světlem ovládané mikrosystémy

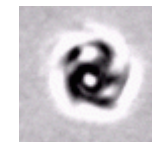
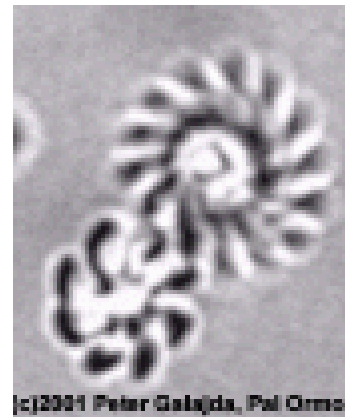
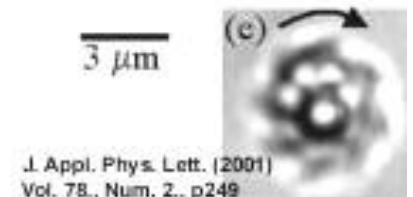
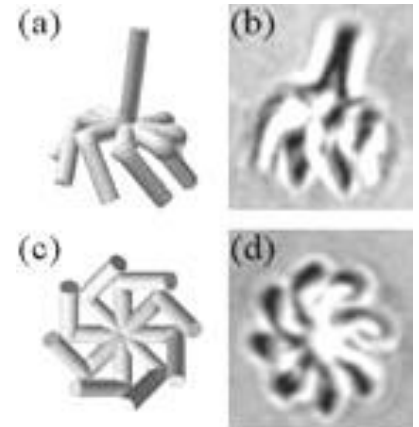
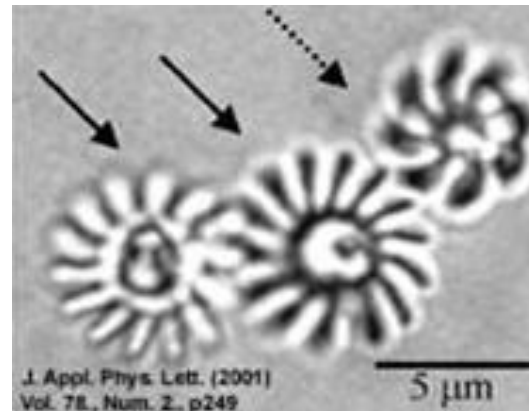
Prof. Pál Ormos, Institute of biophysics, Hungarian Academy of Sciences

<http://www.szbk.u-szeged.hu/ormosgroup/machines/machines.html>



↑
Idea

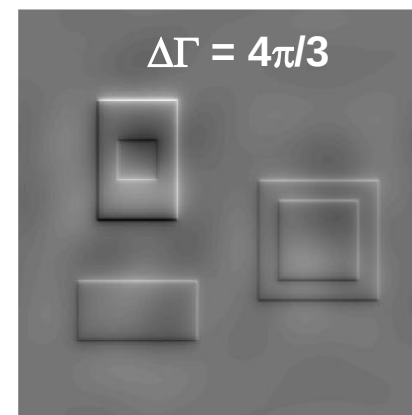
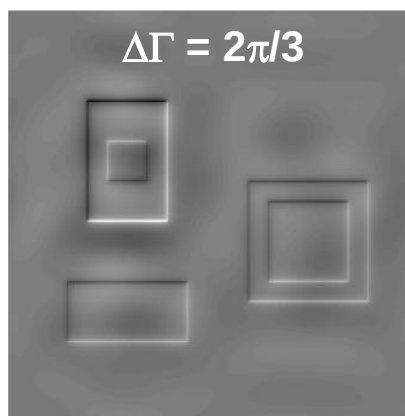
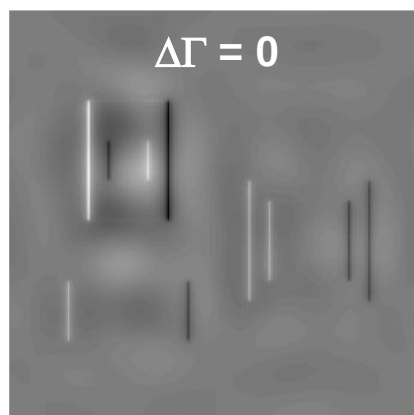
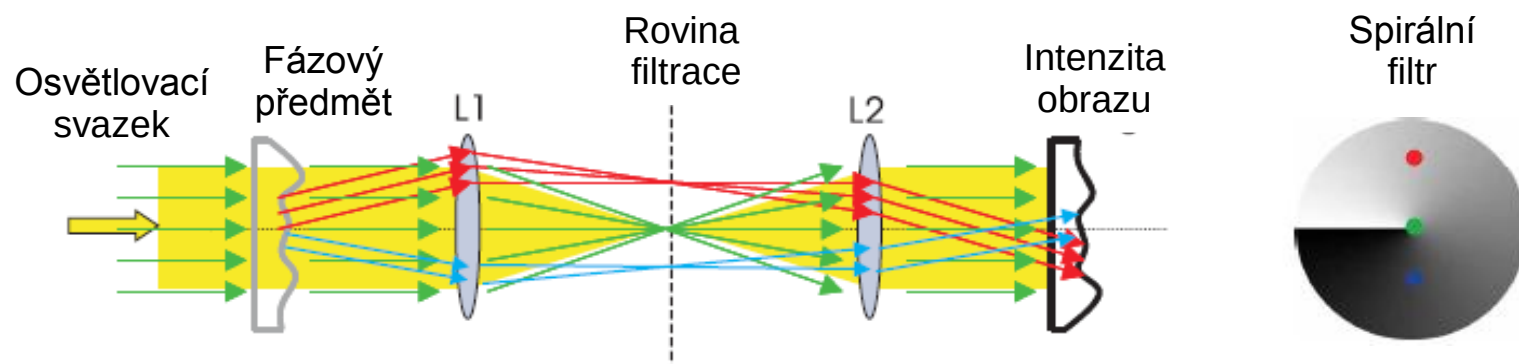
↘
Realizace



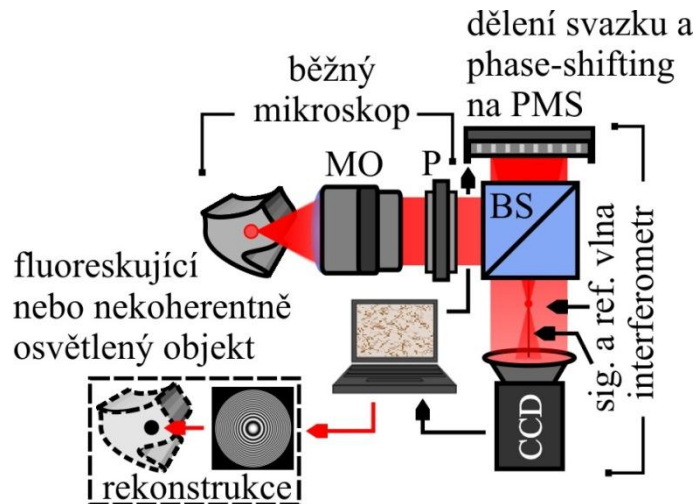
©2001 Peter Galajda, Pál Ormos

Vírové stavy světla ve spirální mikroskopii

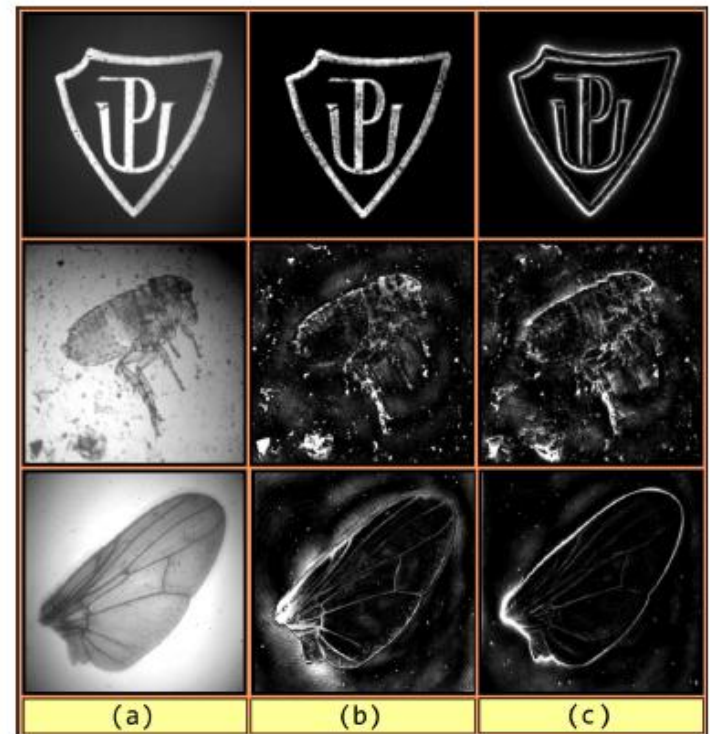
Zobrazení fázových objektů metodou spirálního kontrastu



Vírová nekoherentní korelační holografie



Přímý obraz Standardní rekonstrukce Spirální rekonstrukce



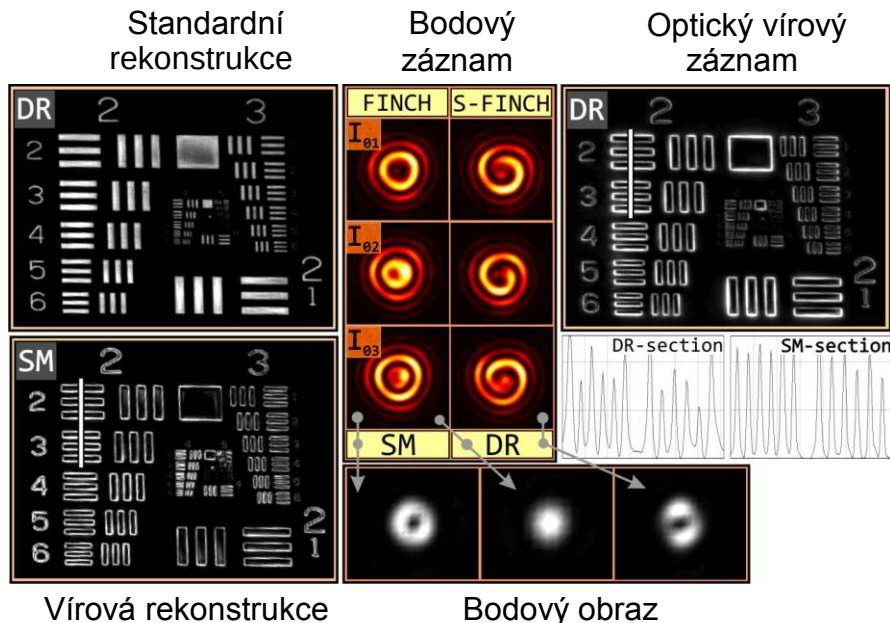
July 15, 2012 / Vol. 37, No. 14 / OPTICS LETTERS

Selective edge enhancement in three-dimensional vortex imaging with incoherent light

Petr Bouchal¹ and Zdeněk Bouchal^{2,*}

¹Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Technická 10, 616 00 Brno, Czech Republic

²Department of Optics, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic



Děkuji za pozornost