

ÚSTAV



PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY

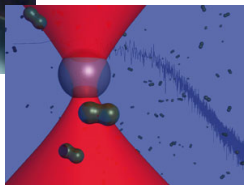
Akademie věd České republiky



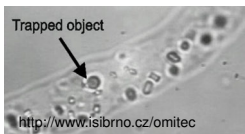
Zlatá nanočástice v optické pinzetě: vliv tvaru a orientace na její stabilitu

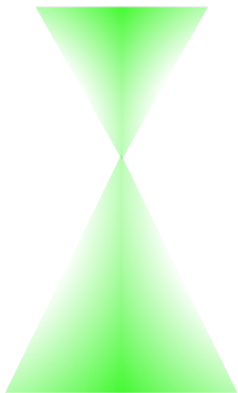
Martin Šiler, Pavel Zemánek

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.
Královopolská 147, 612 64 Brno

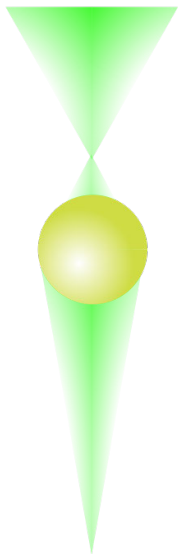


- silové účinky světla
- laser fokusovaný do mikroskopu
- biologie, rheologie, statistická fyzika, měření sil, tažný paprsek. . .

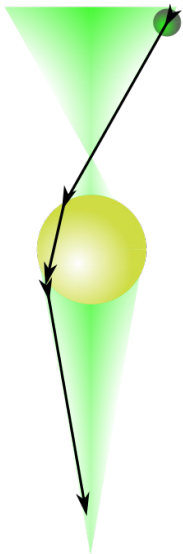




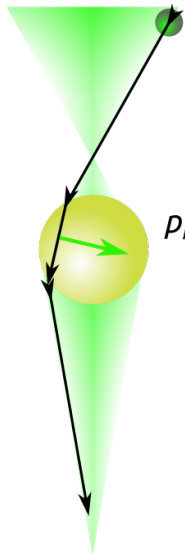
- Fokusovaný laserový svazek



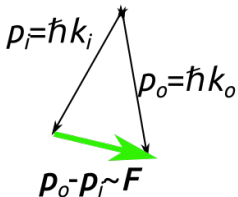
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka

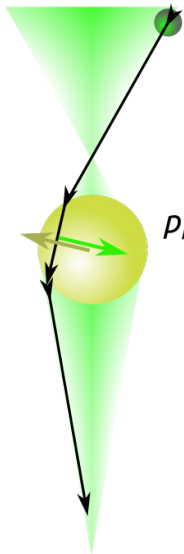


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr

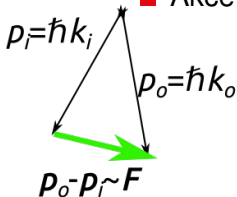


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla





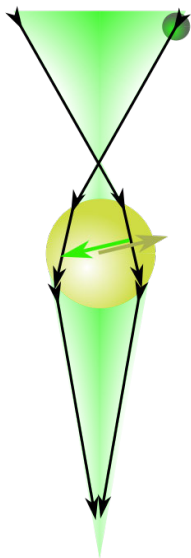
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici



$$p_i = \hbar k_i$$

$$p_o = \hbar k_o$$

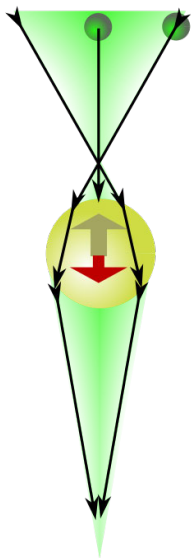
$$p_o - p_i \sim F$$



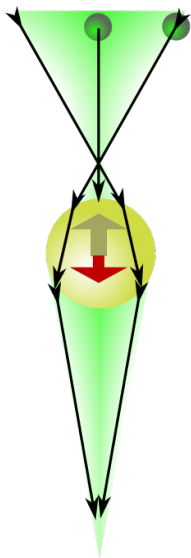
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici



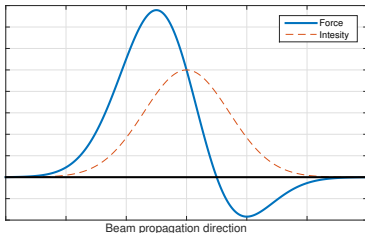
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů

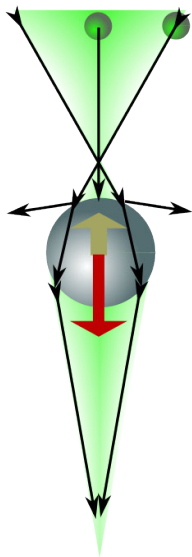


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?

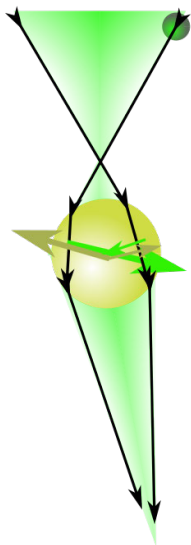


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?

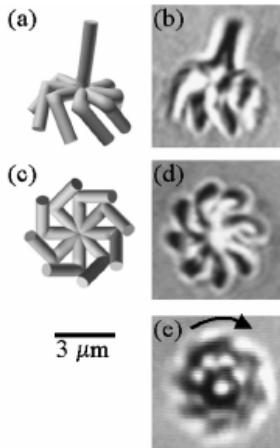
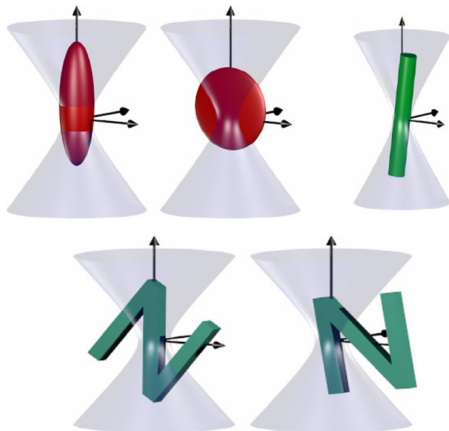




- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?
- Absorbující objekt (zrcadlo)
zachytitelné jen nano-objekty



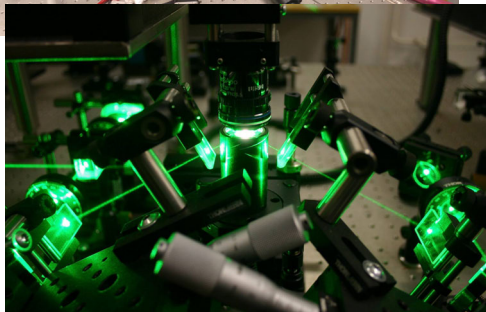
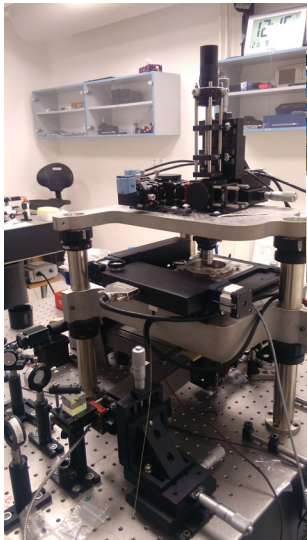
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?
- Absorbující objekt (zrcadlo)
zachytitelné jen nano-objekty
- Výchylka do strany

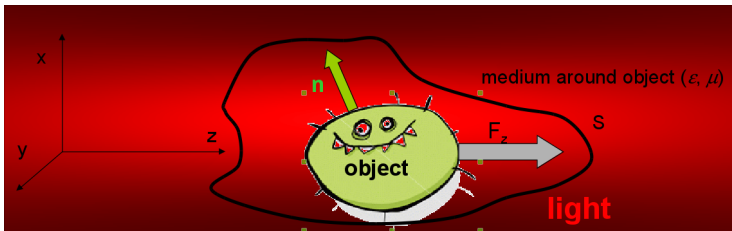


- 1** Dlouhá osa podél optické osy^{1,2}
- 2** “Prostřední” osa podél polarizace

¹S. H. Simpson, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **146**, 81 (2014).

²P. Galajda and P. Ormos, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 249 (2001).





- Maxwellův tenzor napětí a optická síla

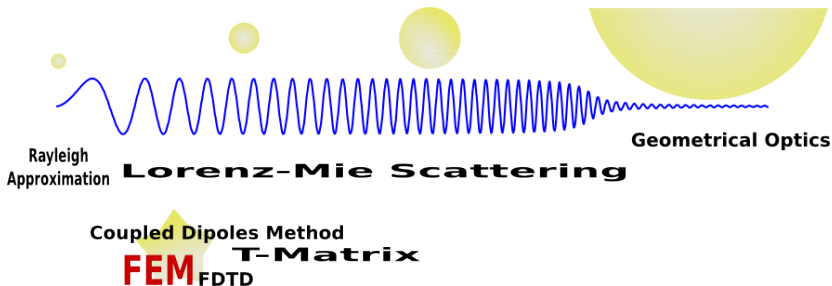
$$T_{ij}^M = \left[\epsilon E_i E_j + \mu_0 H_i H_j - \frac{1}{1.5} (\epsilon E^2 + \mu_0 H^2) \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

$$\langle F_i \rangle = \left\langle \oint_S \sum_j T_{ij}^M n_j dS \right\rangle, \quad (2)$$

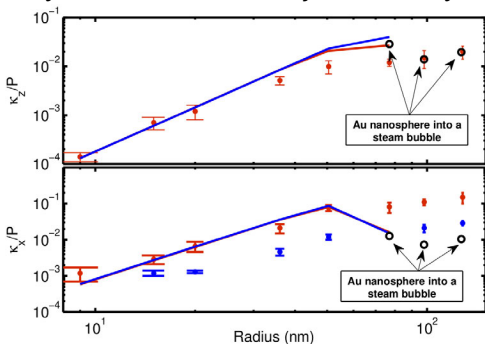
integrace přes libovolnou plochu S

- Elektromagnetické pole \mathbf{E} , \mathbf{H} = dopadající pole + rozptýlené pole

- Relativní velikost objektu vůči vlnové délce
“Size parameter” ka
- Tvar a složení objektu



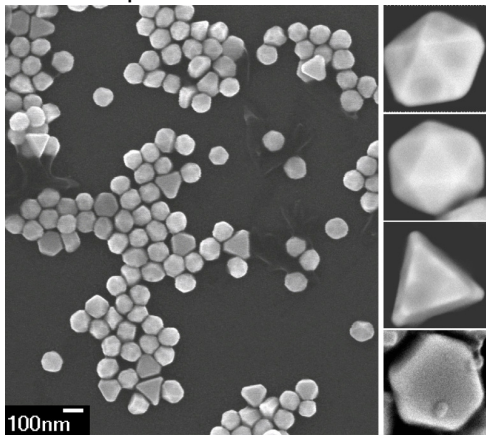
- Je možné zachytit větší částici než je teoreticky možné^{3,4}



³ P. M. Hansen et al., Nano Lett. **5**, 1937 (2005).

⁴ R. Saija et al., Opt. Express **17**, 10231 (2009).

■ Elektronová mikroskopie



■ Vliv tvaru → Comsol

File Edit Windows Options Tools Help

Model 1 (mod1) | Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw) | Mesh 1 | Study 1 | Electric field

Definitions Geometry Materials Physics Mesh Study Results

Model Builder

- freq120zp075_gb_VK_Xk_1h0t.mph (root)
 - Global Definitions
 - Parameters
 - Analytic 1 (EBy)
 - Analytic 2 (EBy)
 - Analytic 3 (EBy)
 - Materials
 - Model 1 (mod1)
 - Definitions
 - Variables 1
 - Fx (band1)
 - Fy (band2)
 - Fz (band3)
 - Tx (band4)
 - Ty (band5)
 - Tz (band6)
 - Vol (dom7)
 - Domain Point Probe 1
 - Pabs (dom2)
 - Zlato
 - ISphere
 - ISurf
 - Ball 3
 - PML
 - Outer
 - ZSurf
 - Boundary System 1 (sys1)
 - Perfectly Matched Layer 1 (pm1)
 - View 1
 - Geometry 1
 - Materials
 - Electromagnetic Waves, Frequency D
 - Wave Equation, Electric 1
 - Perfect Electric Conductor 1
 - Initial Values 1
 - Scattering Boundary Condition 1
 - Mesh 1
 - Site
 - Free Tetrahedral 1
 - Boundary Layers 1

Settings

Boundary Layers

Build Selected Build All

Label: Boundary Layers 1

Domain Selection

Geometric entity level: Domain

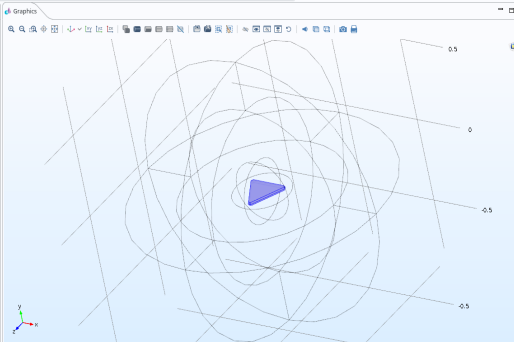
Selections: Zlato

Active

Corner Settings

Transition

Graphics



Messages Progress Log Table

freq	z0	Maxwell upward surface stress 1	Maxwell upward surface	Maxwell upward surf	y*emwunTxz*emw	z*emwunTx*x*emw	x*emwunTy*y*	1 (nm ³), Vol	sqnorm
2.8178E14	0.0000	-0.81617	-0.29116	778.38	0.071107	0.065389	0.042010	0.18136	2.0905E7
2.8178E14	2.5000E-6	-0.88199	-0.24278	666.91	0.062258	0.051591	0.034065	0.18136	1.9179E7
2.8178E14	5.0000E-6	-0.93669	-0.17983	400.15	0.036007	0.028438	0.017600	0.18136	1.4761E7
2.8178E14	6.0000E-6	-0.92699	-0.099217	208.18	0.020369	0.019808	0.013240	0.18136	1.3480E7
2.8178E14	7.0000E-6	-0.18399	-0.062125	189.03	0.019146	0.012620	0.0082775	0.18136	1.0554E7
2.8178E14	8.0000E-6	-0.10544	-0.033943	109.59	0.011606	0.0072387	0.0044834	0.18136	7.5923E6
2.8178E14	9.0000E-6	-0.050909	-0.014593	53.061	0.0060911	0.0037230	0.0019465	0.18136	5.2013E6
2.8178E14	1.0000E-5	-0.016976	-0.0036281	18.886	0.0020175	0.0016790	0.0008764	0.18136	2.9893E6
2.8178E14	1.2500E-5	-0.008958	-0.0015194	5.1736	0.6799E-4	0.0017878	4.6278E-4	0.18136	1.6282E6

1.28 GB | 5.73 GB

- Laser fokusovaný přes mikroskopový objektiv s velkou numerickou aperturou
- dopadající pole je vektorové,
- **Gaussovský svazek není řešením Maxwellových rovnic**

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j}{2}k \left(l_0 + l_2 \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right), \quad (3)$$

$$E_y(x, y, z) = -jk l_2 \frac{xy}{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

$$E_z(x, y, z) = -k l_1 \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5)$$

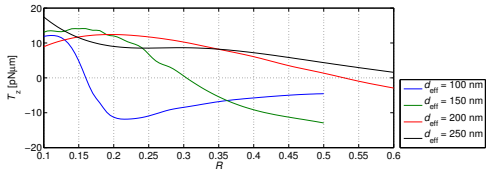
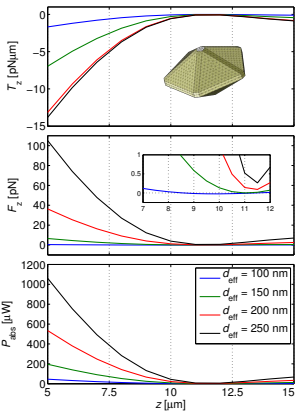
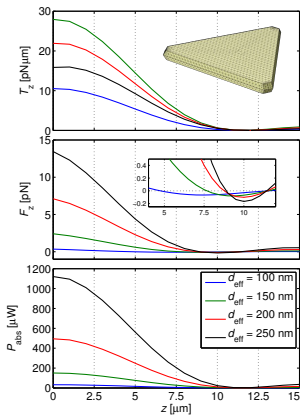
kde

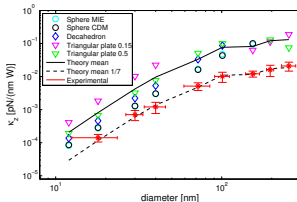
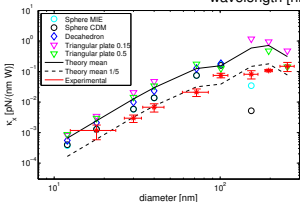
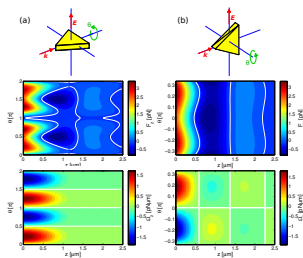
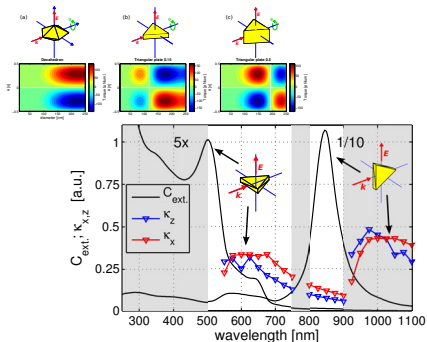
$$l_0(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin \alpha (1 + \cos \alpha) J_0(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha, \quad (6)$$

$$l_1(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin^2 \alpha J_1(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha, \quad (7)$$

$$l_2(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin \alpha (1 - \cos \alpha) J_2(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha, \quad (8)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, k = 2\pi n / \lambda_{\text{vac}}, NA = n_i \sin \Theta, n_i$$

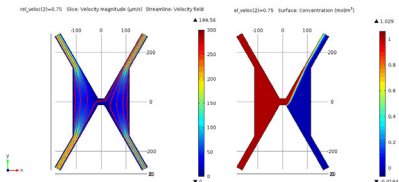
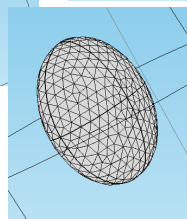
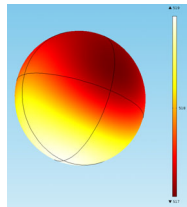
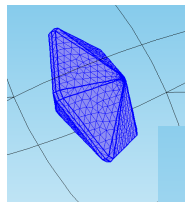
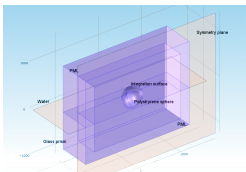




⁵ O. Brzobohatý et al., *Sci. Rep.* **5**, 8106 (2014).

⁶ O. Brzobohatý et al., *Opt. Express* **23**, 7273 (2015).

- V Comsolu je možné počítat optické síly
- Hodí se pro nesymetrické, nehomogenní objekty
- Kombinace se zahříváním a případně prouděním





Martin Šiler,...

www.isibrno.cz/omitec

Autoři děkují za podporu projektu GAČR (GB14-36681G).