



INSTITUTE



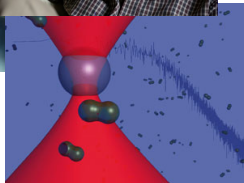
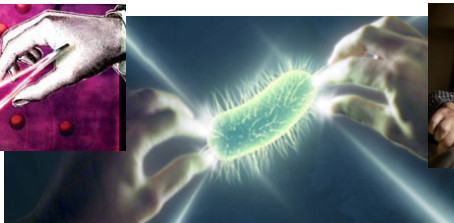
OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS

The Czech Academy of Sciences

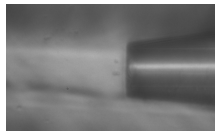
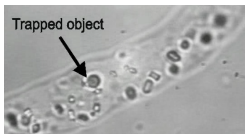
Stabilita a zahřívání částic v optické pinzetě

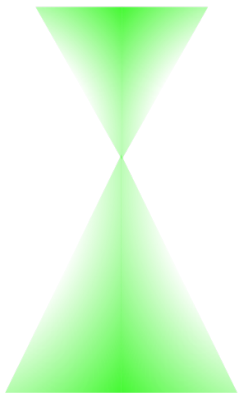
Martin Šiler

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

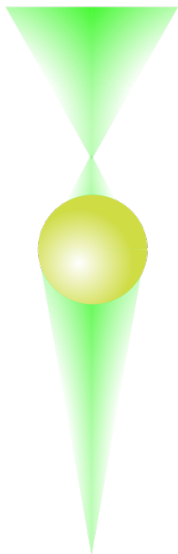


- silové účinky světla
- laser fokusovaný do mikroskopu
- biologie, rheologie, statistická fyzika, měření sil, tažný paprsek...

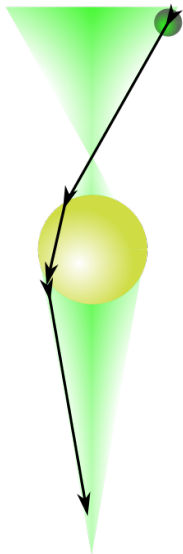




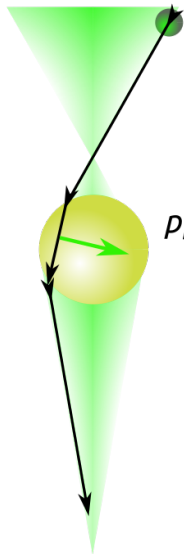
- Fokusovaný laserový svazek



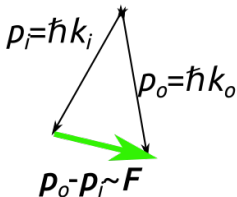
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka



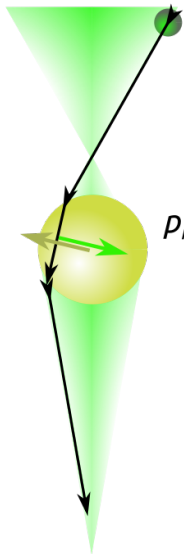
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr



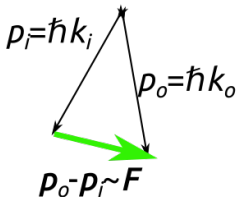
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla

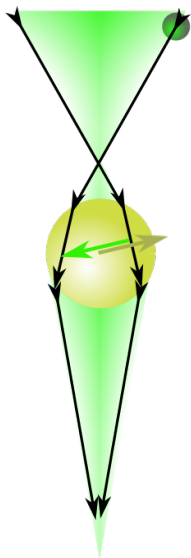


$p_i = \hbar k_i$
 $p_o = \hbar k_o$
 $p_o - p_i \sim F$



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

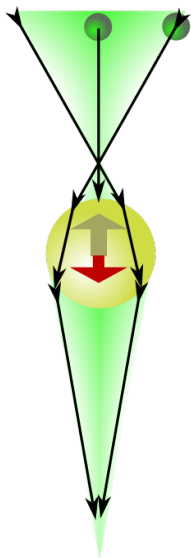




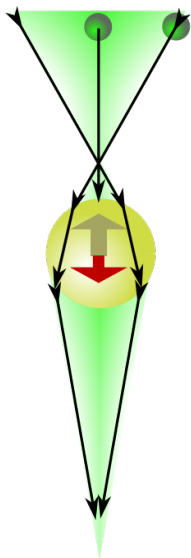
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti \rightarrow síla
- Akce a reakce \rightarrow síla i na částici



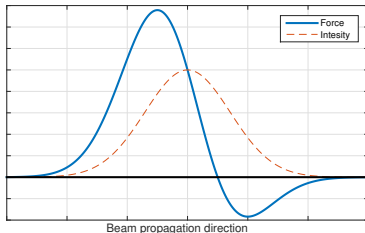
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů

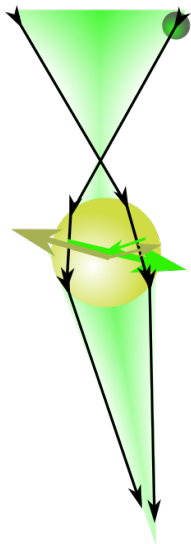


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?

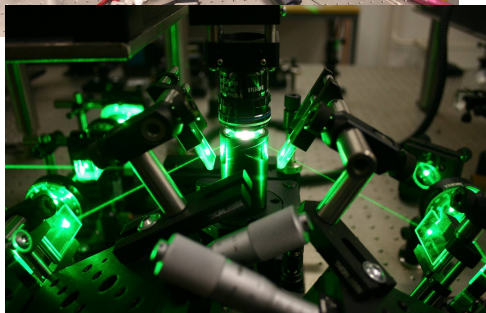
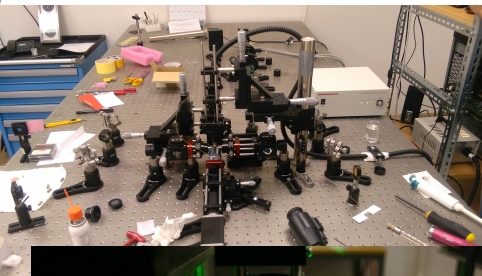
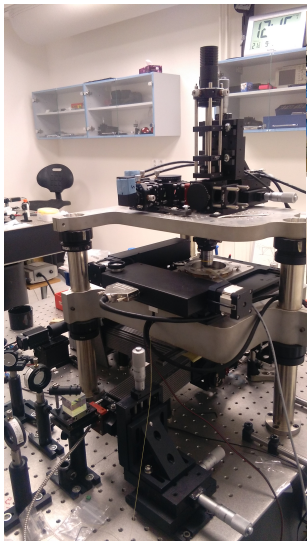


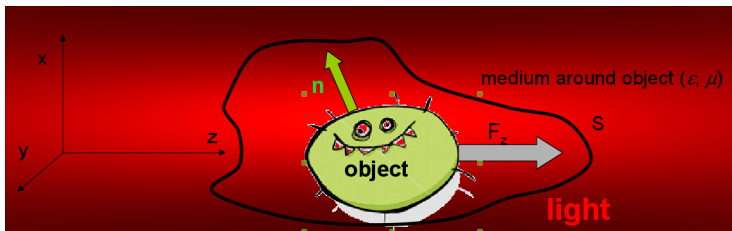
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?





- 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?
- Výchylka do strany





- Maxwellův tenzor napětí a optická síla

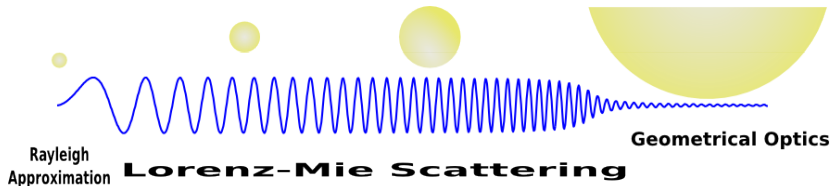
$$T_{ij}^M = \left[\epsilon E_i E_j + \mu_0 H_i H_j - \frac{1}{2} (\epsilon E^2 + \mu_0 H^2) \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

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

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



Coupled Dipoles Method
FEM **T-Matrix**
 FDTD

The image displays the COMSOL Multiphysics software interface for an electromagnetic wave simulation. The main 3D view shows a dielectric resonator with a mesh. A 'Boundary Integration' dialog box is open, showing the expression to integrate: $\int (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{E}) + \text{Tr}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{n} = \text{Tr}(\mathbf{J})$. The 'Boundary integration' dialog box is also open, showing the expression to integrate: $\int (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{E}) + \text{Tr}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{n} = \text{Tr}(\mathbf{J})$. The 'Plot Parameters' dialog box is open, showing the 'Slice' tab with 'Electric field, norm [V/m]' selected. The 'Plot Parameters' dialog box is also open, showing the 'Slice' tab with 'Electric field, norm' selected. The 'Plot Parameters' dialog box is also open, showing the 'Slice' tab with 'Electric field, norm' selected.

The 'Boundary integration' dialog box shows the following settings:

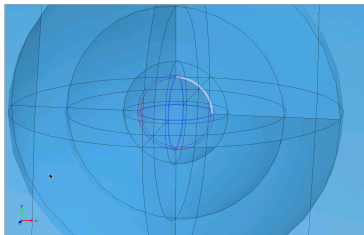
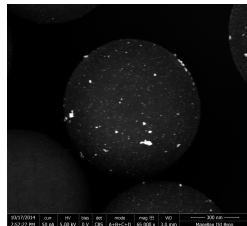
- Boundary selection: 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64
- Expression to integrate: $\int (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{E}) + \text{Tr}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{n} = \text{Tr}(\mathbf{J})$
- Prefined quantities: $\int (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{E}) + \text{Tr}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{n} = \text{Tr}(\mathbf{J})$
- Expression: $\int (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{E}) + \text{Tr}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{n} = \text{Tr}(\mathbf{J})$
- Unit of integral: pN
- Solution to use: []
- Solution at time: []
- Time: []
- Solution of another dataset: 0
- dataset

The 'Plot Parameters' dialog box shows the following settings:

- Principal: Streaming, Particle Tracing, Max/Min, Deform, Animate
- General: Slice, IsoSurface, Subdomain, Boundary, Edge, Arrow
- Slice plot
- Slice data:
 - Prefined quantities: Electric field, norm
 - Expression: norm_E_sw
 - Unit: V/m
 - Smooth
 - Recover
- Slice positioning:
 - Number of levels: 1
 - Vector with coordinates:
 - x levels: 1, 2, 3
 - y levels: 1, 2, 3
 - z levels: 1, 2, 3
- Coloring and fill:
 - Coloring: Interpolated
 - Fill style: Filled
- Slice color:
 - Color table: Rainbow
 - Reverse
 - Color legend
 - Uniform color: Color



- Absorbující částice v optické pinzetě: zdroj tepla
- Zachycení a rozložení teploty
- Core-shell částice
polystyrénové jádro + tenká vrstva zlata
- Rovinná vlna fokusovaná objektivem s $NA = 1.2$



- Laser fokusovaný přes mikroskopový objektiv s velkou numerickou aperturou
- dopadající pole je vektorové,

Gaussovský svazek není řešením Maxwellových rovnic

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

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

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

■ až od verze 5.3?

■ do té doby MATLAB nebo `integrate`

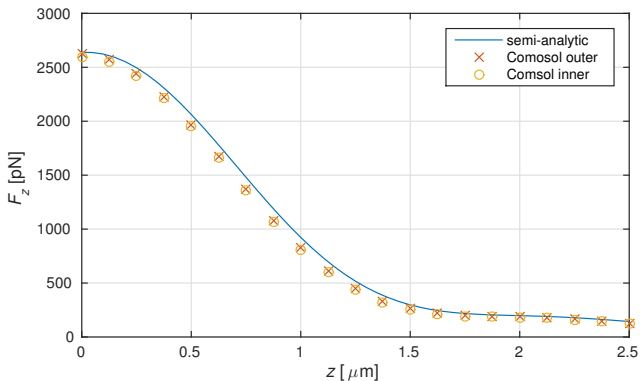
kde

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

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

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

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

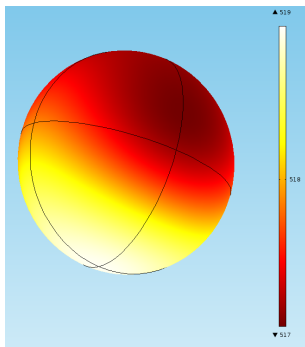
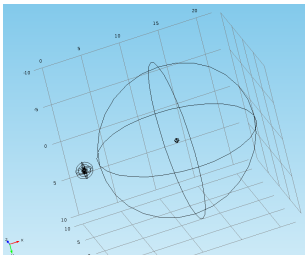


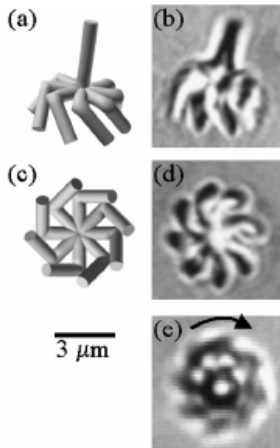
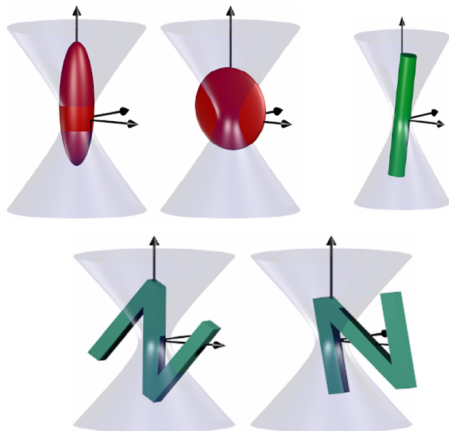
- Comsol: cca 5 hodin, relativní přesnost $\sim 10^{-3}$, 2 hodiny model
- Matlab: cca 20 sekund, relativní přesnost $\sim 10^{-6}$, 2 roky programování

- Rovnice vedení tepla

$$\nabla(k\nabla T) + Q = 0$$

- Tepelný zdroj $Q = \mathbf{jE}$: resistivní ztráty ve zlaté vrstvě
- PML vrstva je nepoužitelná pro jinou fyziku
- zkopírovat domény, operátor lineární extruze



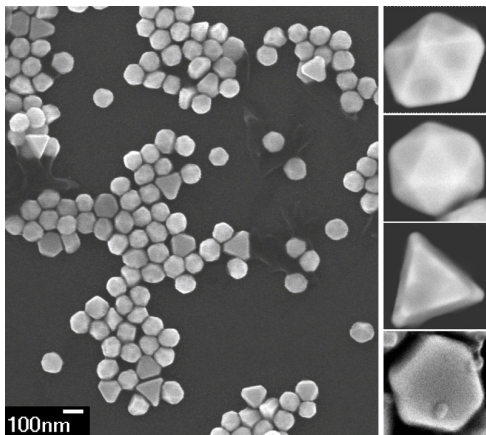


- 1 Dlouhá osa podél optické osy^{1,2}
- 2 “Prostřední” osa podél polarizace

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

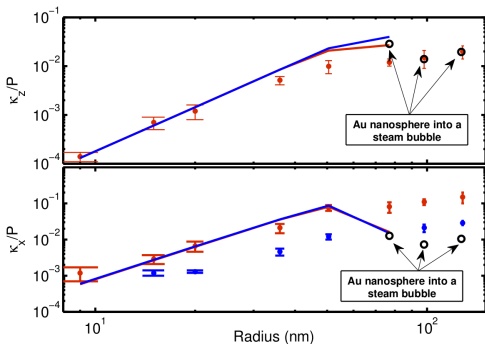
² P. Galajda a P. Ormos, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 249 (2001).

- Elektronová mikroskopie



- Vliv tvaru → Comsol

- 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).

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

- tree128zp075_gk_YK_1h8t0mph (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 Domain
 - 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: ?

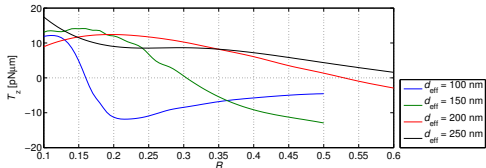
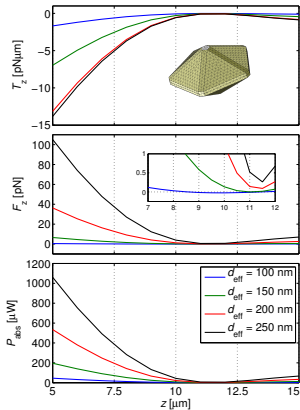
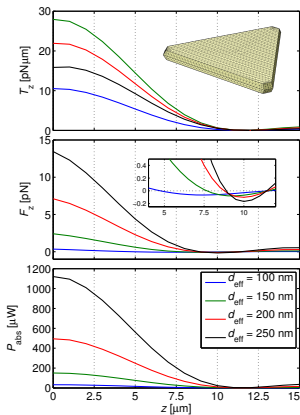
Corner Settings

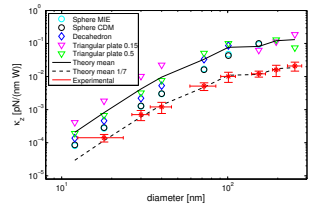
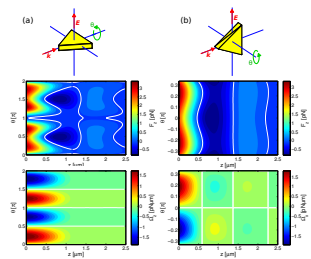
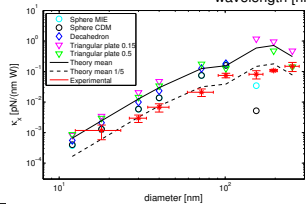
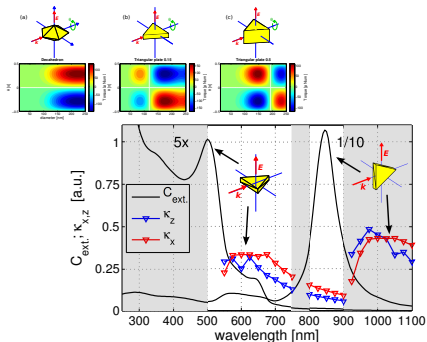
Transition

Graphics

Messages | Progress | Log | Table | **Hz**

freq	z0	Maxwell upward surface stress 1	Maxwell upward surface	Maxwell upward surf	y*emwunTz2*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	0.181364	2.0895E7
2.8178E14	2.5000E-6	-0.88199	-0.24278	666.91	0.062298	0.051591	0.034065	0.181364	1.9179E7
2.8178E14	5.0000E-6	-0.93669	-0.17983	400.15	0.036007	0.028438	0.017608	0.181364	1.4761E7
2.8178E14	6.0000E-6	-0.92699	-0.099217	288.18	0.028369	0.019808	0.013240	0.181364	1.3488E7
2.8178E14	7.0000E-6	-0.18399	-0.062125	189.03	0.019146	0.012620	0.0082775	0.181364	1.0554E7
2.8178E14	8.0000E-6	-0.10544	-0.033943	109.59	0.011606	0.0072387	0.0044834	0.181364	7.5923E6
2.8178E14	9.0000E-6	-0.050809	-0.014593	53.061	0.0060911	0.0037230	0.0019465	0.181364	5.2013E6
2.8178E14	1.0000E-5	-0.016976	-0.0036281	18.886	0.0026175	0.0016770	0.0008764	0.181364	2.9893E6
2.8178E14	1.2500E-5	-0.0088958	-0.0015194	5.1736	0.0017878	0.00117878	0.0006278E-4	0.181364	1.6282E6

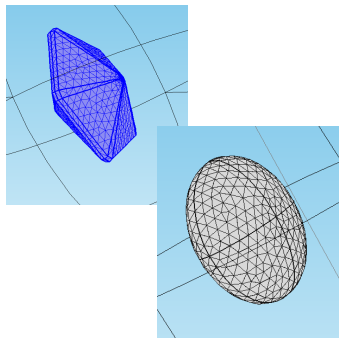
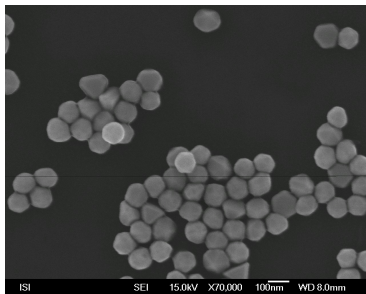




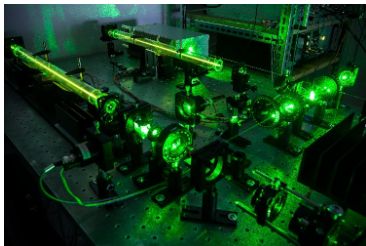
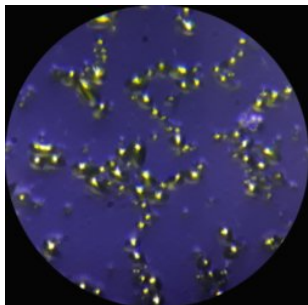
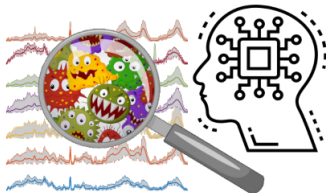
⁵ O. Brzobohatý et al., *Sci. Rep.* **5**, 8106 (2014).

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



<http://www.isibrno.cz/cs/upt-nabizi-studentum-letni-staze-ve-spickovych-laboratorich>





Martin Šiler

www.isibrno.cz

*Autoři děkují za podporu MŠMT
(CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000476).*