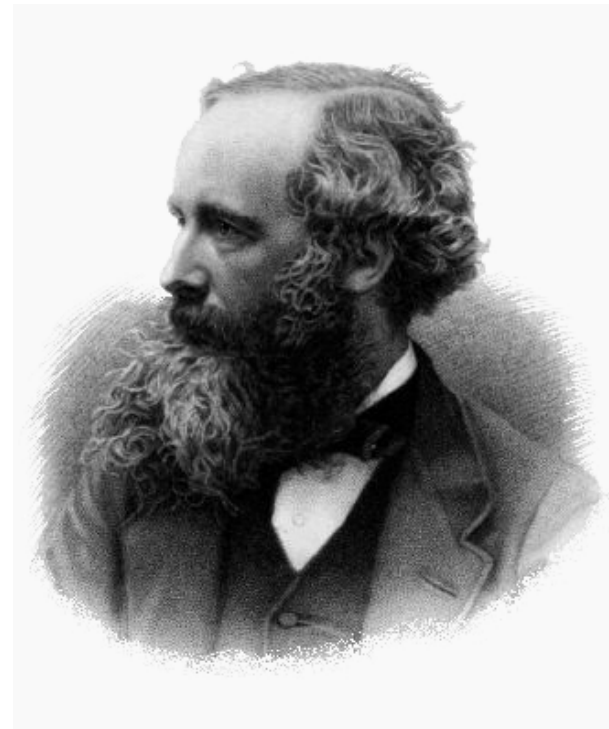


Лекция 11. Оптическое манипулирование микро- и нанообъектами (оптический пинцет)

Введение: сила давления света

- Сила давления света связана с передачей импульса электромагнитной волны/потока фотонов при рассеянии/отражении/поглощении света материальной средой
- Предсказана Кеплером в XVII веке для объяснения поведения хвостов комет
- Математическое описание дано Максвеллом в 1871 г. в рамках классической электродинамики



Введение: сила давления света

- Экспериментально обнаружена П.Н.Лебедевым в 1901 г.



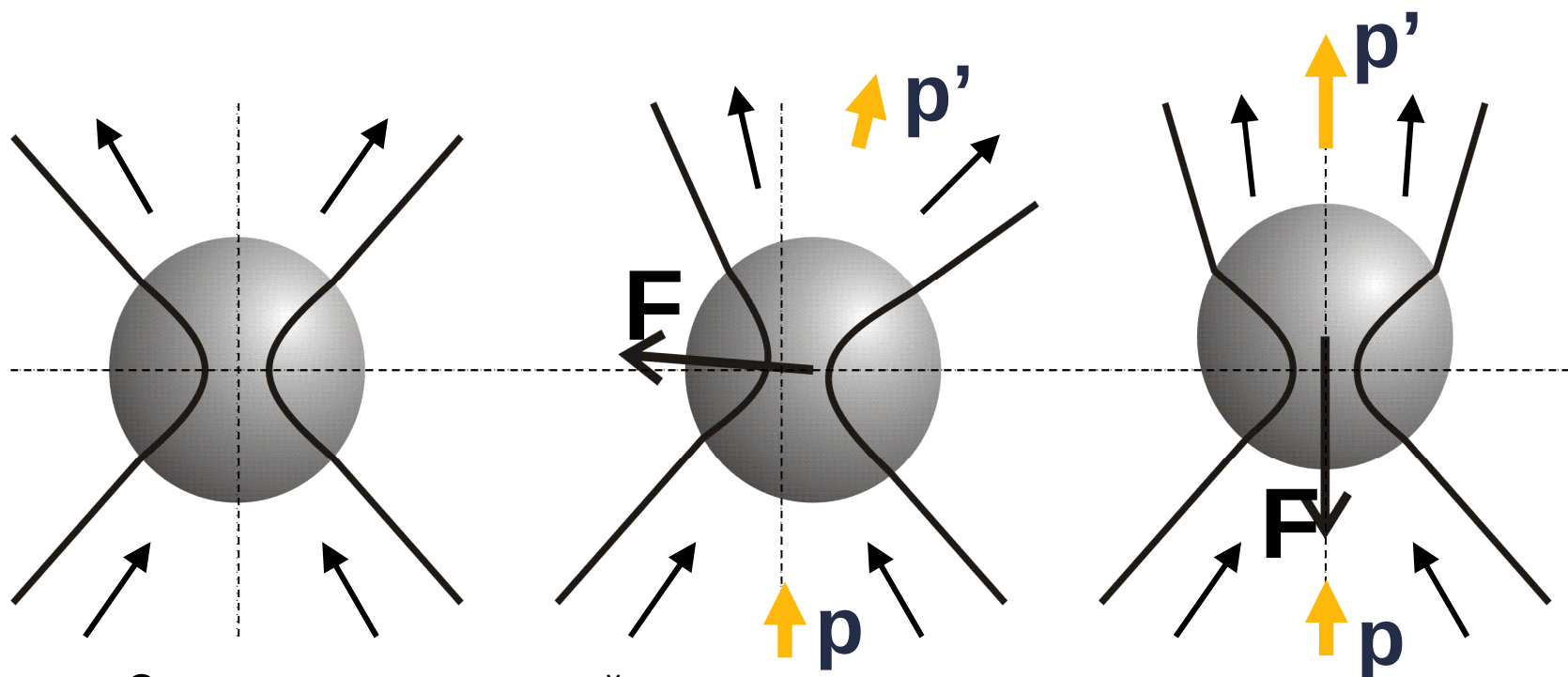
P. Lebedev, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, Annalen der Physik, 1901

- Демонстрация оптического захвата – Артур Ашкин (1970)

A. Ashkin. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, Phys. Rev. Lett. 24, 156 (1970)

Принцип действия оптического пинцета

Схема оптических возвращающих сил



Смещение захваченной частицы из перетяжки

Изменение картины рассеяния

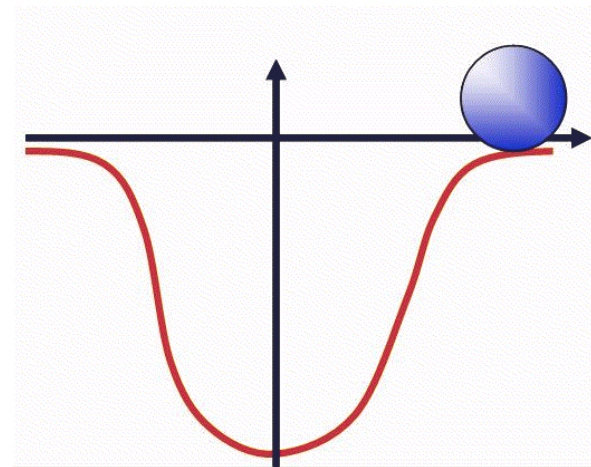
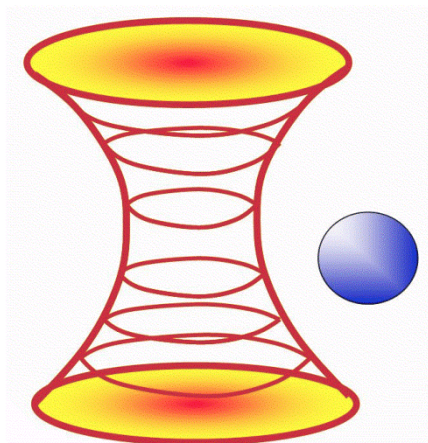
Нескомпенсированный импульс оптического излучения

Возвращающая сила



3D оптическая ловушка

Принцип действия оптического пинцета



Сила, действующая на одиночный заряд во внешнем электромагнитном поле:

$$\mathbf{F} = q \left(\mathbf{E} + \frac{d\mathbf{x}}{dt} \times \mathbf{B} \right)$$

Сила, действующая на диполь:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{p}}{dt} \times \mathbf{B} = \\ &= \alpha \left[(\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{E}}{dt} \times \mathbf{B} \right] \\ \mathbf{F} &= \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2 \end{aligned}$$

или:

Несколько оценок

- Силы оптического захвата (~ 100 фН) существенно превосходят гравитационные силы (~ 1 фН для частицы размером 1 мкм)
- Жесткость ловушки $\sim$ пН/мкм
- Размер ловушки ~ 1 мкм

Применения оптического пинцета

- Контролируемое изменение расстояний на микроуровне с нанометровой точностью
- Диагностика *in situ* и *in vivo* нанообъектов в естественной среде без влияния подложки
- Изучение сверхслабых взаимодействий и сил между нанообъектами вплоть до 10 фН сил (фотонно-силовой микроскоп), измерение коэффициента жесткости «пружинки» ДНК, упругие свойства клеток, эффект «оптической отдачи» при люминесценции, магнитные и электрические взаимодействия на микроуровне
- Изучение процессов парных взаимодействий (агрегации и дезагрегации) биологических микро- и нанообъектов

Принципиальная схема оптического пинцета (однолучевая модификация)

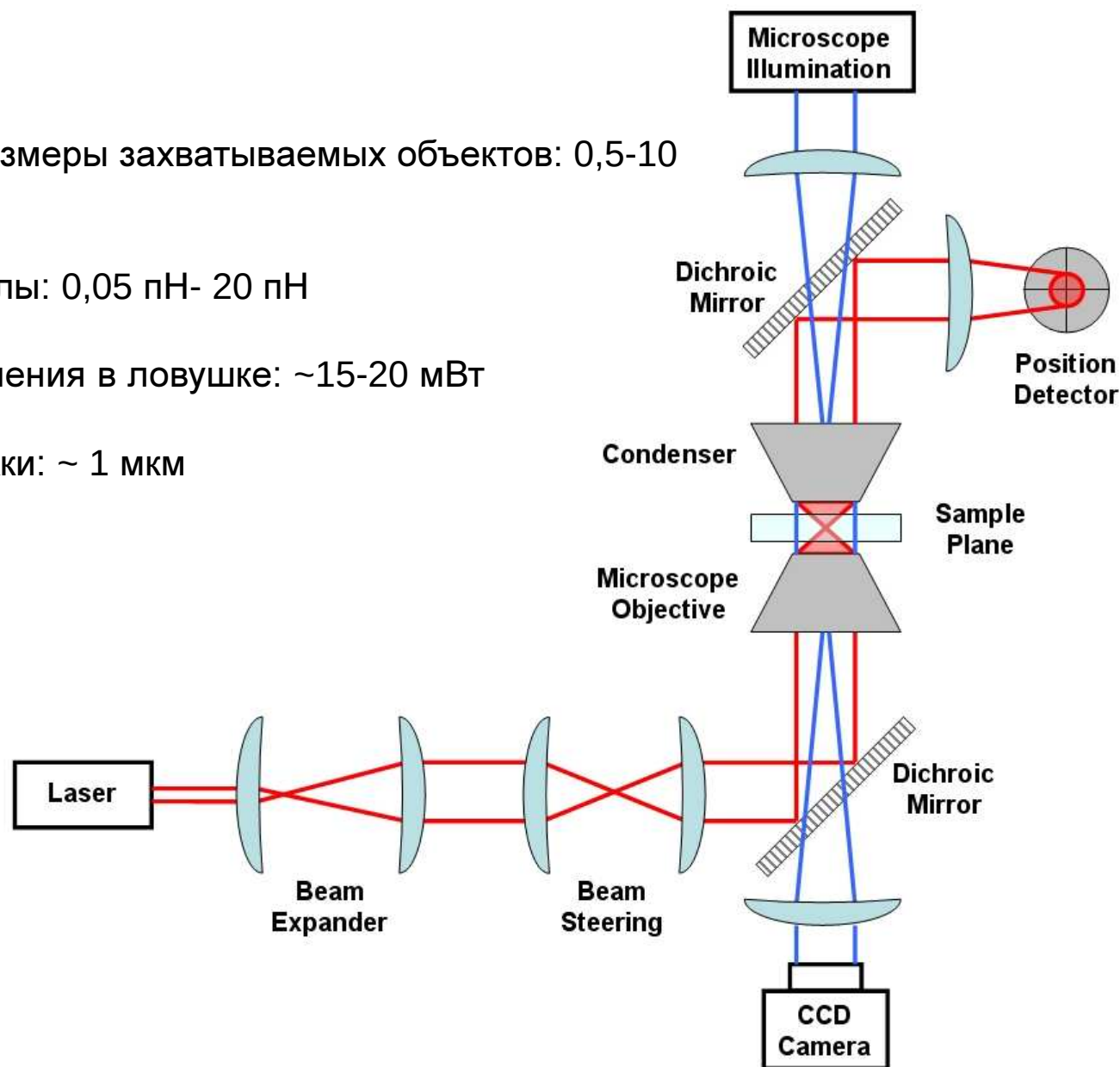
Характерные размеры захватываемых объектов: 0,5-10 мкм

Измеряемые силы: 0,05 пН- 20 пН

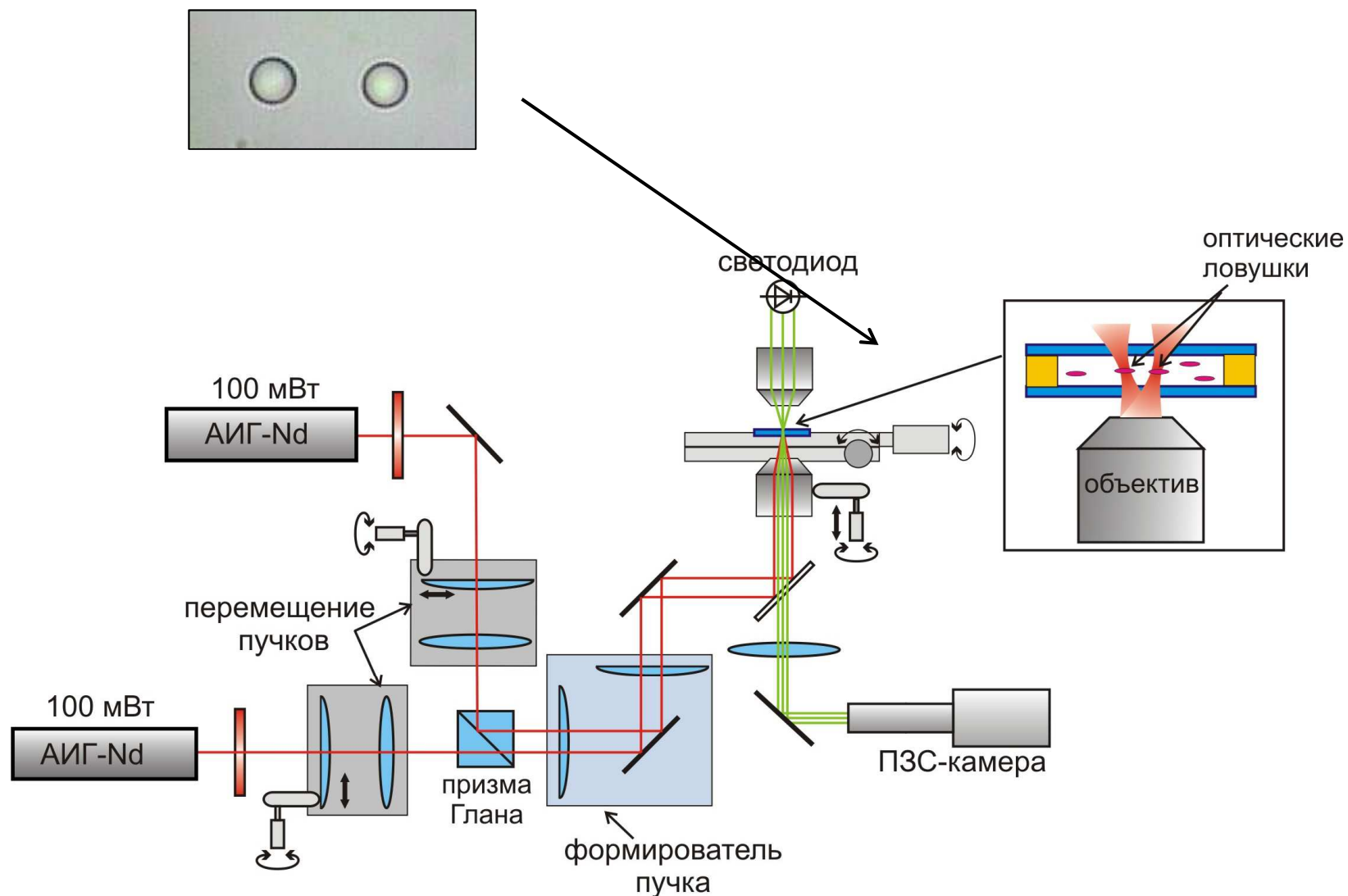
Мощность излучения в ловушке: ~15-20 мВт

Размер перетяжки: ~ 1 мкм

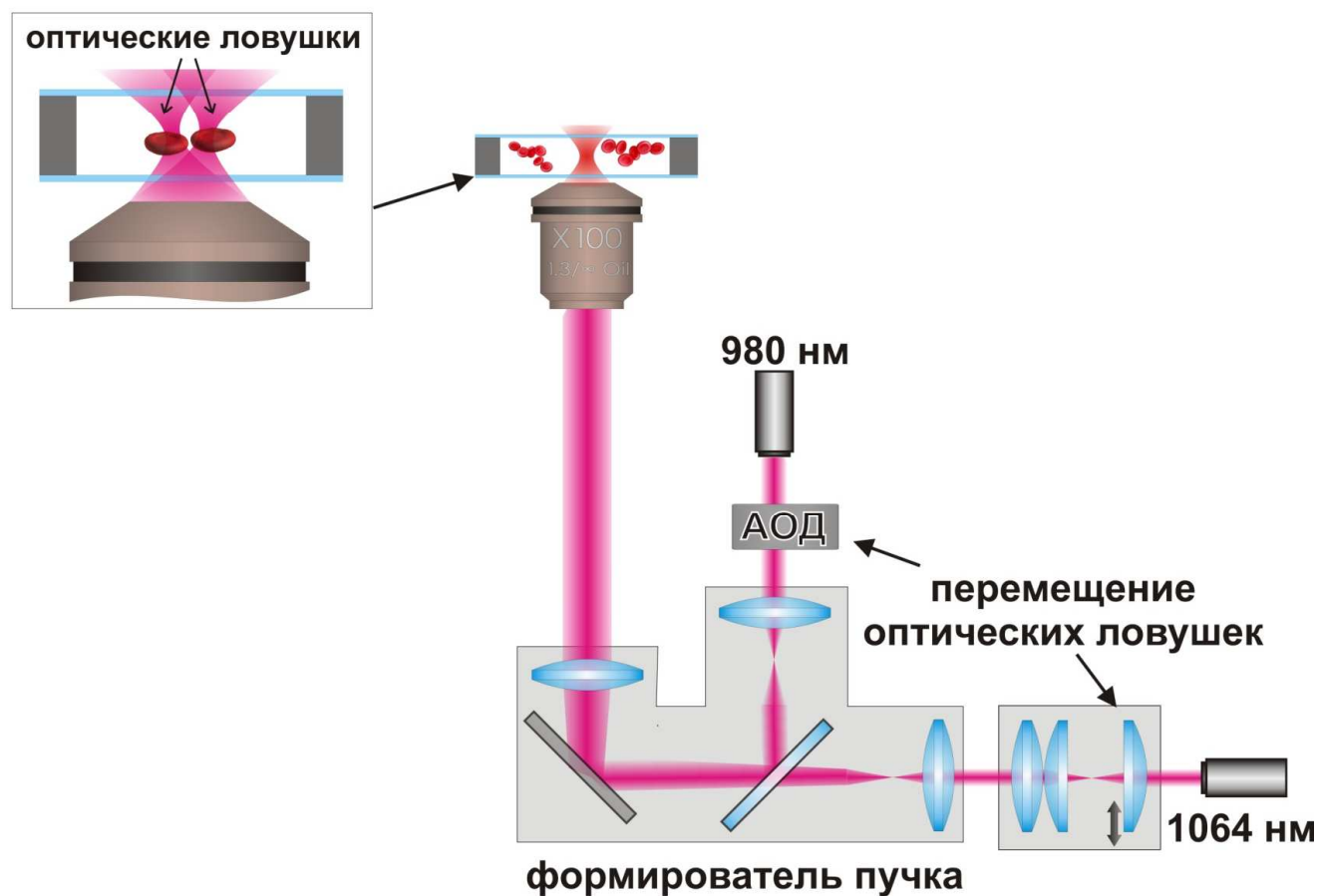
Мода: TEM₀₀



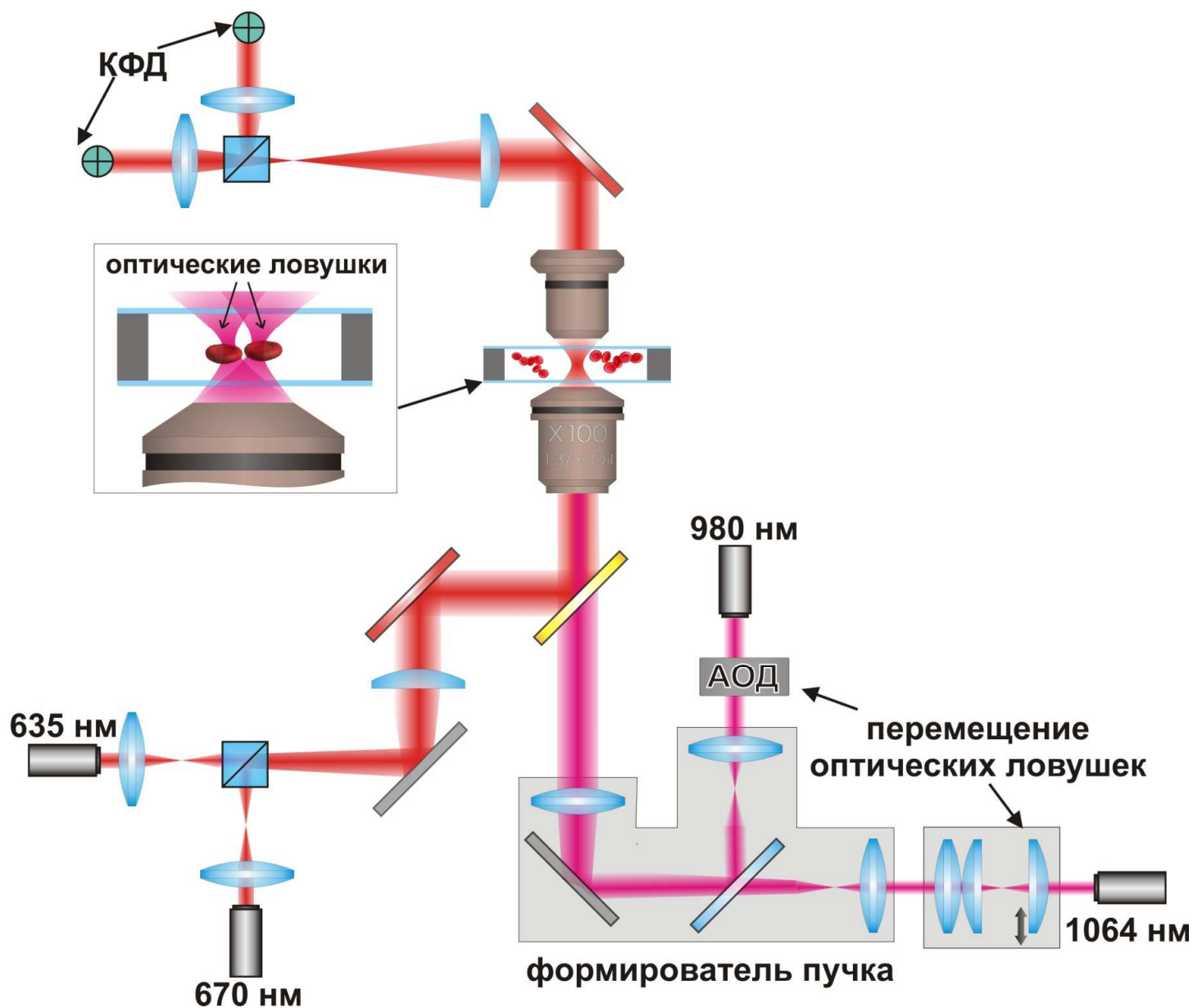
Двухлучевая модификация оптического пинцета (разделение лучей по поляризации)



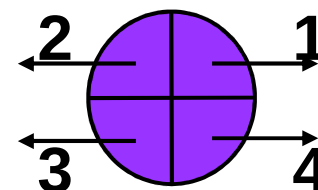
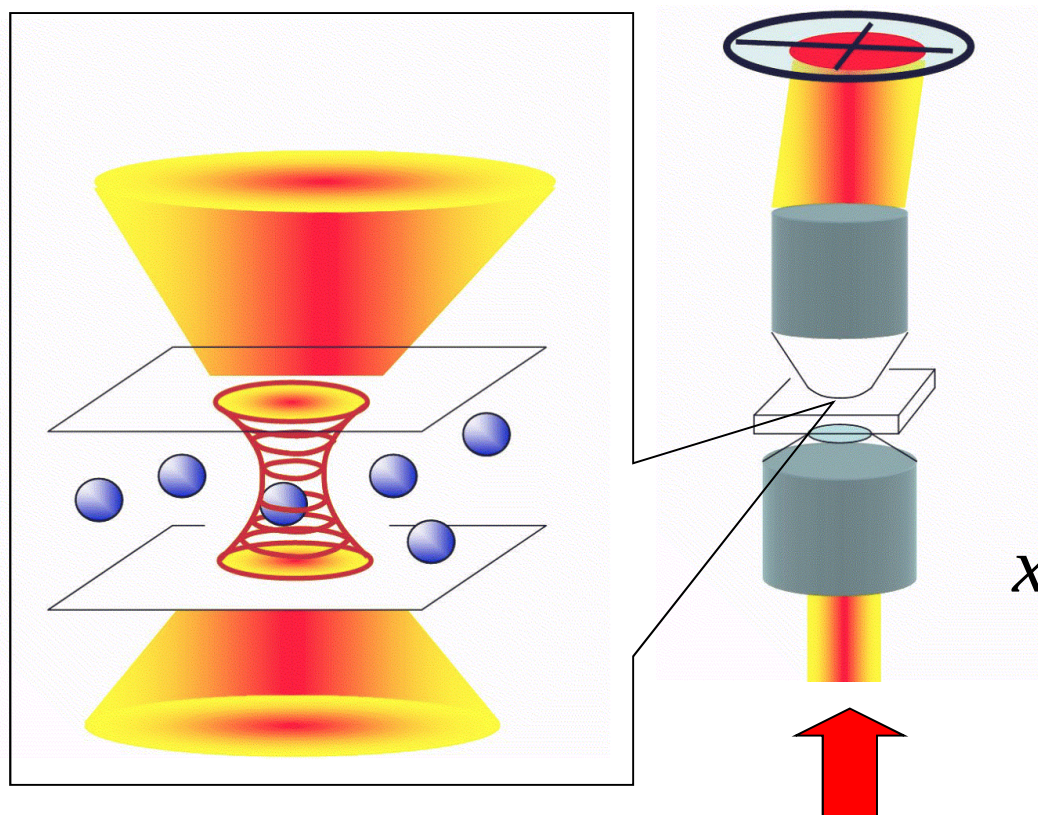
Двухлучевая модификация оптического пинцета (управление ловушками: АОД)



Двухлучевая модификация оптического пинцета (регистрация смещений: КФД)



Определение положения частицы по квадрантным фотодиодам

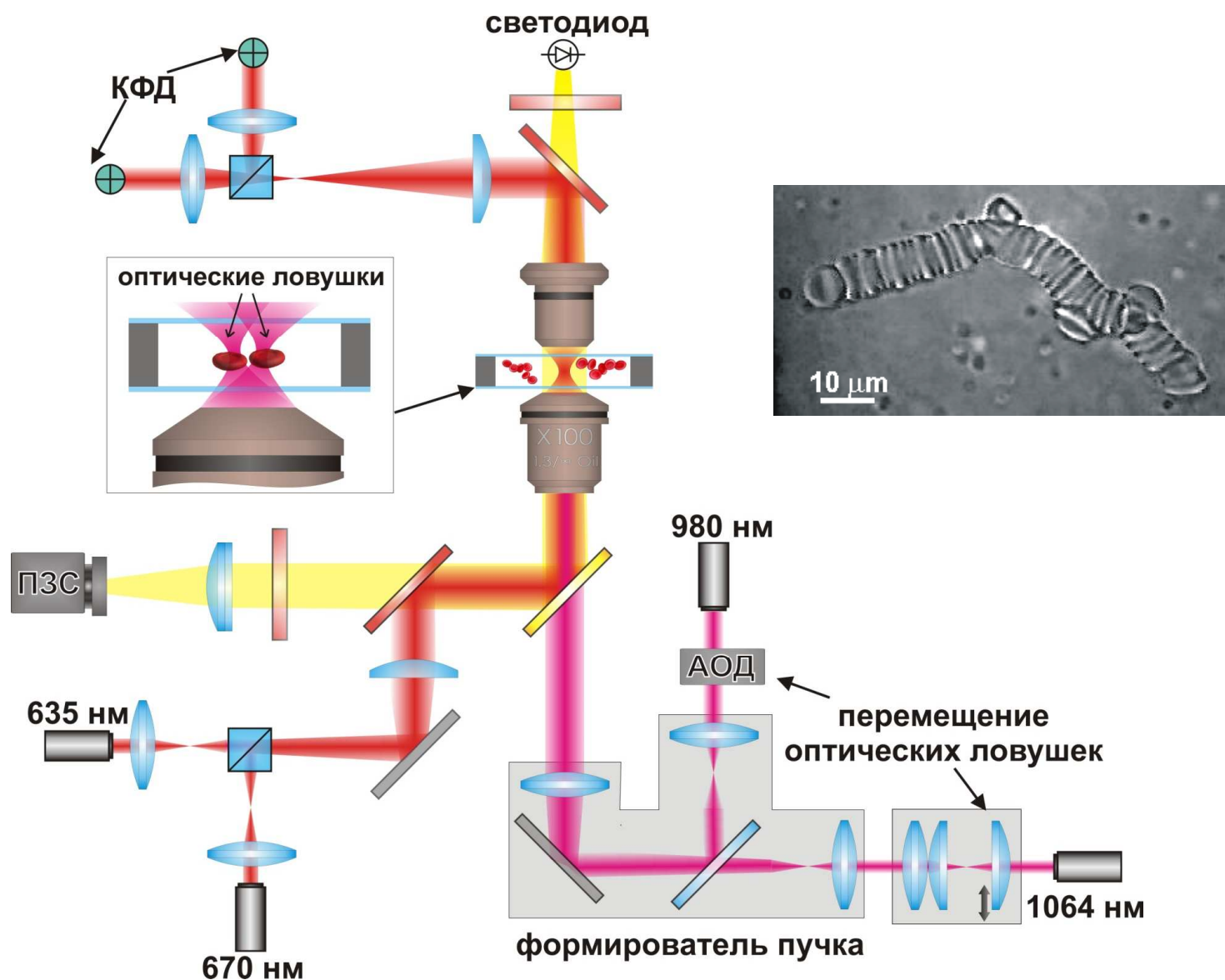


$$x = A \frac{I_1 - I_2 - I_3 + I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

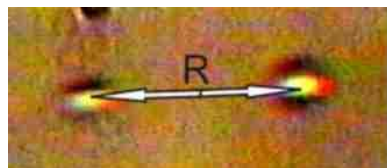
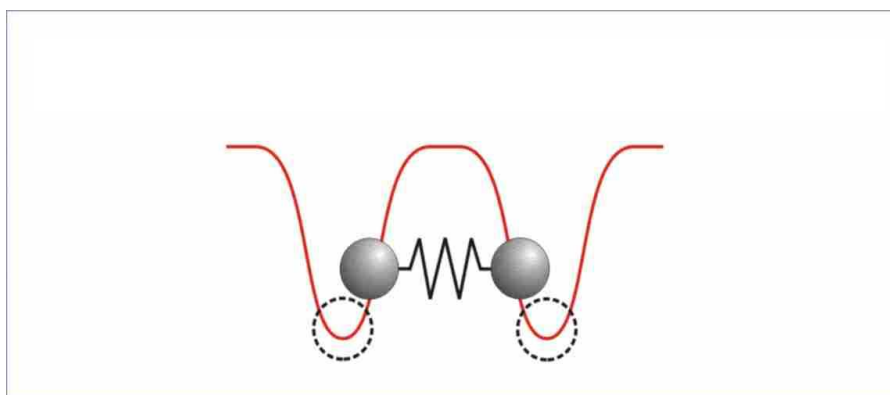
$$y = B \frac{I_1 + I_2 - I_3 - I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

$$z = C(I_1 + I_2 + I_3 + I_4) - D$$

Визуализация эксперимента: CCD-камера



Двойной оптический пинцет: контроль межчастичного расстояния



$R=20.8\ \mu\text{m}$



$R=18.3\ \mu\text{m}$



$R=14.6\ \mu\text{m}$



$R=11.3\ \mu\text{m}$



$R=9.9\ \mu\text{m}$



$R=7.1\ \mu\text{m}$

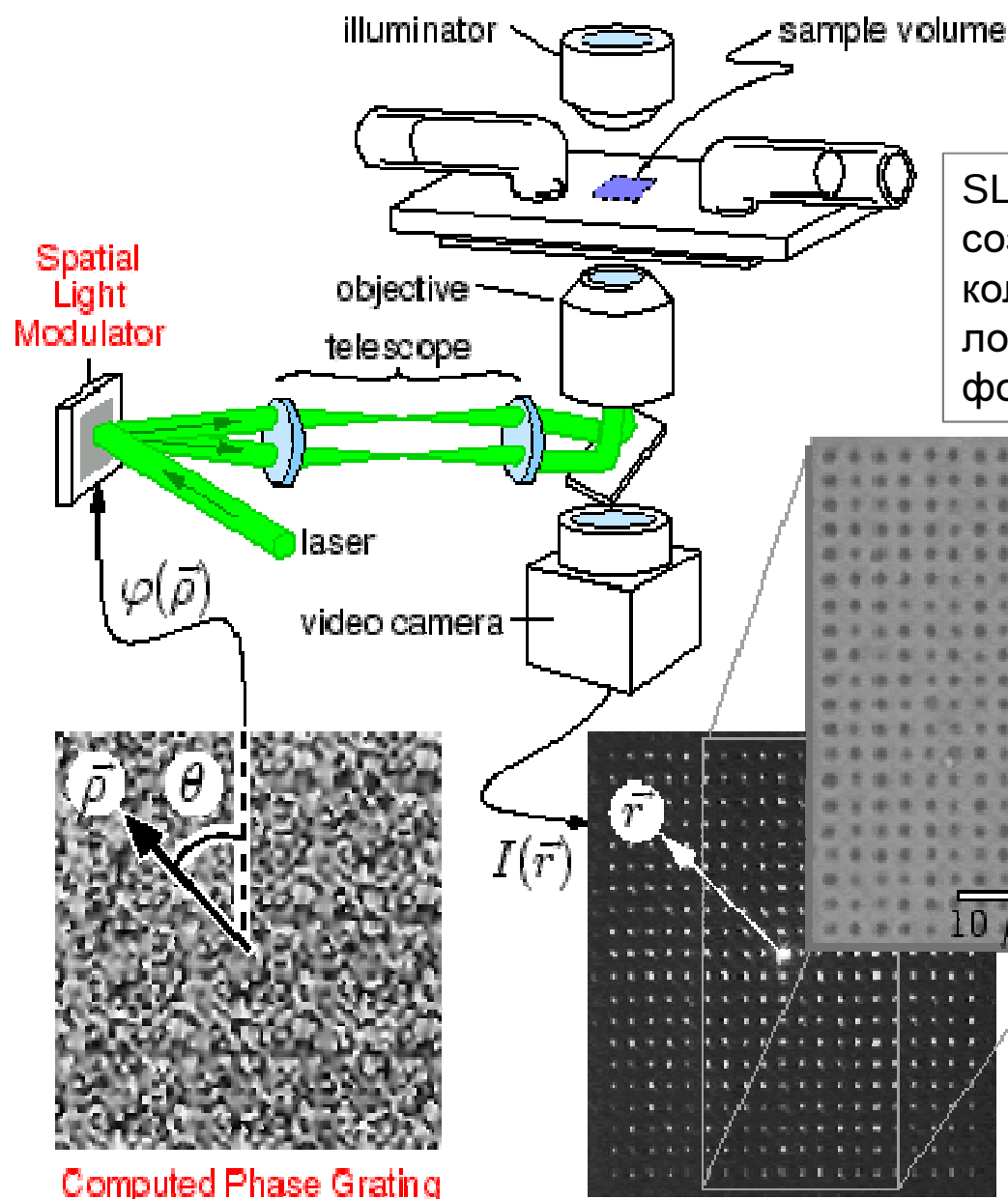


$R=6.4\ \mu\text{m}$

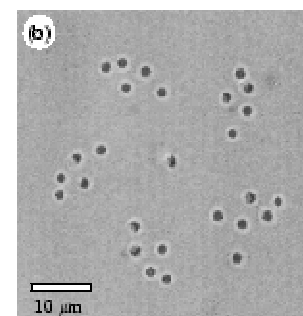
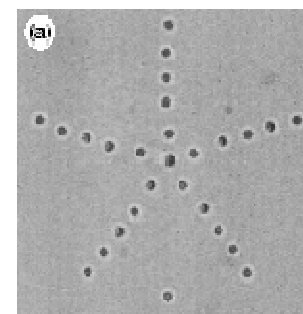
Двойной оптический пинцет: контроль межчастичного расстояния



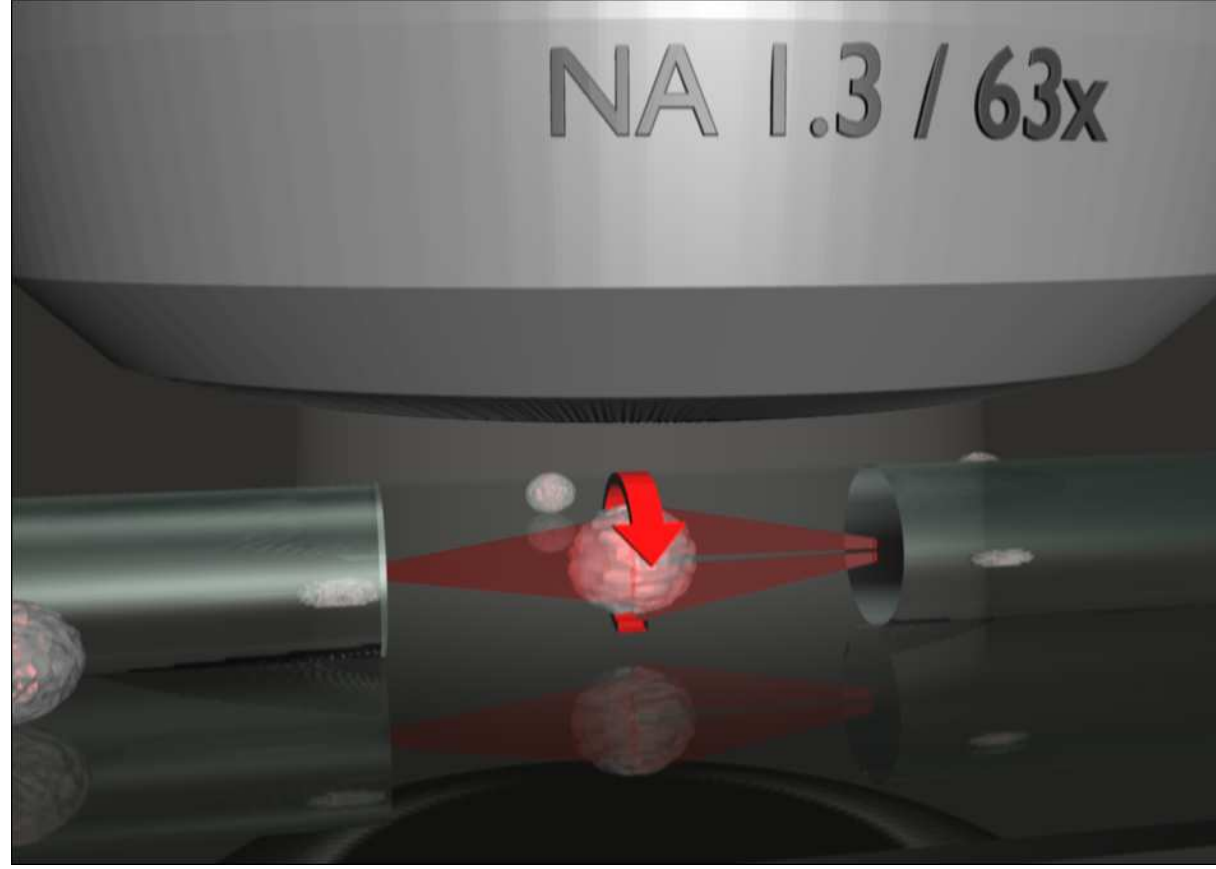
Голографический оптический пинцет



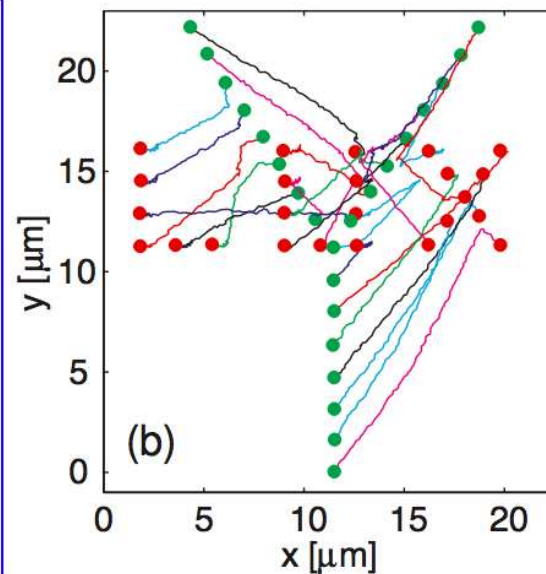
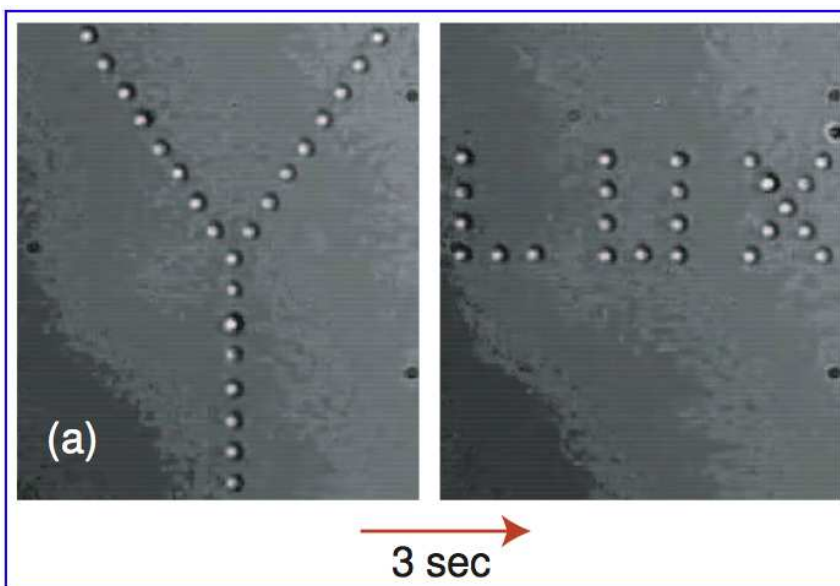
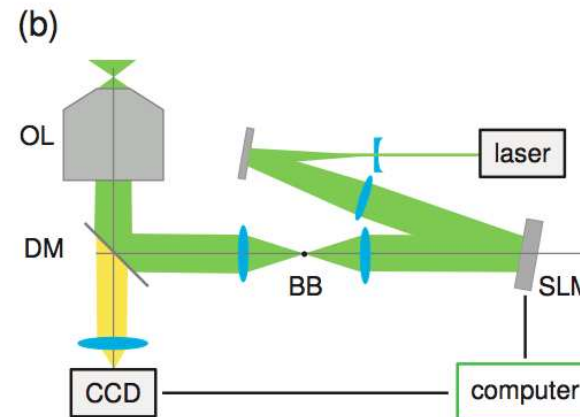
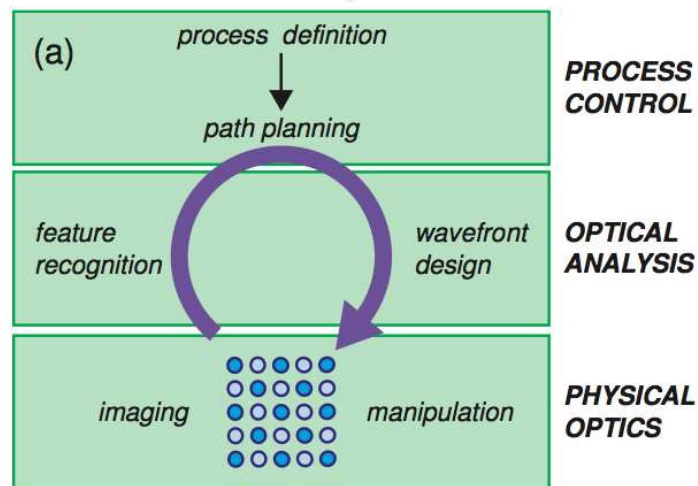
SLM – spatial light modulator:
создание произвольного
количества оптических
ловушек с произвольной
формой



Волоконно-оптический пинцет

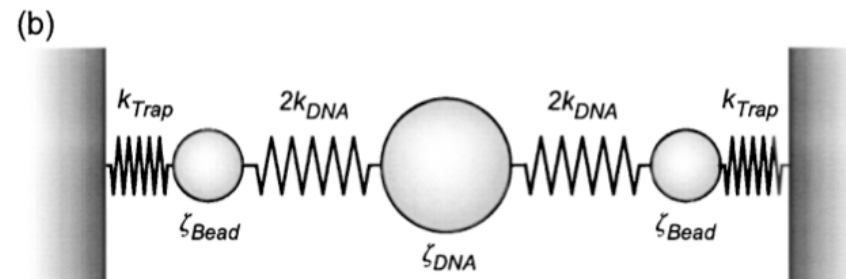
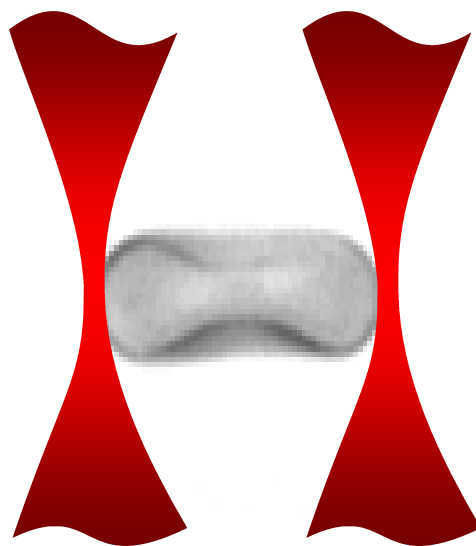
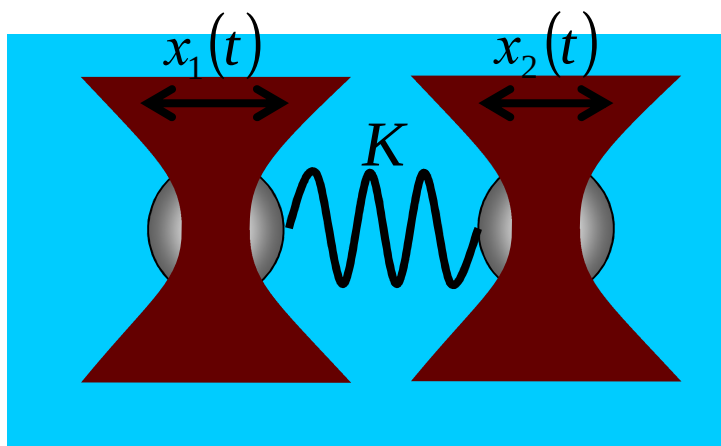


Искусственное упорядочение микрочастиц с помощью оптического пинцета



S. Chapin, V. Germain and E. Dufresne, "Automated trapping, assembly, and sorting with holographic optical tweezers," Opt. Express 14(26), 13095 (2006)

Изучение упругих свойств протяженных объектов

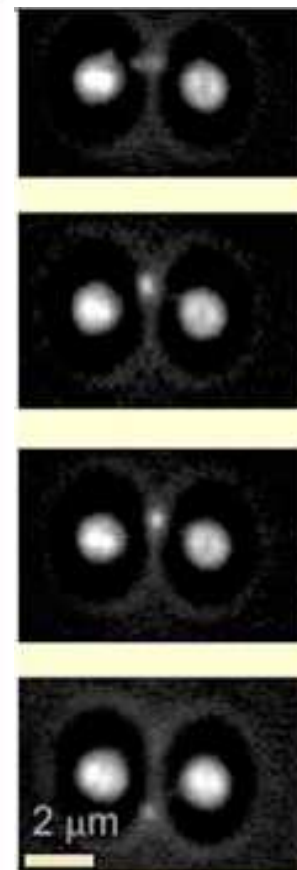
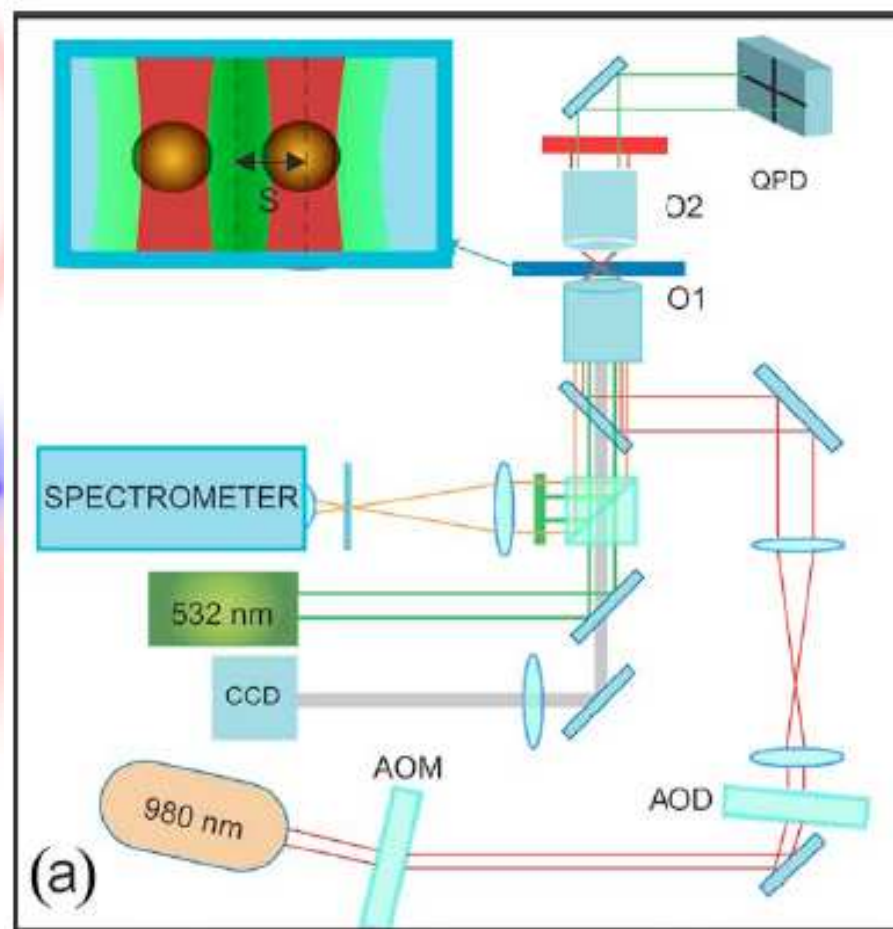
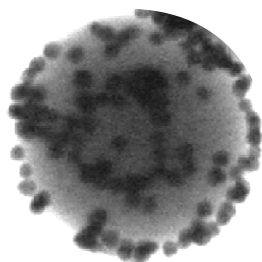
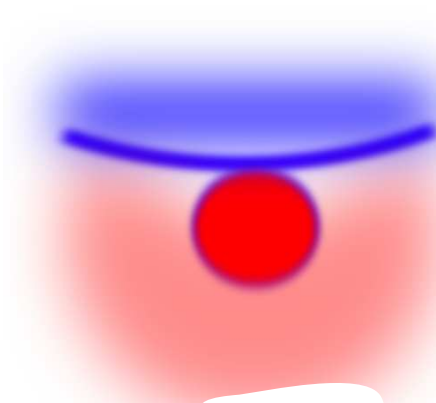
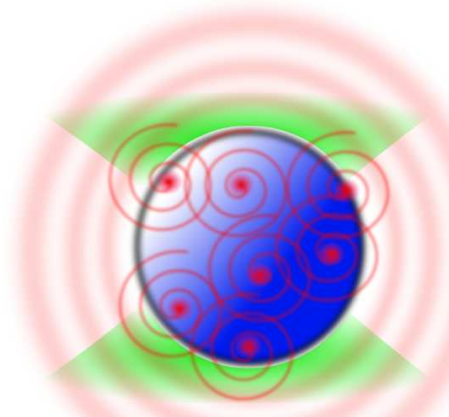


J. Meiners and S. Quake, "Femtonewton Force Spectroscopy of Single Extended DNA Molecules," Phys. Rev. Let. 84(21), 5014-5017 (2000)

Парная агрегация эритроцитов



Локальные плазмонные эффекты в металлизированных диалектических микрочастицах



Диэлектрические частицы SiO₂ (1.5 мкм), покрытые наночастицами Ag (30 нм)