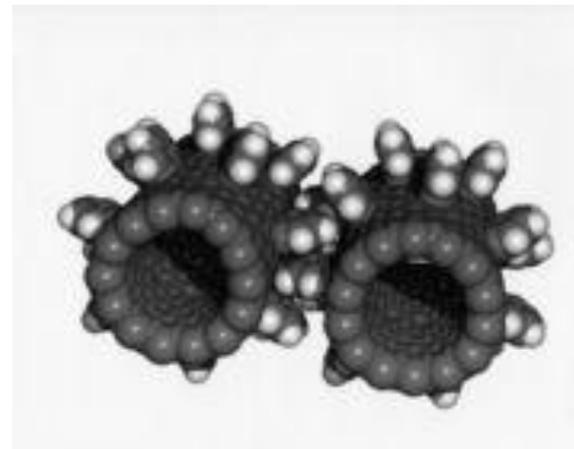


Нано-электромеханические устройства

Нанороботы

- **Нанороботы**, или **наноботы** — роботы, созданные из наноматериалов и размером сопоставимые с молекулой, обладающие функциями
 - движения,
 - обработки и передачи информации,
 - исполнения программ.
- Нанороботы, способные к созданию своих копий, т.е. самовоспроизводству, называются **репликаторами**.



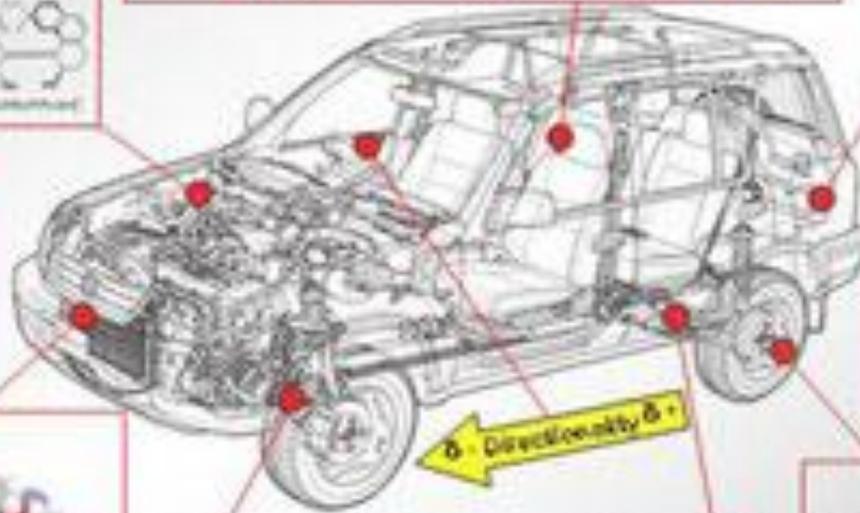
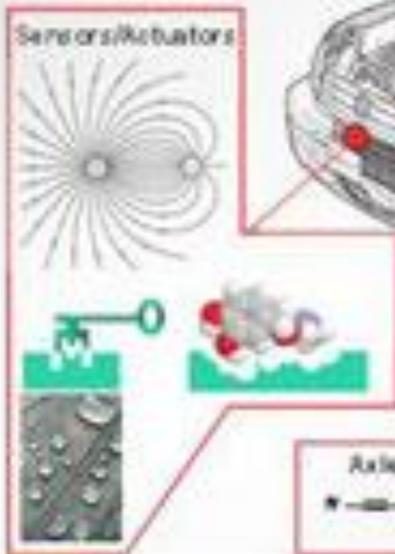
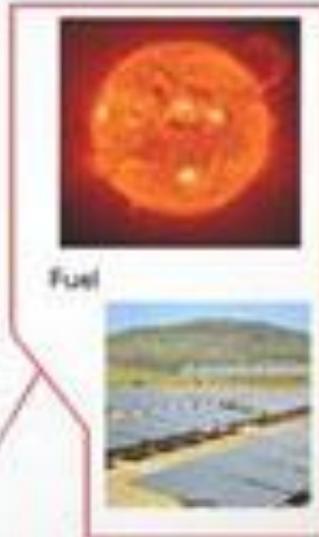
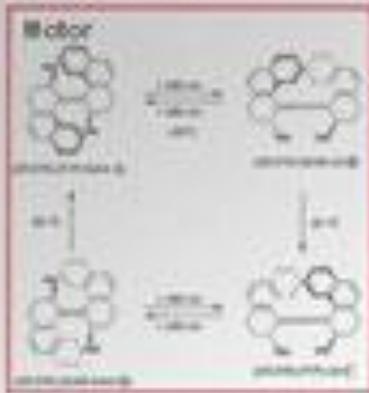
Наношестерня

Наноавтомобиль

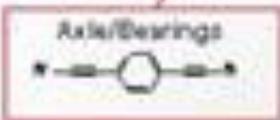
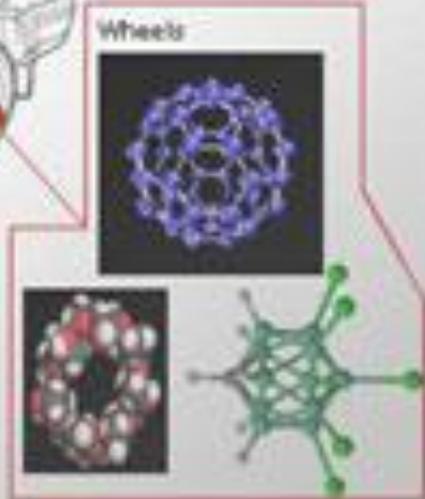
— 全体構造図 —

En Route to Solar-Powered Nanocars

Understanding Nanoscale Componentry

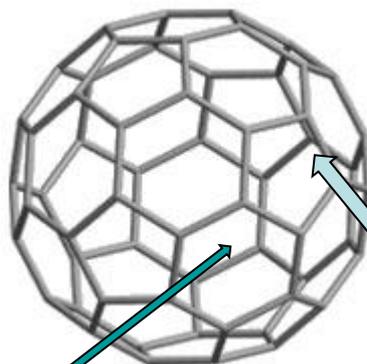
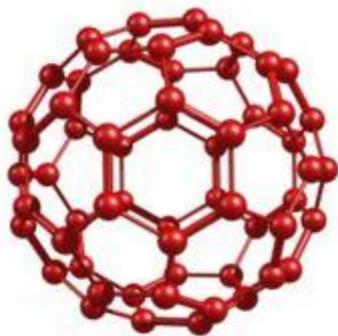


Directionality δ



Компоненты нано-машин – колесо

Фуллерен C₆₀



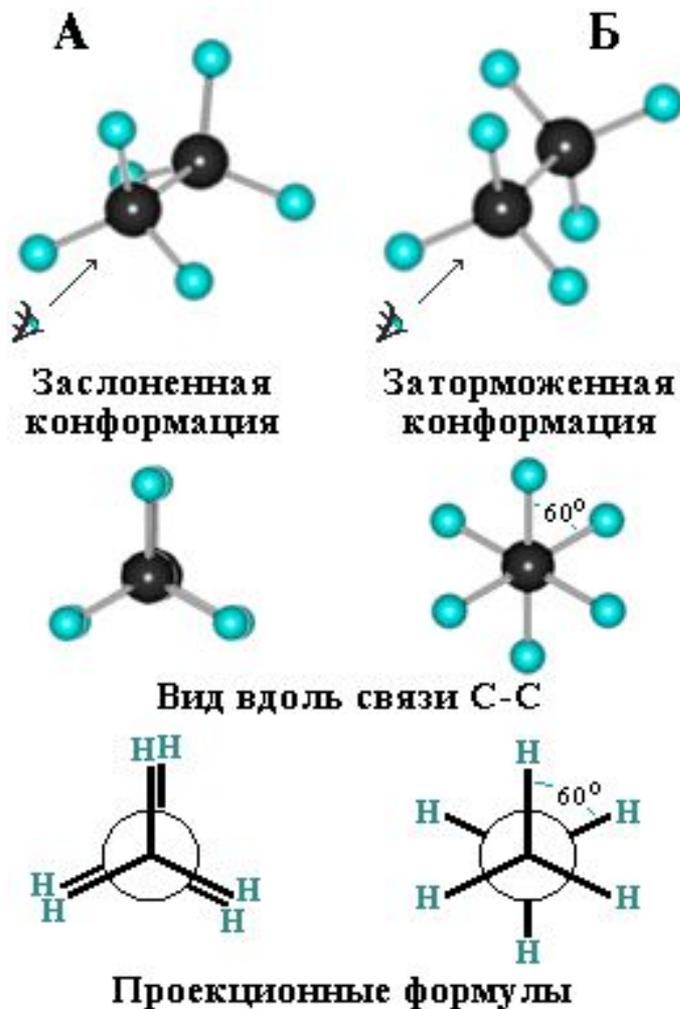
Усеченный
икосаэдр и мяч



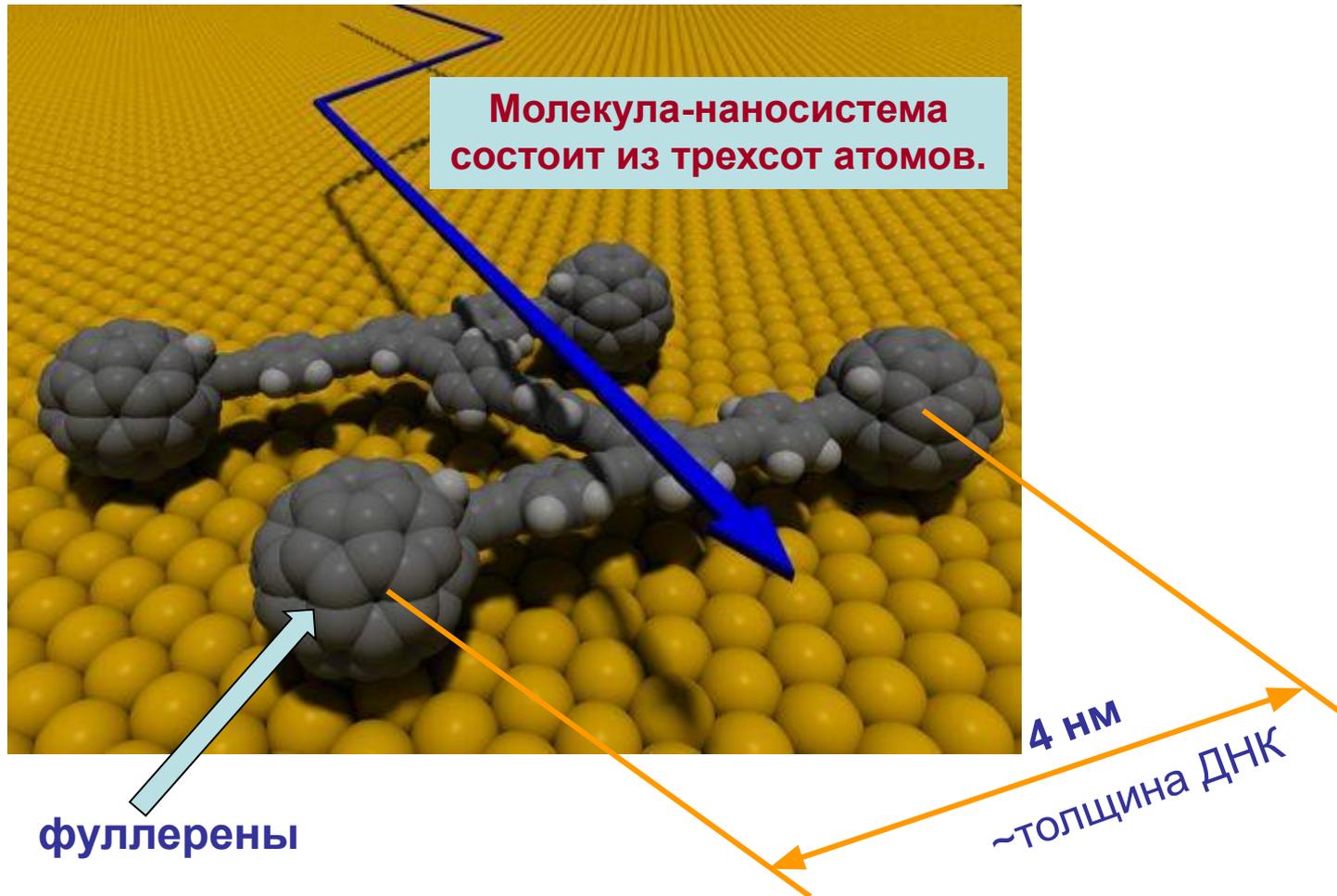
Для существования такого замкнутого многогранника, построенного из n вершин, образующих только **пяти-** и **шестиугольные** грани, согласно теореме Эйлера для многогранников, необходимым условием является наличие ровно 12 пятиугольных граней и $n / 2 - 10$ шестиугольных граней.

Компоненты нано-машин – поворот оси (1)

- Поворотная изомеризация под действием температуры

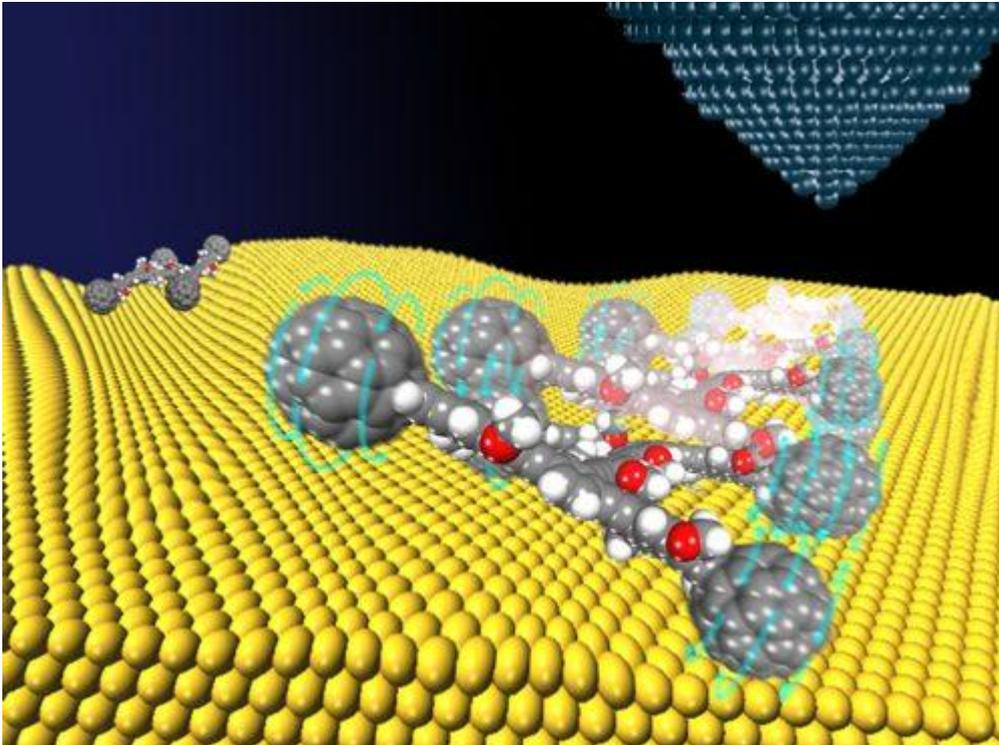


Молекула-наносистема



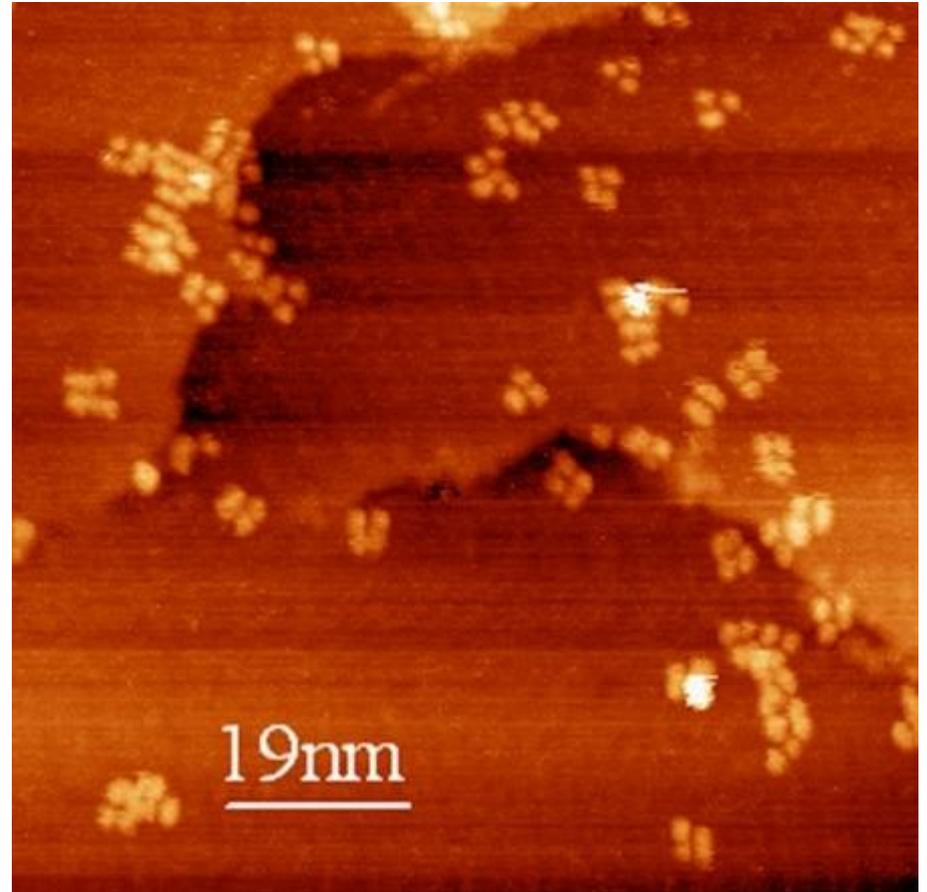
Метод приведения в движение наномашины

- Нагрев ее до 200°C , что вызывает вращение фуллеренов на химических связях, соединяющих их с «рамой машины». От вращения четырех молекул наносистема приходит в движение и может катиться по плоской золотой поверхности.



- Ее передвижения связаны с вращением фуллеренов-колес.
- Для наблюдения используют **сканирующую туннельную микроскопию** (СТМ). Каждую минуту получали СТМ снимки машины, доказывающие, что колеса действительно вращаются

- 20000 наномашин
можно поместить на
торце человеческого
волоса.

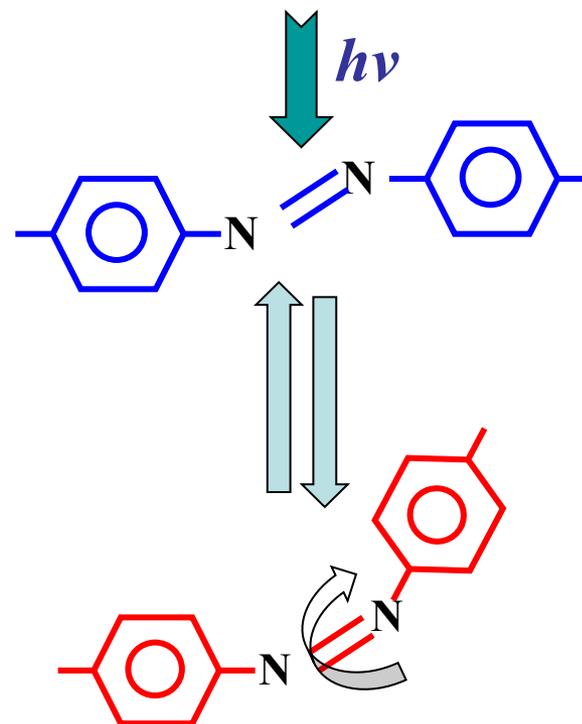


Проблема – управление движением отдельных молекул

- Однако от нагрева едут все машины-молекулы, что делает невозможным управление отдельными «автомобилями». А это будет необходимо при организации молекулярных конвейеров и транспортных линий, осуществляющих перемещение промежуточных продуктов в нанофабриках будущего.
- На каждую машину решено поставить индивидуальный «мотор», питающийся световой энергией.

Компоненты нано-машин – поворот оси (2)

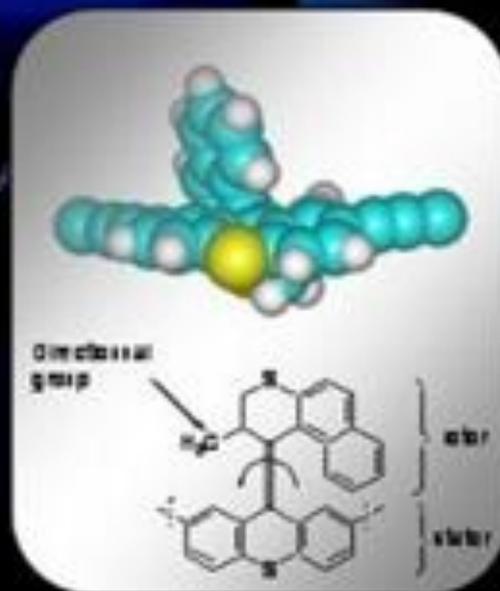
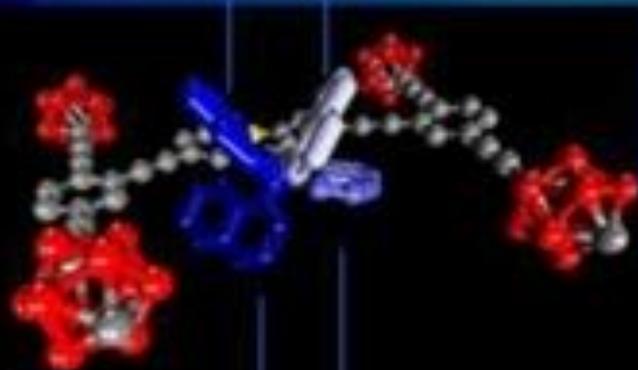
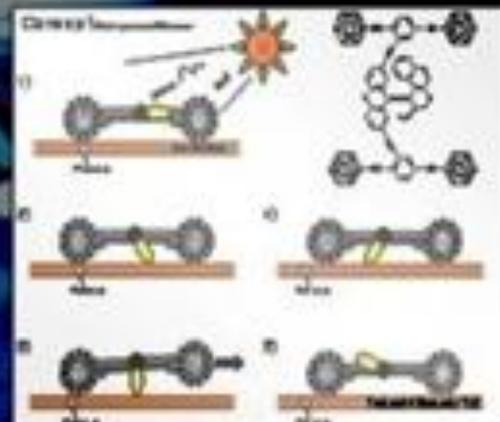
- Транс-цис изомеризация азобензолов под действием света



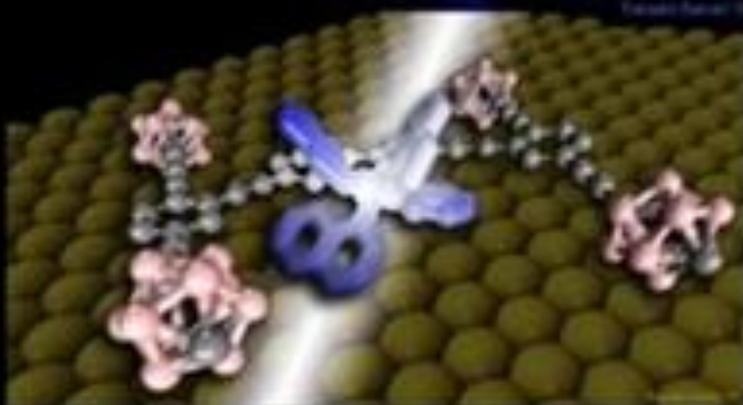
Моторизованная наномашина

Привод
на солнечной
энергии

Концепт



Мотор



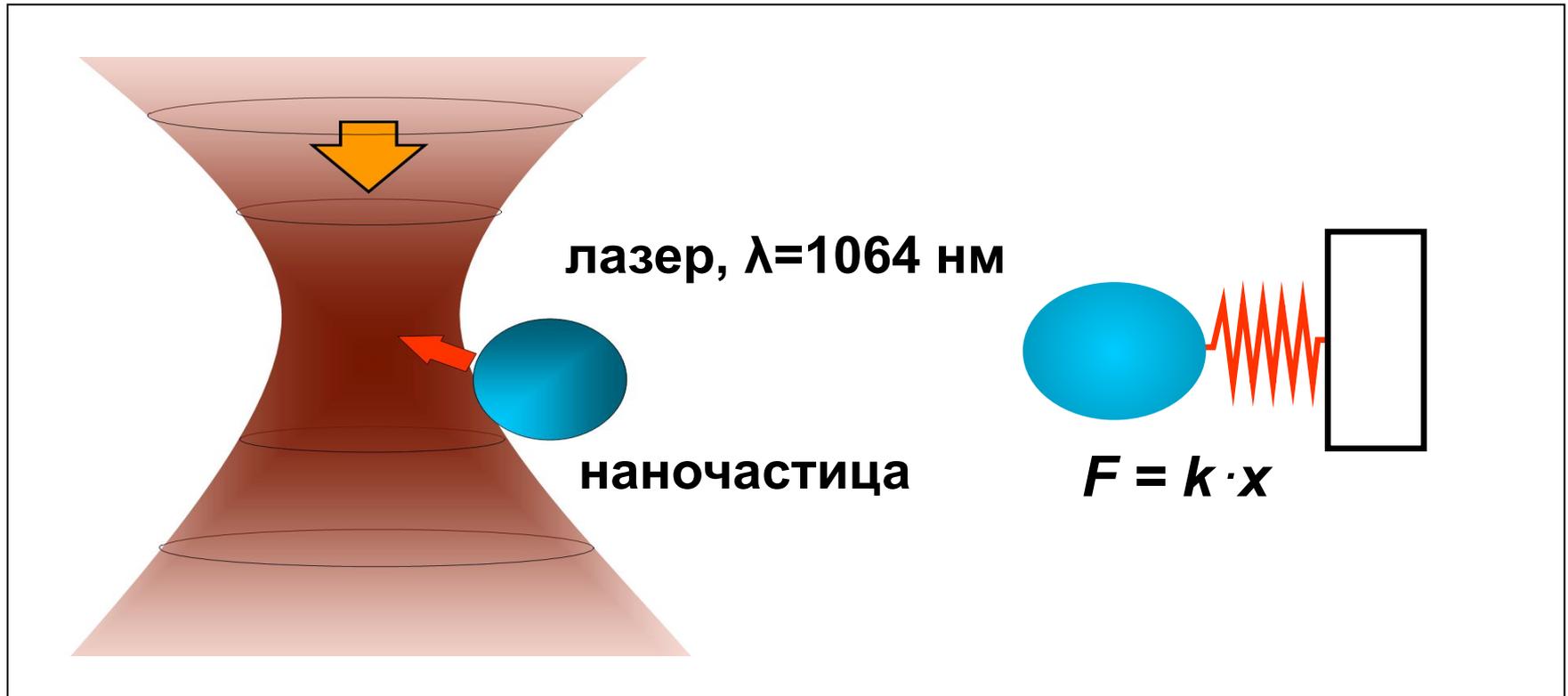
Возможные применения

- Эти машины помогут освоить базовые правила работы в наном мире: транспортировки нанообъектов, взаимодействие между ними и сборка микроблоков из отдельных молекул
- Машина сможет перевозить молекулярные грузы в различных направлениях, что можно использовать в наноконвейерах, нанофабриках и других сложных наносистемах.
- Также она может служить платформой для различных мобильных наносистем: нанороботов, наноманипуляторов.
- В качестве энергетической подпитки машин используются направленные пучки фотонов вместо нагревания среды, в которой находятся машины. Так появится возможность ими управлять и координировать их перемещения с высокой степенью точности.

Сравнение характеристик различных НЭМС

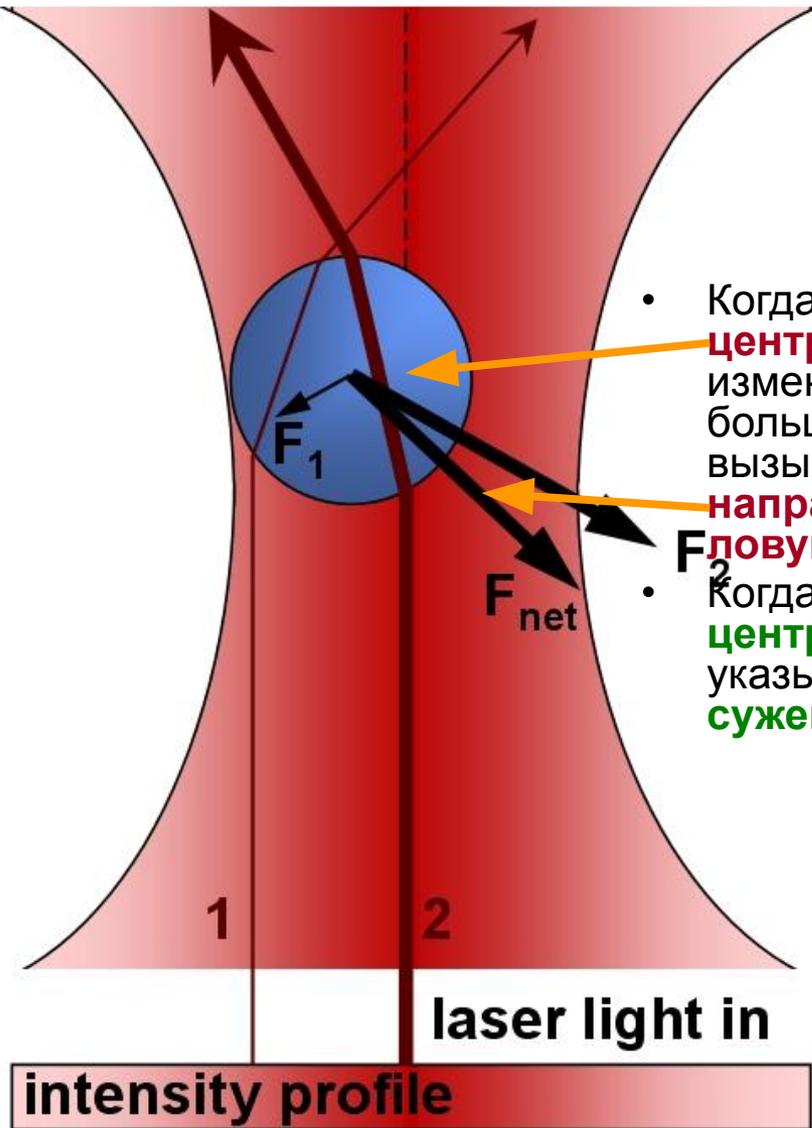
НЭМС	Расстояние / Угол	Момент / Сила	Входной сигнал
Нанопроволочный резонатор	≈ 1 нм	Нет данных	100 мкВ
Электростатический мотор	$>360^\circ$	≈ 6 нН мкм	≈ 50 В
Электростатический пинцет	≈ 100 нм	>10 нН	>8 В
Протеиновый мотор	$>360^\circ$	100 пН	120° на молекулу АТФ
Молекулярный мотор	$\approx 3,5$ нм	100 пН	
Наномагнитный актюатор	$>57^\circ$	$\approx 1,5$ пН мкм	110 кА/м

«Лазерный пинцет» – инструмент для работы с нанообъектами

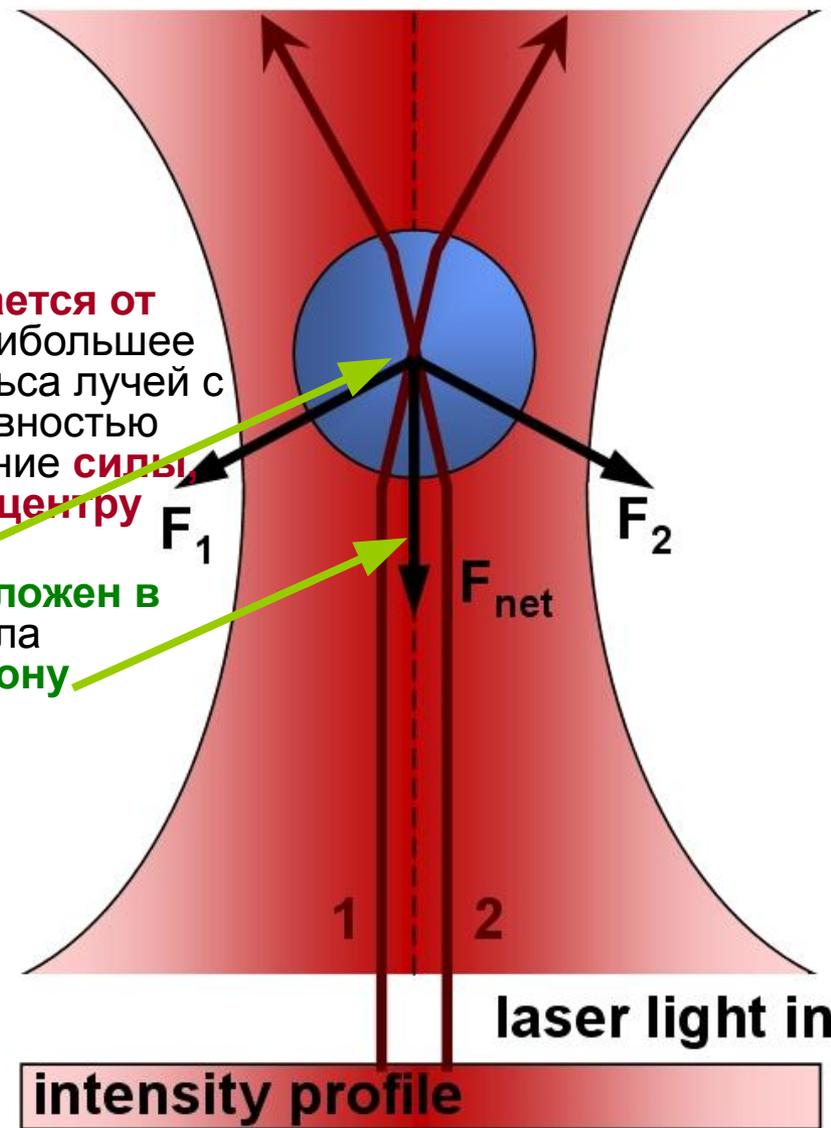


- **Оптический пинцет** (англ. *Optical tweezers*), иногда «лазерный пинцет» или «оптическая ловушка» — научный прибор для манипуляции микроскопическими объектами с помощью лазерного света.
- Он позволяет прикладывать к диэлектрическим объектам **силы от фемтоньютон до наноньютонов** и измерять расстояния от нескольких нанометров до микронов.
- **Использование в биофизике** для изучения структуры и принципа работы белков.

- На микросферу действуют **две разных оптических силы** благодаря инерции падающего и преломленного света.
- Результирующая сила толкает сферу **в направлении области наивысшей интенсивности луча**. Такая сила называется **градиентной силой**.



- Когда **шар смещается от центра пучка**, наибольшее изменение импульса лучей с большей интенсивностью вызывает появление **силы, направленной к центру ловушки**.
- Когда **шар расположен в центре пучка**, сила указывает **в сторону сужения**.



Физические принципы

- Объекты, представляемые в виде маленьких диэлектрических сфер взаимодействуют с **электрическим полем, созданным световой волной**, за счёт индуцированного на сфере дипольного момента.
- В результате взаимодействия этого диполя с электрическим полем электромагнитной волны, объект перемещается **вдоль градиента электрического поля**.
- Кроме *градиентной силы*, на объект также действует сила, вызванная **давлением (отражением) света** от его поверхности. Эта сила толкает сферу по направлению пучка света.
- Однако, если луч света сильно сфокусирован, ***величина градиента интенсивности может быть больше величины давления света***.

Волновая оптика

- **Объяснение на основе волновой оптики.** Когда шар смещается от центра пучка, как на рисунке (а), наибольшее изменение импульса лучей с большей интенсивностью вызывает появление силы, направленной к центру ловушки. Когда шар расположен в центре пучка, как показано на рисунке (b), сила указывает в сторону сужения.
- При анализе с использованием волновой оптики, рассмотрение процессов преломления и отражения света от микросферы достаточно, чтобы проанализировать втягивание в оптическую ловушку (см. рисунок справа).
- Самый простой расчёт действующих сил в пределах подхода волновой оптики основывается на геометрической оптике. Рассмотрение луча указывает на изменение импульса света при отражении и преломлении. Таким образом, это изменение импульса (фотона как частицы), согласно второму закону Ньютона, будет приводить к возникновению силы.
- Используя простую диаграмму лучей и вектора силы, можно показать, что на микросферу действуют две разных оптических силы благодаря инерции падающего и преломлённого света. Как это видно из диаграммы, результирующая сила толкает сферу в направлении области наивысшей интенсивности луча. Такая сила называется *градиентной силой*.

- Чтобы исследуемый объект был неподвижен, необходимо скомпенсировать силу вызванную давлением света. Это можно сделать за счёт двух встречных пучков света, которые толкают сферу в противоположных направлениях, или с помощью сильно сфокусированного гауссового пучка (с высокой числовой апертурой, $NA > 1,0$), чтобы компенсировать давление света высокой *градиентной силой*.

Приближение электрического диполя

- В случаях, когда **диаметр пойманной в ловушку частицы** значительно меньше, чем **длина волны света**, условия удовлетворяют **условию рассеивания Рэлея**, и частицу можно рассмотреть как точечный диполь в неоднородном электромагнитном поле.
- Сила, действующая на заряжённую частицу в электромагнитной области, известна как **сила Лоренца**

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

- Предполагая, что мощность лазера не зависит от времени, сила запишется в виде

$$F = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2$$

- Квадрат величины электрического поля равен интенсивности луча как функция координат. 
- Сила, действующая на диэлектрическую частицу, при приближении точечного диполя, является пропорциональной градиенту интенсивности пучка.
- Описанная сила приводит к притяжению частицы в область с самой высокой интенсивностью.
- В действительности, сила, возникающая при рассеянии света зависит линейно от
 - интенсивности луча,
 - поперечного сечения частицы,
 - показателя преломления среды, в которой находится ловушка (например, вода),
- Эта сила работает против *градиентной силы* в осевом направлении ловушки 
- равновесное положение смещается немного вниз от положения максимума интенсивности.

Характеристики «лазерного пинцета»

□ Предельное пространственное разрешение	0.1 нм
□ Диапазон измерения сил	0.01 – 200 пН
□ Количество одновременно работающих ловушек	1 - 100
□ Размер перемещаемых частиц	20 – 10000 нм
□ Диапазон перемещений	100 мкм

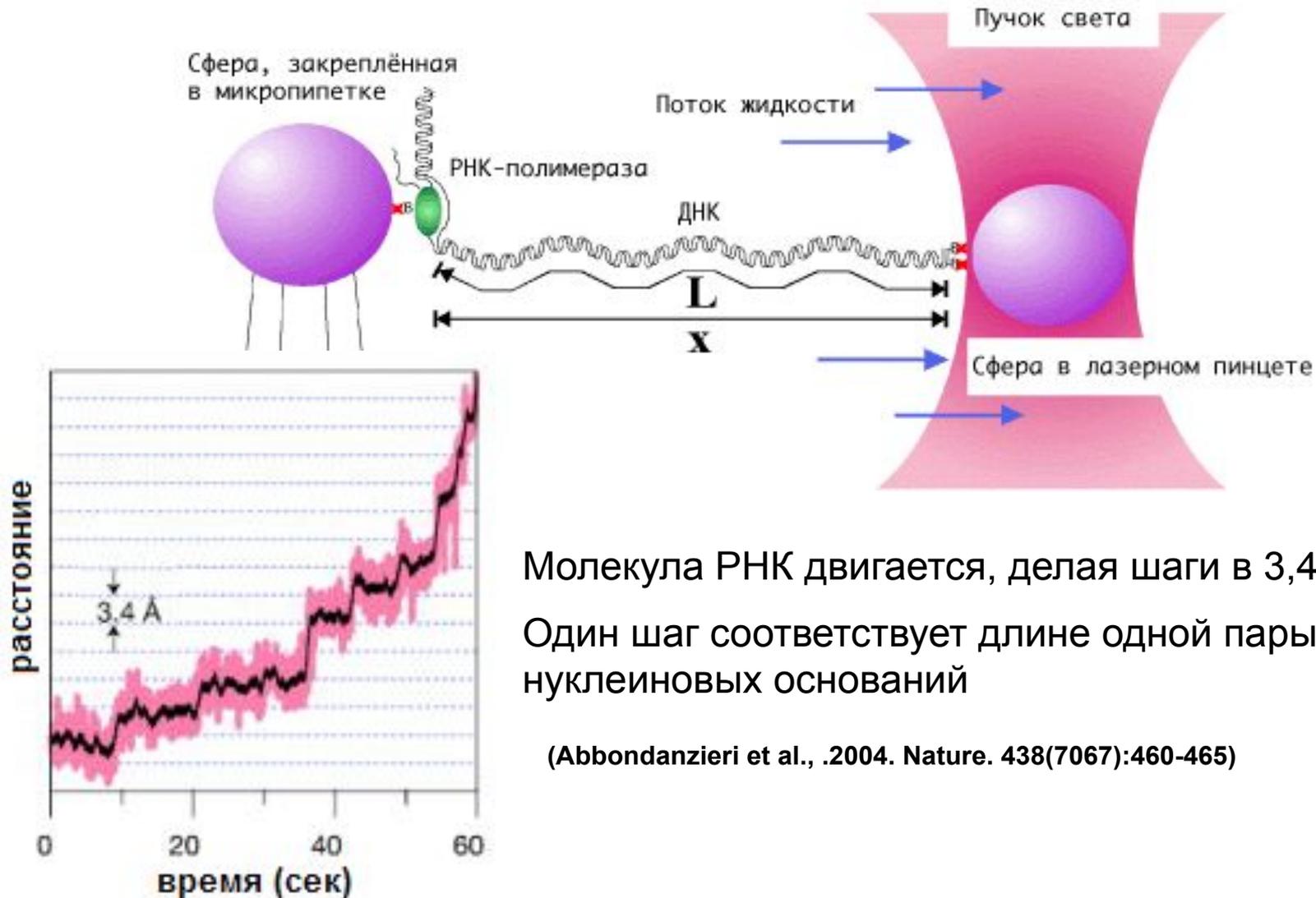
- **Градиентная сила действующая на частицу** (латексная сфера диаметром 0,51 микрона) в воде получается из **закона Стокса**

$$F = 6\pi r \eta v$$

и составляет **730 фН**.

- В воздухе максимальная скорость для капель воды диаметром 5 микрон при мощности лазера 50 мВт составила 0,25 см/с

Схема использования оптического пинцета в изучении РНК-полимеразы



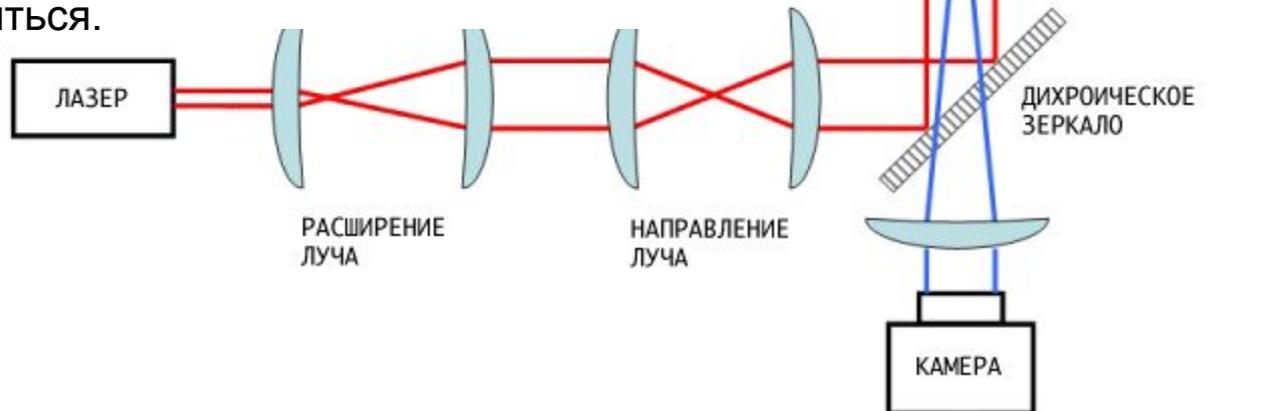
Молекула РНК двигается, делая шаги в 3,4 Å.
Один шаг соответствует длине одной пары нуклеиновых оснований

(Abbondanzieri et al., .2004. Nature. 438(7067):460-465)

Оптические пинцеты в сортировке клеток

Оптически управляемая система сортировки клеток

- Клетку пропускают через двух- или трёхмерные **оптические решётки**.
- Когда поток клеток проходит через оптические решётки, **силы трения частиц непосредственно конкурируют с оптической градиентной силой** от соседнего узла оптической решётки.
- Изменяя расположение узлов, возможно **создать оптическую дорожку**, по которой будут двигаться клетки.
- Такая дорожка будет эффективной только **для клеток с определённым коэффициентом преломления**, которые и будут эффективно отклоняться.



Принцип измерения положения с субнанометровой ТОЧНОСТЬЮ

