

# Основы физики наноструктур

Что такое НАНО?

*НАНО (греч.) – «гном», карлик*



*НАНО – одна миллиардная часть метра*

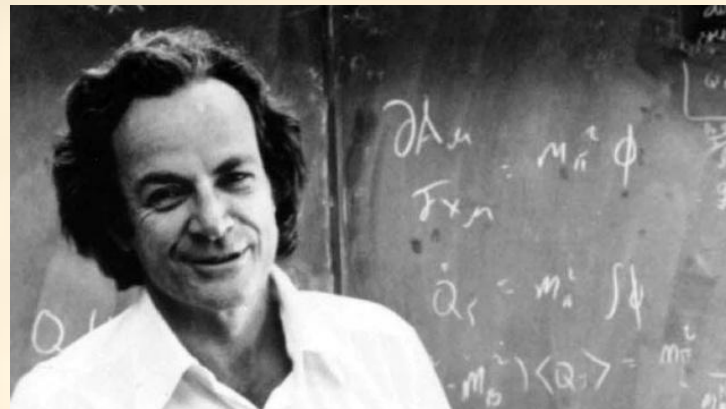
$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$$

## История термина

### ***«There's Plenty of Room at The Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics»***

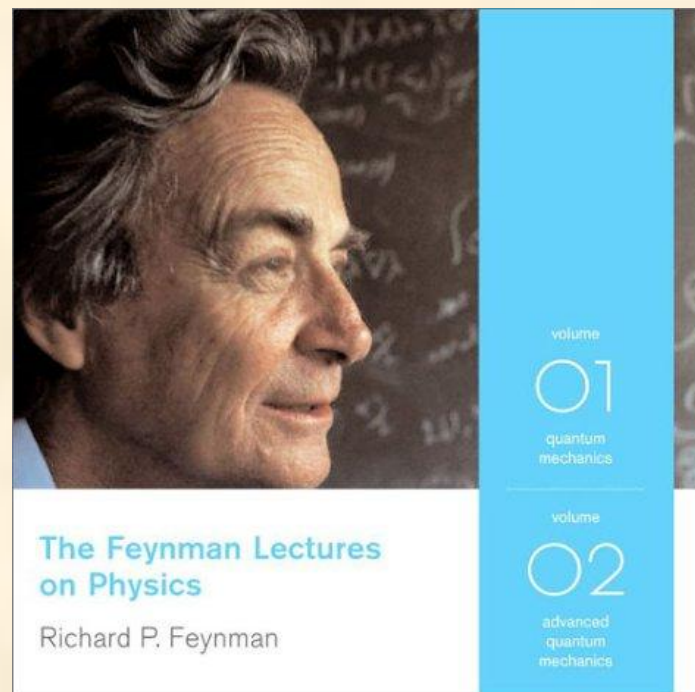
*(«Там внизу много места: приглашение  
в новый мир физики»)*

Речь, произнесённая на рождественском обеде  
Американского физического общества  
29 декабря 1959 года.



**Ричард Фейнман  
(1918-1988)**

*«Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений... Внизу (т. е. «внизу или внутри пространства», если угодно) располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьёзно к исследованиям этого мира»*



Лекции Фейнмана, записанные вначале на магнитофон, а затем «переведенные» на «письменный английский» профессорами М.Сэндсом и Р.Лейтоном, не похожи ни на один известный курс.

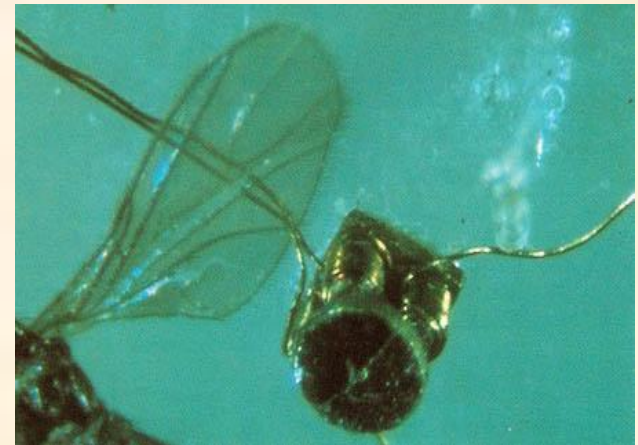
Они отличаются оригинальным методом изложения, в котором отразилась яркая научная индивидуальность автора, его точка зрения на пути обучения студентов физике, его умение заразить читателей интересом к науке.

## «Дедушка нанотехнологий»

В декабре 1959 г. Р. Фейнман из своих личных средств учредил две премии по \$1000 за практическое осуществление двух задач «управления строением вещества в интервале очень малых размеров», которые казались ему осуществимыми только в отдалённом будущем:

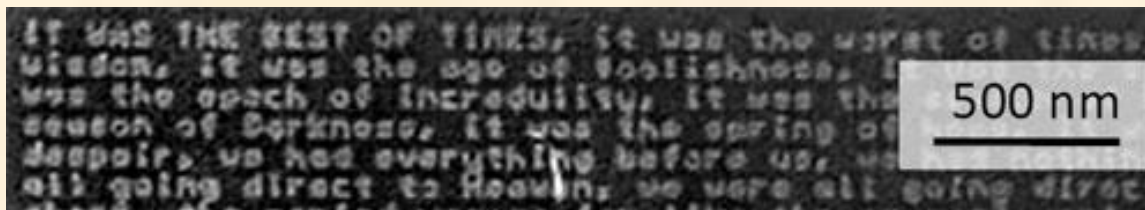
- Сделать работающий электромотор, размещающийся в кубе со стороной 1/64 дюйма ( $\approx 0.4 \text{ mm}$ )
- «Разместить Британскую Энциклопедию на булавочной головке», то есть, записать текст шрифтом, уменьшенным в 25 000 раз.

Менее чем через год, **первую премию Фейнмана** получил физик МакЛеллан (McLellan) из Университета Калифорнии. Работая во время обеденных перерывов, и используя обычный микроскоп, инструменты часовщика и зубочистки, за 2,5 месяца он собрал электромотор из 13 частей, массой 250 микрограмм и со скоростью вращения 2000 об/мин.



## «Дедушка нанотехнологий»

В 1985 году вторую премию получил Томас Ньюман из Университета Стэнфорда за требовавшееся уменьшение размеров печатного шрифта.

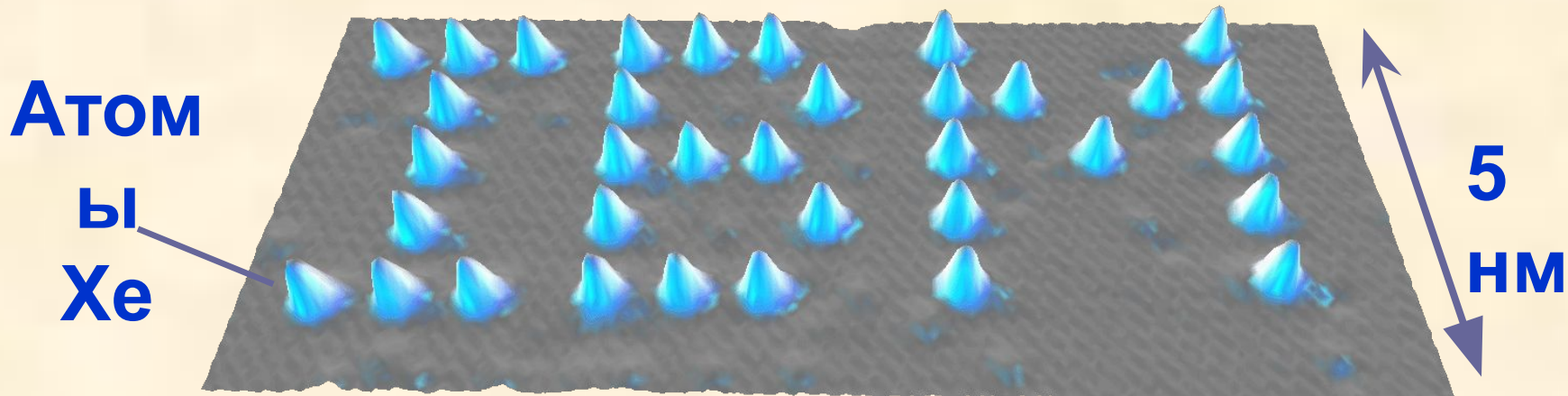


Первая страница романа Ч. Диккенса «Повесть о двух городах»  
(запись электронным пучком)



## «Дедушка нанотехнологий»

«И наконец, рискну предложить еще одну идею (рассчитанную, возможно, лишь на очень далекое будущее), которая мне представляется исключительно интересной. Речь идет о возможности располагать атомы в требуемом порядке — именно атомы, самые мелкие строительные детали нашего мира!»  
(Фейнман, 1959 год)



D.M. Eigler, E.K. Schweizer. **Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope.** *Nature* 344, 524-526 (1990).

«Нанотехнология» - это производственная высокоточная технология получения структур с очень маленькими размерами, т.е. в основе этой технологии лежат высокая точность и размеры порядка 1 нм (нанометр,  $10^{-9}$  м) в длину (статья «Об основных принципах нанотехнологий», 1974 год).

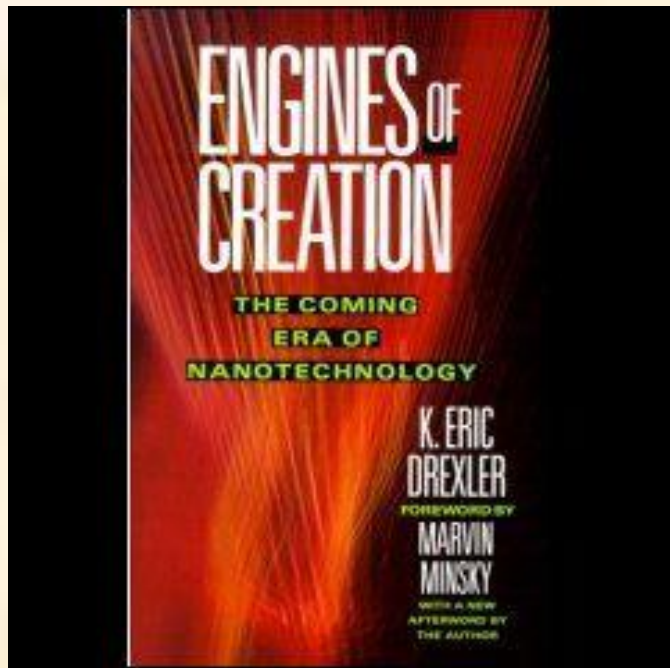


Норио  
Танигучи

Свой термин Танигучи относил прежде всего к допускам обработки макроскопических объектов и материалов. По сути, в его трактовке нанотехнологии сводились к доведению до молекулярного совершенства существующих принципов механической обработки материалов.

## Эрик Дрекслер (Eric Drexler)

Первая книга по  
нанотехнологиям (1986 г.)



Машины создания: грядущая эра нанотехнологии

1955 г.р.

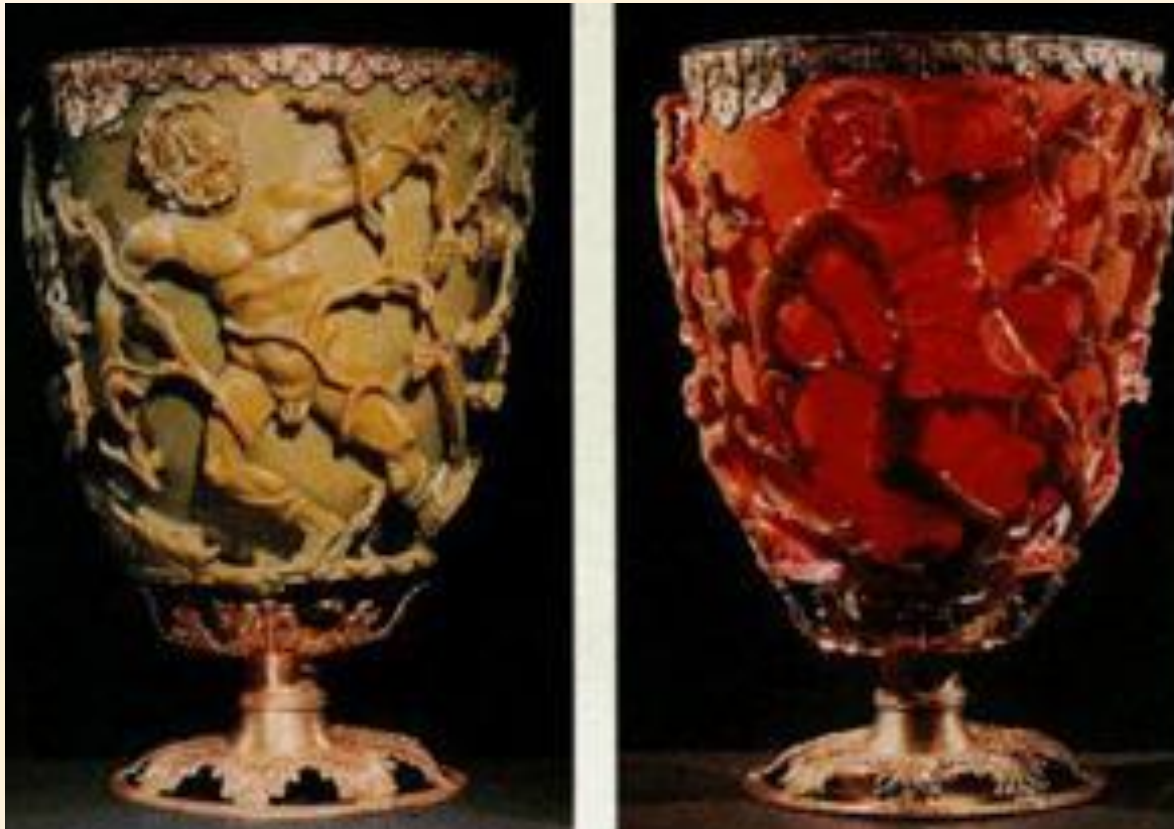
**В 1991 году Эрик Дрекслер защитил первую в истории диссертацию (PhD), по нанотехнологиям**

Э.Декслер: *Нанороботы, запрограммированные на самопроизводство, способны поглотить всю существующую биомассу и материю, превратив её в «серую слизь»*

Р.Смолли: *Наноробот, способный мультиплицироваться со скоростью 1 млн. атомов в секунду, нужно 20 млн. лет, чтобы накопить несколько десятков грамм продуктов саморазмножения при огромных энергетических затратах*



## Нанотехнологии в древности

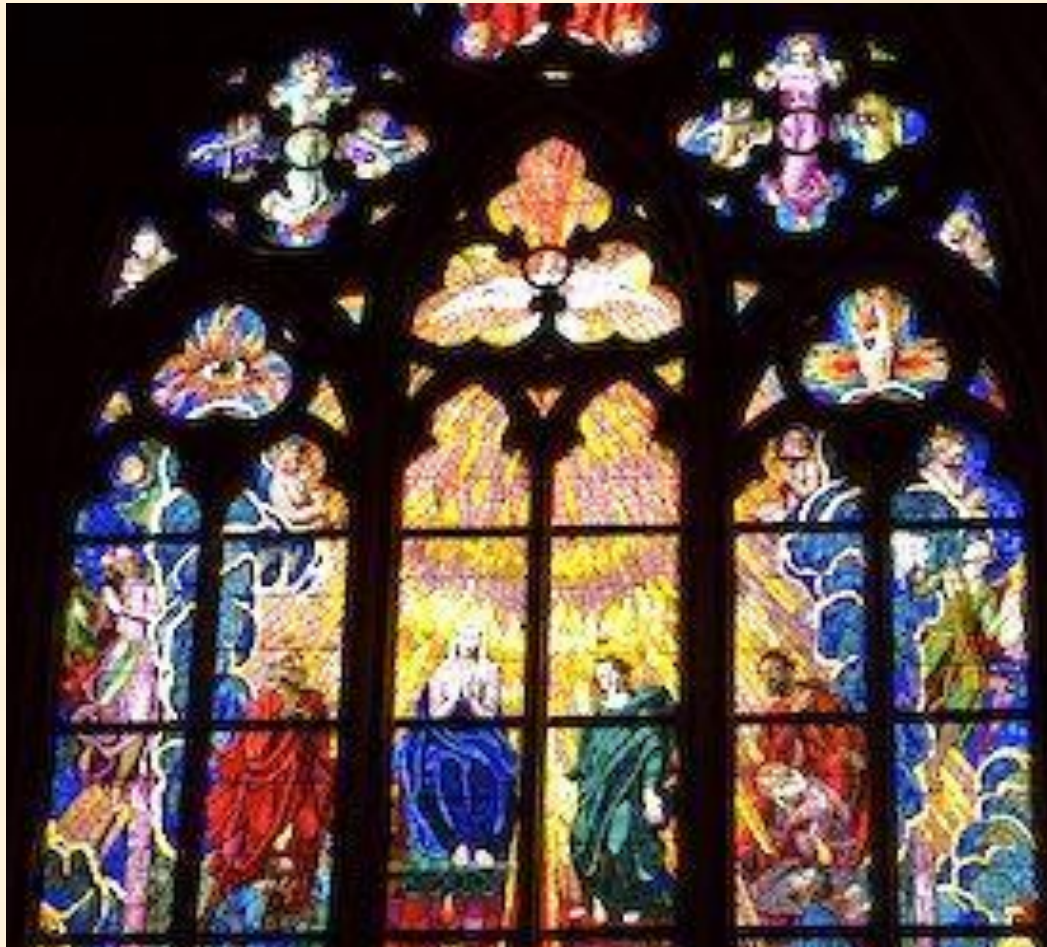


**“Кубок Ликурга”  
изготовлен  
римлянами  
В 4 веке н.э.**

**Кубок меняет цвет при освещении изнутри.**

**Этот эффект создают наночастицы золота и серебра  
размером порядка 70 нм..**

## Нанотехнологии в Средние века



Яркие витражи (начиная с 6-го века) создавались не с помощью красок, а с помощью наночастиц благородных металлов, обеспечивающих яркость и долговечность



# Дамасская сталь (около 1000 г н.э.)

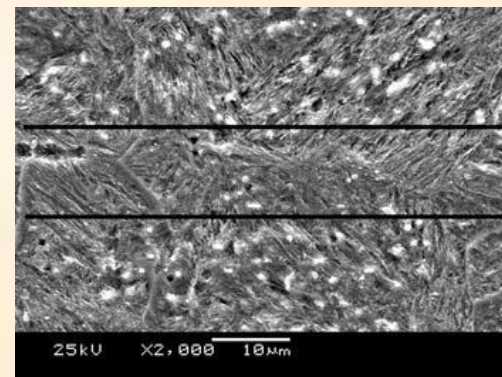
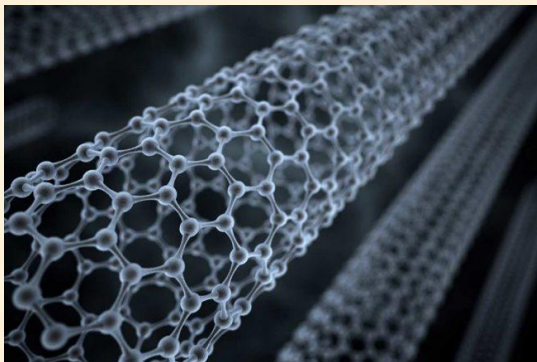
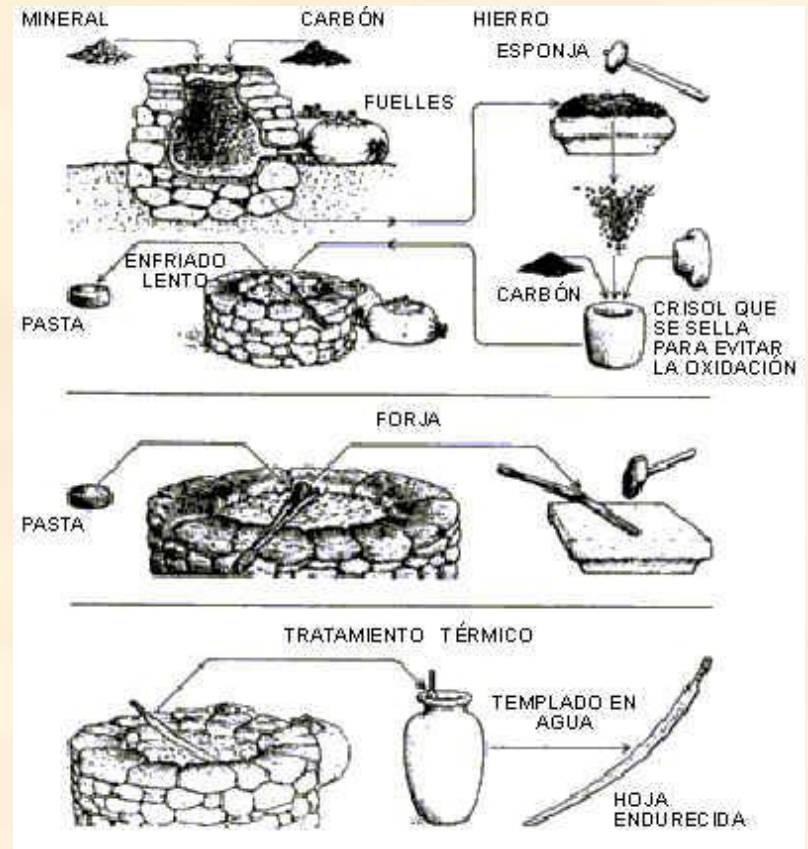


*Knifemaker - J. Nelson - J.O.*

*Image - Chuck Ward Photography*

**Дамасская сталь содержит  
углеродные нанотрубки**

Reibold M., et al. Nature **444** 286 (2006)



Picture 1

# Нанокolloиды

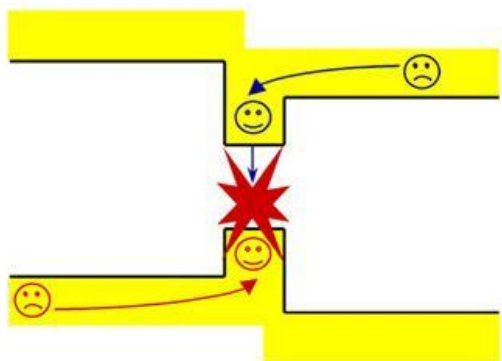


Все цвета радуги можно получить при рассеянии света нанокolloидами с различными размерами частиц.

Впервые обнаружил Майкл Фарадей в 1857 году.

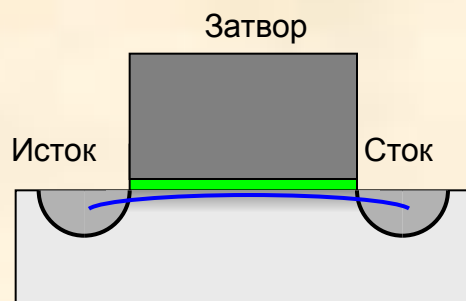
# Нанотехнологии в компьютере

Quantum Well Laser



Квантовый  
слой  
6 нм

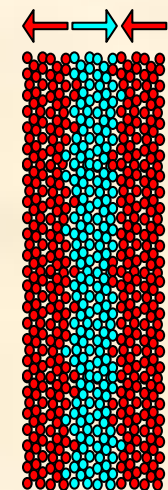
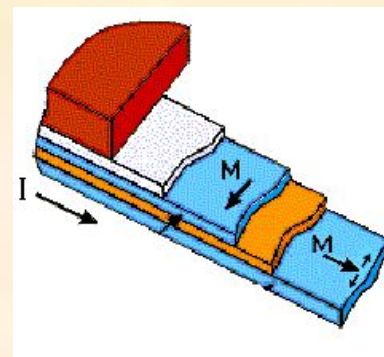
Транзистор



Оксидный  
слой  
4 нм

Жесткий диск

Сенсор  
Среда



Чувствительный  
слой  
5 нм

Магнитные  
зерна  
10 нм



# Биологические объекты

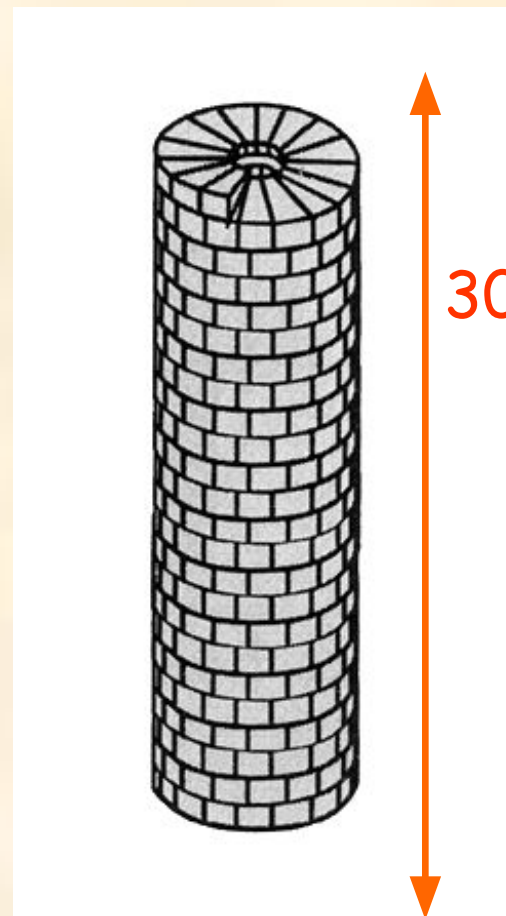
ДНК



3,4 нм

2 нм

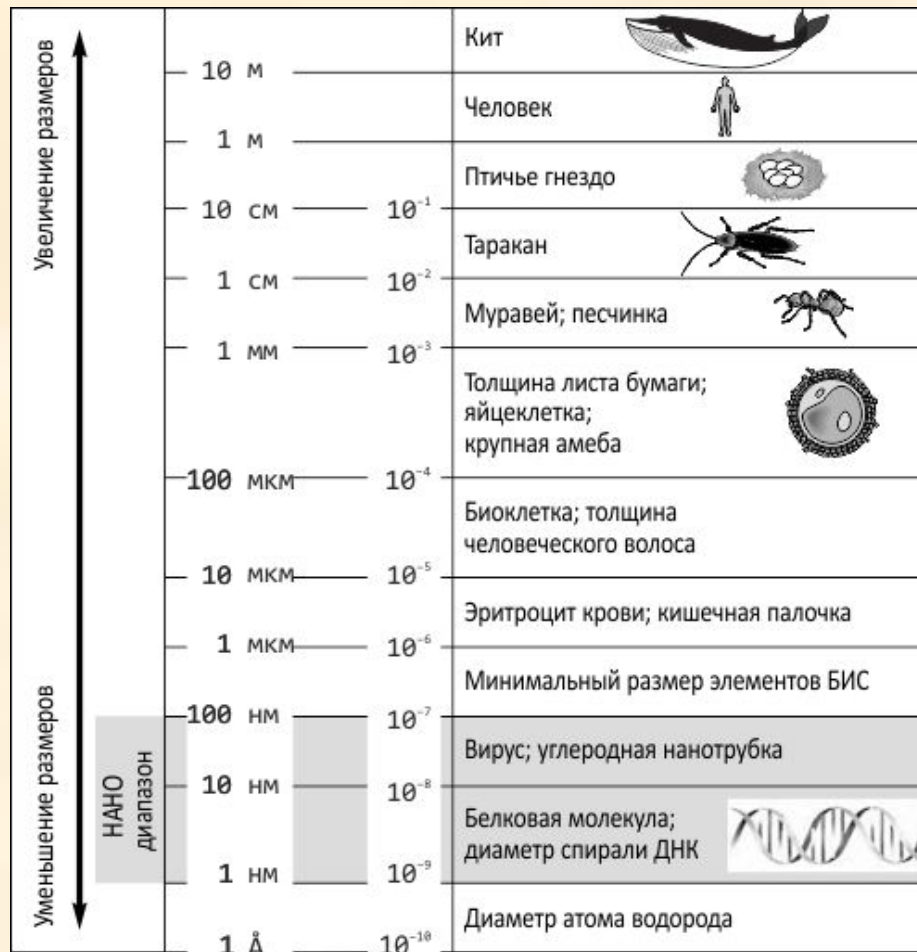
Вирус



300 нм

18 нм

## Нанообъекты в окружающем мире



Из книги Наоя Кобаяси «Введение в нанотехнологию»

Meters

$10^{27}$  — Universe (largest length)

$10^{25}$

Clusters of galaxies

$10^{20}$

Milky Way

$10^{15}$

Distances to nearby stars

Solar system

$10^{10}$

Sun

Earth

$10^5$

Tall mountain

Tall building

Human

1

$10^{-3}$  мм

$10^{-6}$  μм

$10^{-9}$  нм  
Typical atom

$10^{-15}$

Smallest nucleus

$10^{-20}$

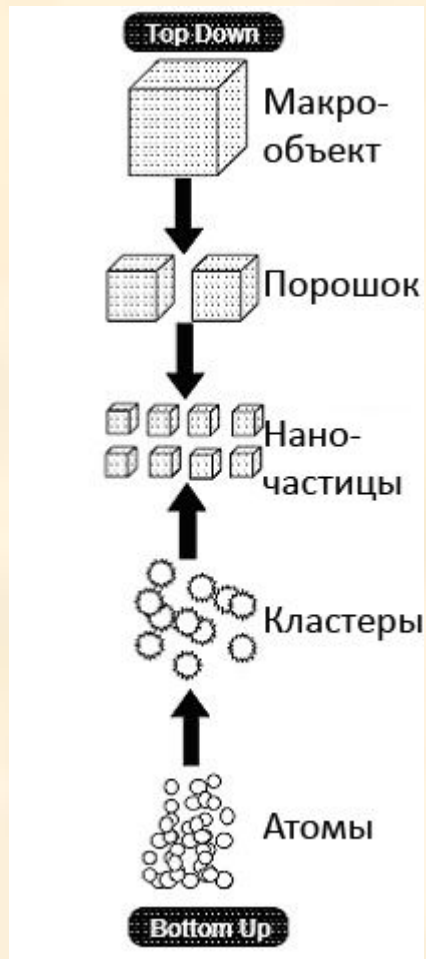
Smallest distance yet measured

$10^{-25}$

$10^{-35}$  — Planck Length (smallest length)

Солнце в миллиард раз больше  
чем человек, а нанометр в  
миллиард раз меньше, чем  
человек

## Схема построения наноструктур «сверху-вниз» и «снизу-вверх»



## Какие объекты могут считаться наноструктурами?

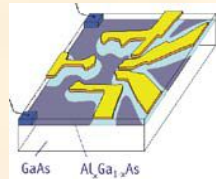
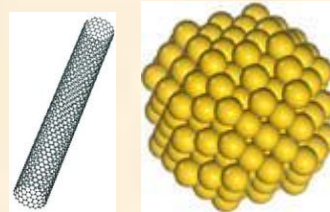
- ✓ Размер меньше 100 нм по одному измерению
- ✓ Появление новых свойств по сравнению с объёмными объектами, сделанными из того же материала
- ✓ Наличие квантовых эффектов
- ✓ Наличие коллективных эффектов
- ✓ Самоорганизация и самосборка

**Микро**

**Нано**

**Макро**

Ядра  
Атомы  
Малые  
молекулы



Жидкости  
Кристаллы  
Стекла

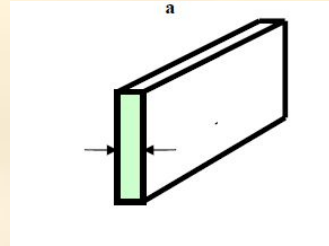


## Классификация наноструктур по размерности

Движение электронов ограничено в:

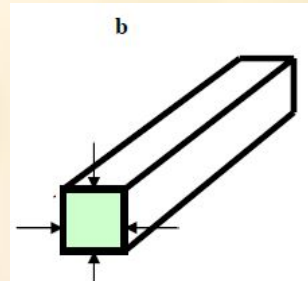
**1 направлении:** Квантовые ямы (Quantum well) и тонкие пленки

«Двумерные электроны»



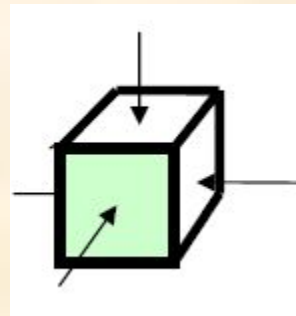
**2 направлениях:** Квантовые проволоки (Quantum wire)

«Одномерные электроны»



**3 направлениях:** Квантовые точки (Quantum dot)

«Нульмерные электроны»



Изображения (слева направо) квантовой нити, квантовой точки CdS в  $\text{SiO}_2$ , квантовой точки InAs в GaAs, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа

