

**курс лекций:**  
**Материалы**  
**нанотехнологий**

**лектор: Журавлева Г.Н.**

# Учебно-научная литература по проблемам наноматериалов и нанотехнологий

---

- Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007
- У. Хартманн. Очарование нанотехнологии. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008
- Э.Г.Раков. Нанотрубки и фуллерены. М.: Логос. 2006
- Г.Б.Сергеев. Нанохимия. М.: КДУ. 2007
- Р.А.Андриевский и др. Наноструктурные материалы. М.: АСАДЕМА. 2005
- А.В.Федотова и др. Нанотехнологии и их использование в упаковочной отрасли. М.: МГУПБ. 2008
- Мир материалов и технологий
- Нанотехнологии. Азбука для всех
- Бенда А.Ф. «Материалы нанотехнологий в полиграфии» часть 1, 2013 г, часть 2 и 3 2014г., часть 4 2015г. Введение в материалы нанотехнологий. Углеродные наноструктуры

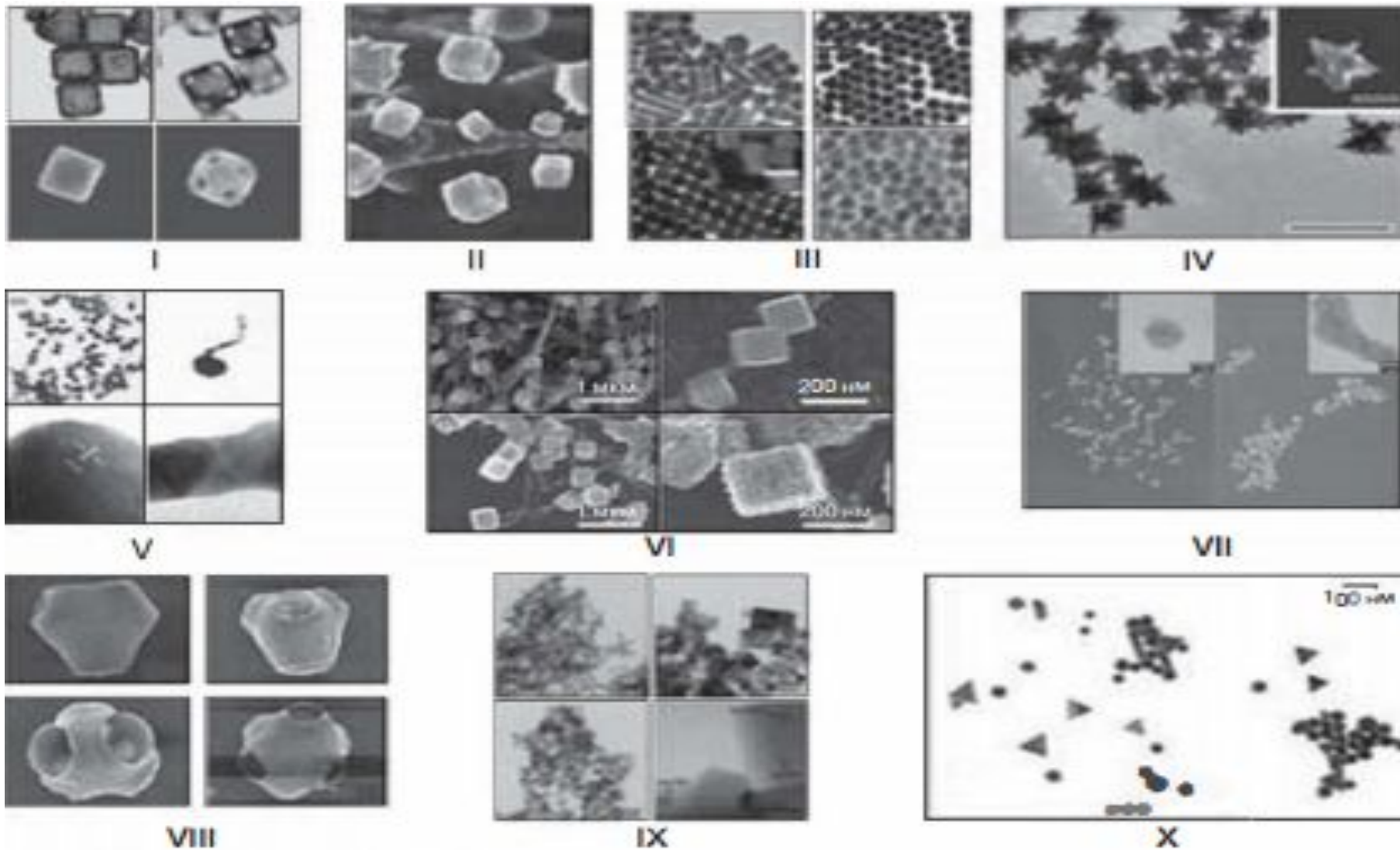
# Исторические предпосылки нанотехнологий

- Тот факт, что **мелкие частицы** различных веществ **обладают иными свойствами**, чем это же вещество с более крупными размерами частиц, был известен давно.
- Люди занимались нанотехнологиями и не догадывались об этом. Говорить о осознанном использовании таких технологий нельзя, поскольку секрет производства просто передавали из поколения в поколение, не вдаваясь в причины уникальных свойств, которые приобретают материалы.
- Одним из самых древних примеров **нанотехнологий** являются **цветные стекла, окрашенные наночастицами металлов**, технология была известна еще в Древнем Египте. Эта технология дожила до наших дней, войдя в основу окраски **кремлёвских звезд**. Рубиновое стекло представляет собой **наночастицы золота**, «распределённые» в высококачественном стекле.

# Исторические предпосылки нанотехнологий

- Наночастицы **золота** обладают каталитическими, оптическими ферромагнитными свойствами, способностью к самосборке. Они хорошо поглощают и рассеивают свет, нетоксичны, химически стабильны, биосовместимы, что делает их перспективными материалами для создания целого спектра устройств – от средств диагностики до различных сенсоров, устройств волоконистой оптики и компьютерных наносхем. Благодаря указанным свойствам наночастицы золота могут играть роль удобного, универсального модельного объекта для ознакомления с основными методами и понятиями науки о носителях.
- **Наночастицы золота** могут иметь **разнообразные формы**. Наиболее известны наносферы различного диаметра, но могут быть и другие многообразные несферические анизотропные нанообразования.

# Разнообразие форм



1 – наносферы, 11 – нанокоробки, 111 – наносферы, 1 – нанозвезды, 5 – наноголовастики; 6 – нанокоробки; 7 – наногексагоны; 8 – несферические nanoобразования; 9, 10 – нанотреугольники

# Исторические предпосылки нанотехнологий

- **Анизотропные наночастицы** отличаются своей удивительной способностью к самоорганизации (самосборке) – спонтанному и обратимому процессу образования организованных структур. Такая организация позволит создавать наноструктуры из отдельных атомов по типу технологии **«снизу-вверх»**.
- **Наночастицы серебра** размером до 10 нм способны не только адсорбироваться на клеточной мембране, но и проникать внутрь бактерии. Бактерицидное действие **серебра** связывают с образованием ионов  $Ag^+$  при окислении металла.  
**Особое значение имеет форма наночастиц.** Считается, что грань (111) в декаэдрах и икосаэдрах из которых состоит 98% наночастиц с размерами 1 – 10 нм, обладает высокой химической активностью, присутствие этой грани усиливает антибактериальное действие наночастиц.

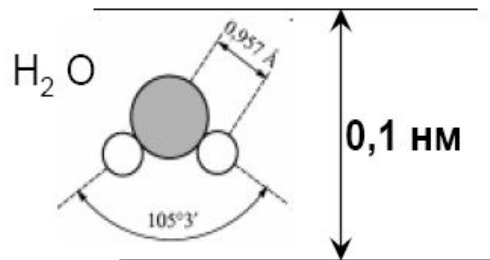
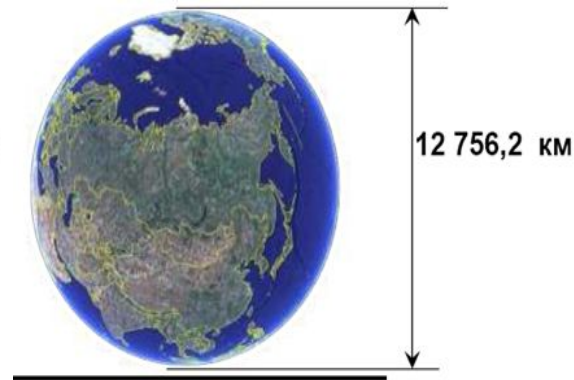
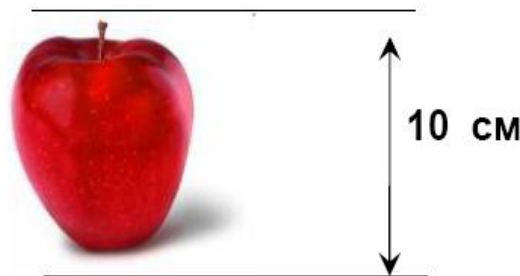
«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними - к нанотехнологиям.»

Ж.И. Алферов. «Микросистемная техника» №8, 2003, стр. 3 – 13

Линейный размер структурных единиц наноматериалов изменяется в пределах примерно от 1 до 1000 атомных (молекулярных) слоев.

Объем – от 10 до  $10^6$  атомов (молекул).

$$\frac{1 \text{ метр}}{1 \text{ нанометр}} = 10^9 =$$



# Основные понятия и терминология

- **Нано** – перевод с греческого – карлик
- **Нано** – одна миллиардная часть =  $10^{-9}$   
в данном курсе как правило будет применяться по отношению к единице длины:  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$
- На отрезке длиной в 1 нм можно расположить 8 атомов кислорода.

## Нанообъекты



**1 ÷ 100 нм**

**3D** - кластеры,  
компози́ты

**2D** - пленки

**1D** - стержни,  
провода́ки, трубки

**Отдельные  
атомы**

• Размерность  
нанообъектов

**0D** – точки, частицы, кластеры молекул

**Мезообъекты  
(субмикро)**

**0.1 мкм ÷ 1 мкм**

**Микрообъекты**

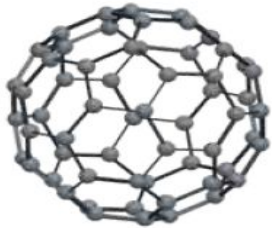
**1 мкм ÷ 100 мкм**

**Макрообъекты**

**> 0.1 мм**



**0d**

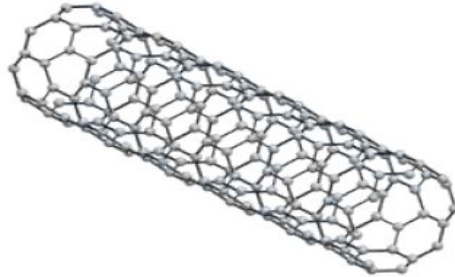


**Фуллерены**

*Robert F. Curl  
Harold W. Kroto  
Richard E Smalley  
1985  
Nobel prize 1996*

Нанопорошки,  
нанокристаллы,  
квантовые точки

**1d**

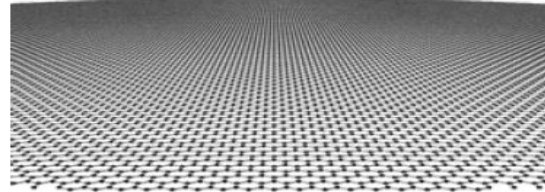


**Углеродные  
Нанотрубки**

*Multi-wall 1991  
Single-wall 1993*

Нанотрубки,  
нановолокна,  
наноагрегаты и  
нанопроволоки

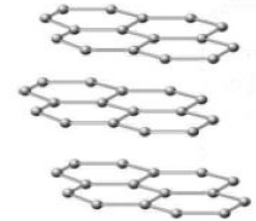
**2d**



**Графен**

Пленки и покрытия,  
нанопечатная  
литография,  
самособирающиеся  
слои

**3d**



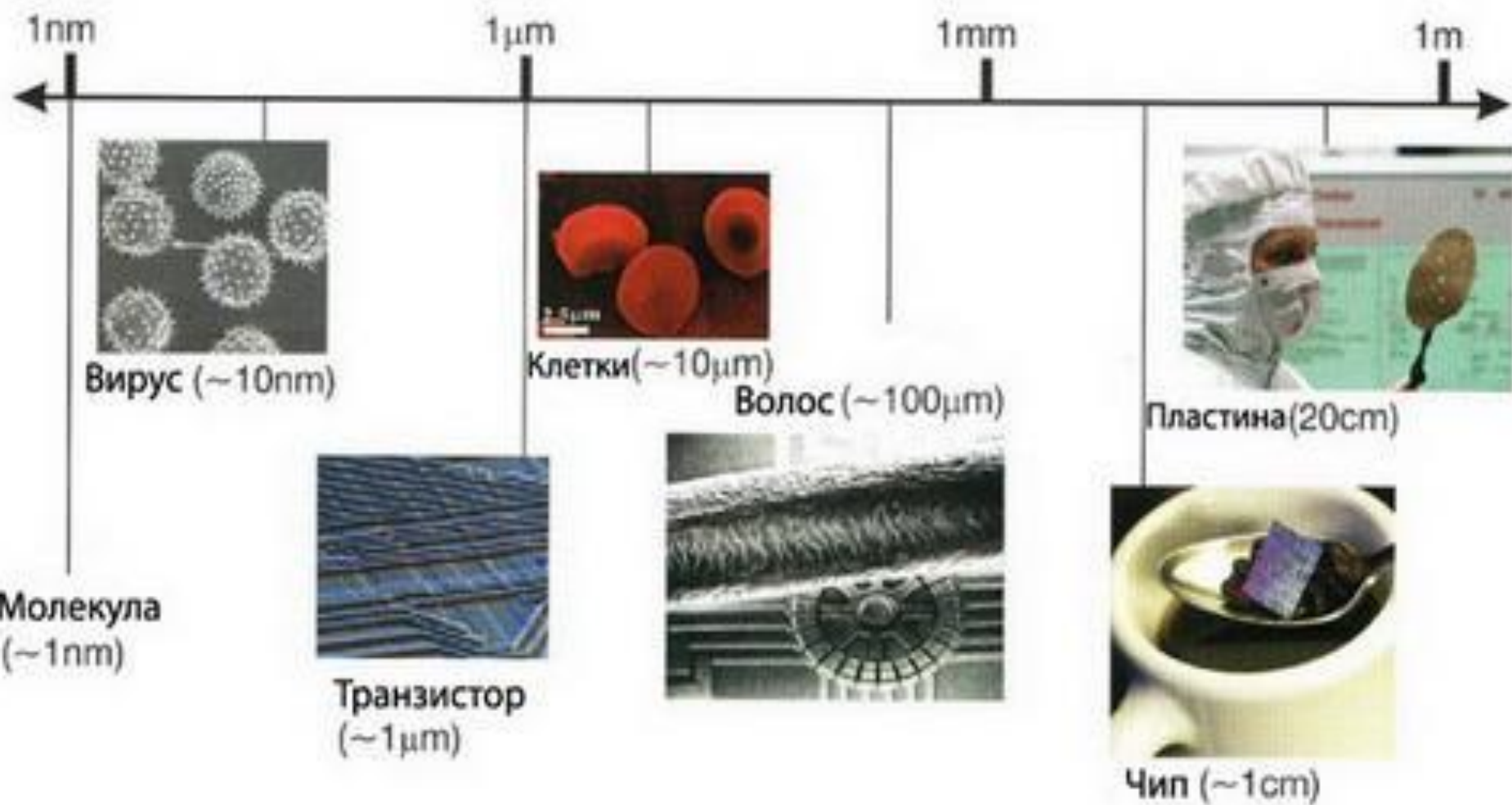
**Графит**

*1564  
Manchester*

Металлы и  
сплавы с  
ультрамелко-  
зернистой  
структурой,  
нанокерамика

**Наноконкомпозиты:** структурированные наночастицы в металлической или полимерной матрице

**Супрамолекулярные структуры:** ансамбли сложных молекул



Нанотехнологии  
(1nm - 1µm)

Большинство MEMS  
(100nm - 1mm)



Источник: Prismark

# Наноматериалы

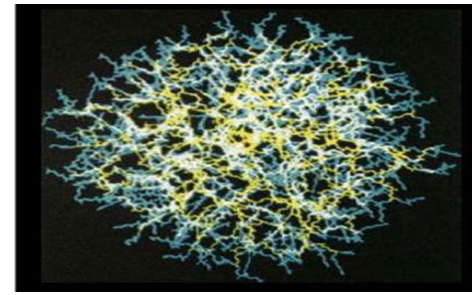
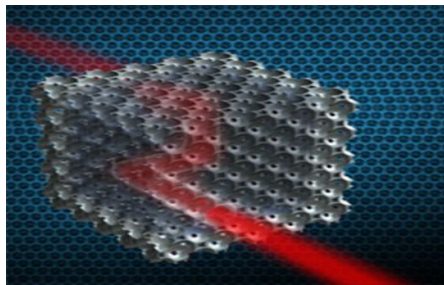
вещества и композиции веществ (органические, неорганические, биологические),

представляющие собой **искусственно или естественно упорядоченную или неупорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими размерами** (часто по одному из измерений)

и особым проявлением физических и (или) химических взаимодействий, обеспечивающих возникновение у материалов и систем совокупности

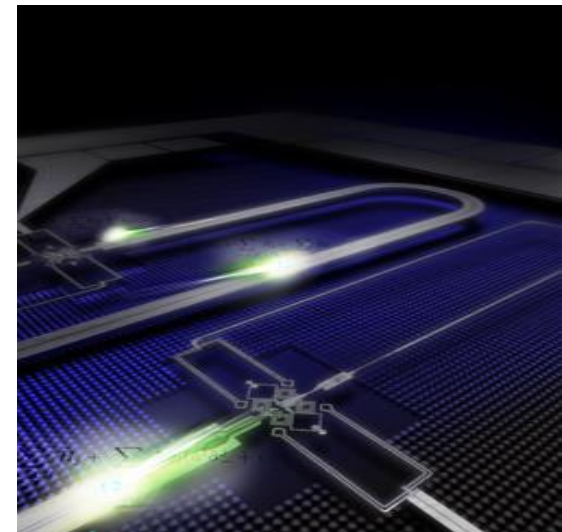
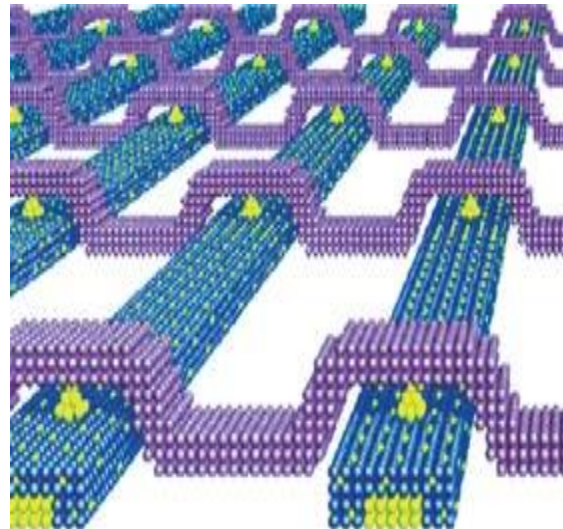
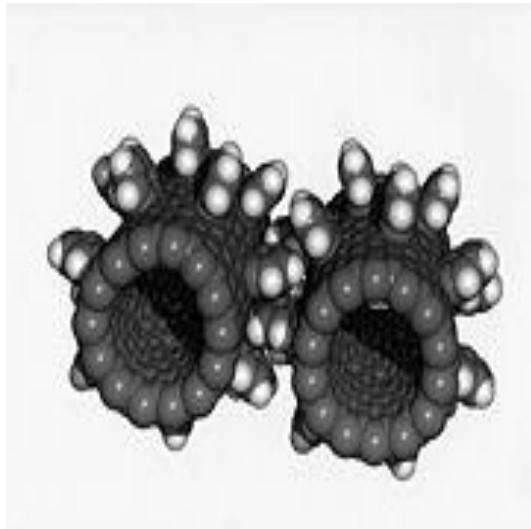
- **механических,**
- **химических,**
- **электрофизических,**
- **оптических,**
- **теплофизических и других свойств,**

не характерных для **объемных структур** такого же состава.



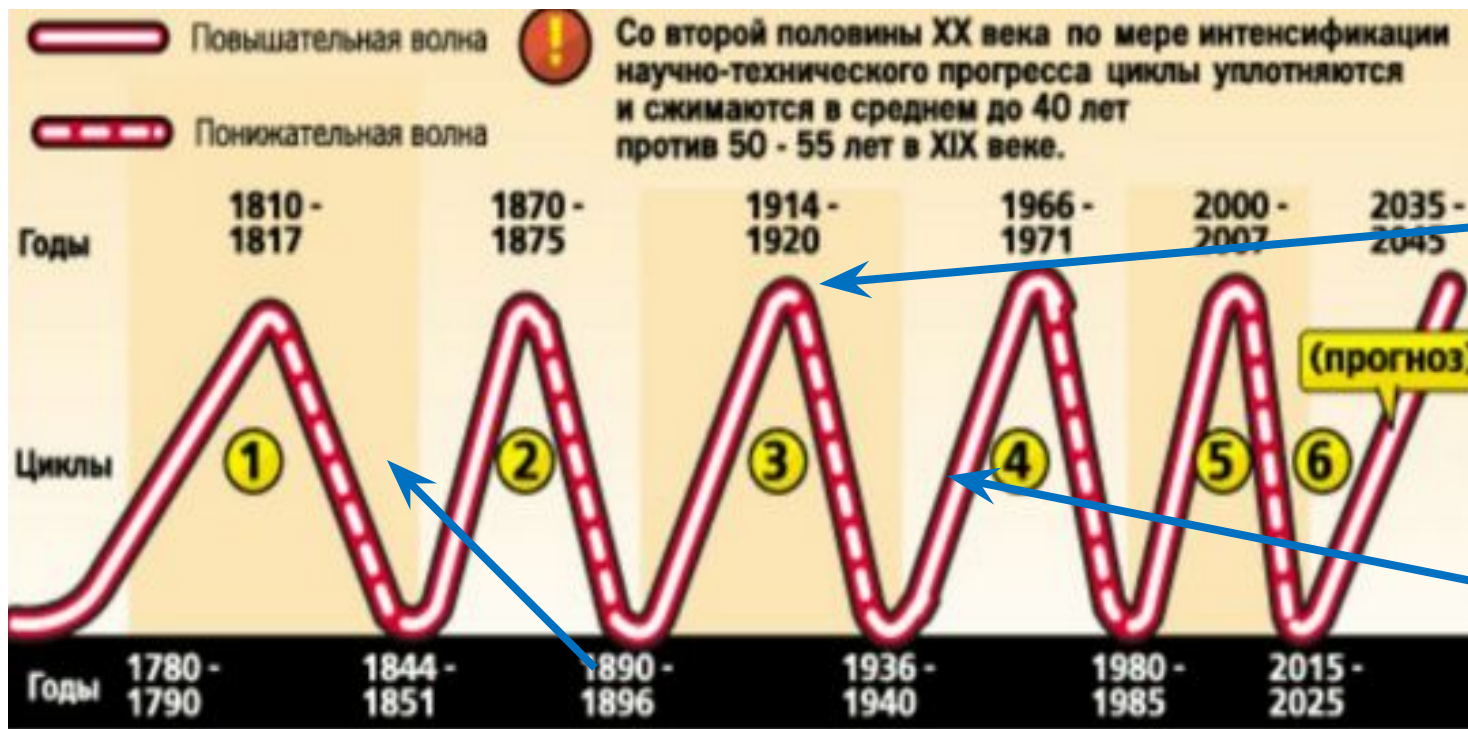
# Основные понятия и терминология

- **Нанонаука** — *система знаний* о свойствах вещества в нанометровом масштабе
- **Нанотехнологией** называется *междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров* с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами.





# Кондратьевские циклы



революции

NBIC

Технические изобретения

Текстиль  
уголь

депрессия  
кризисы

Металлургия  
Паровой двигатель

Автомобили  
Химическая промышленность  
нефть

Электроника  
Лазеры  
телекоммуникации

Тяжелое машиностроение  
электроэнергия

# Терминология

- **Наноинженерия** – поиск эффективных методов применения наноматериалов
- **Наноструктурированные и наноконсолидированные материалы** – материалы с микро- и макроскопическими размерами, построенные (структурированные) из отдельных нанообъектов – нанокерамика, нанопористые материалы и др.
- **Нанотехнология** – совокупность методов, позволяющих целенаправленно создавать нанообъекты с заранее заданными составом, размерами и структурой.
- Выделяют **нанотехнологии** трех направлений:
  - «мокрая»,
  - «сухая»
  - компьютерная.

# Основные понятия и терминология

**«Мокрая» нанотехнология** изучает биологические системы, которые существуют предпочтительно в водной среде и включают генетический материал, мембраны, ферменты (биокатализаторы) и другие компоненты клеток.

- **«Сухая» нанотехнология** сосредоточена на получении структур из углерода, кремния, различных металлов и из неорганических материалов (например, нанотрубки). Конечная цель – создание функциональных устройств, обладающих такой же способностью к самосборке, как и «мокрые» структуры, но без опоры на эволюцию.
- **Компьютерная нанотехнология** позволяет моделировать сложные молекулы и системы, вычислять их относительную устойчивость и предсказывать поведение. Моделирование и расчеты позволяют резко – до нескольких десятилетий – **сократить** период создания нанообъектов и финансовые затраты.

# Основные понятия и терминология

- **Нанообъекты** — многочастичные системы, основу которых составляют индивидуальные наночастицы. Употребляют равнозначные термины: «нанокристалл», «наносистема», «наноструктура», «нанофаза», «нанокомпозиты».
- Основу всех названных объектов составляют индивидуальные, **изолированные наночастицы**.
- **Объектами нанотехнологии** могут быть:
  - фуллерены,
  - нанотрубки,
  - атомные и молекулярные кластеры,
  - нанокомпозиты,
  - микропористые материалы,
  - фотонные кристаллы,
  - тонкие пленки и поверхностные слои,
  - микроэмульсии,
  - жидкие кристаллы,
  - ультрадисперсные порошки,
  - биомембраны и т.д.



# Характеристики наноразмерных объектов

- **Размер по одному из измерений  $< 100$  нм**
- **Новые свойства по сравнению с объемным телом**
- **Высокая реакционная способность**
- **Квантовые и туннельные эффекты**
- **Самоорганизация и самосборка**
- **Специфическое взаимодействие с живыми системами**

# Сканирующий оптический микроскоп

- Е

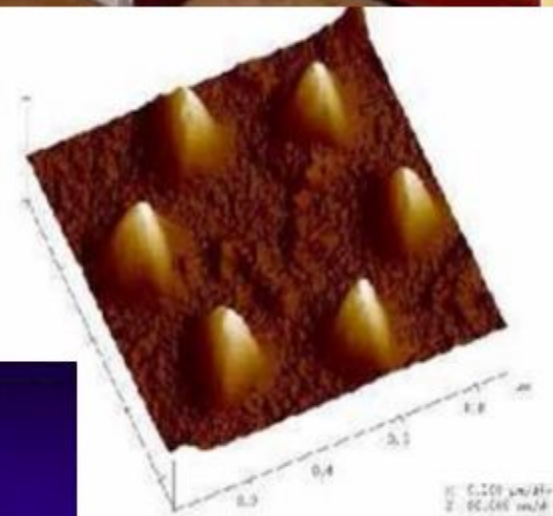


# Важнейшие причины нанобума

- Появление принципиально новых методов диагностики *наноразмерных* объектов (современная электронная микроскопия, туннельная и атомно-силовая микроскопии)
- Осознание того, что наноматериалы обладают специфическими магнитными, электрическими, оптическими и др. свойствами, связанными с проявлением квантовых эффектов

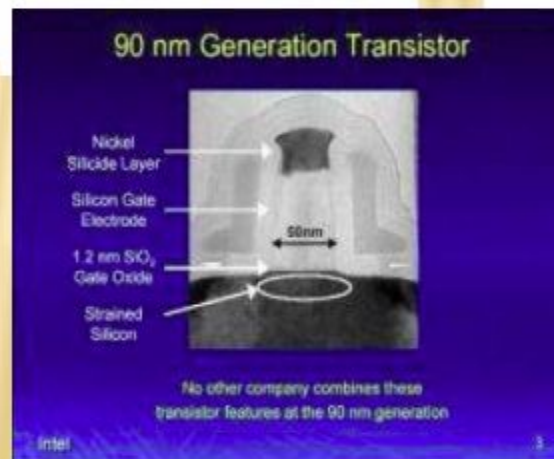


Свойства наночастиц зависят от их размера. Появляется возможность управлять свойствами материала, создавать новые материалы, изменяя размеры и форму составляющих частиц



Открыт путь к миниатюризации технических устройств и огромной экономии ресурсов

К 2010г. фирмой Интел освоено производство транзисторов размером 46нм. Это тот фундаментальный предел, за которым в полной мере начинают проявляться квантовые эффекты.



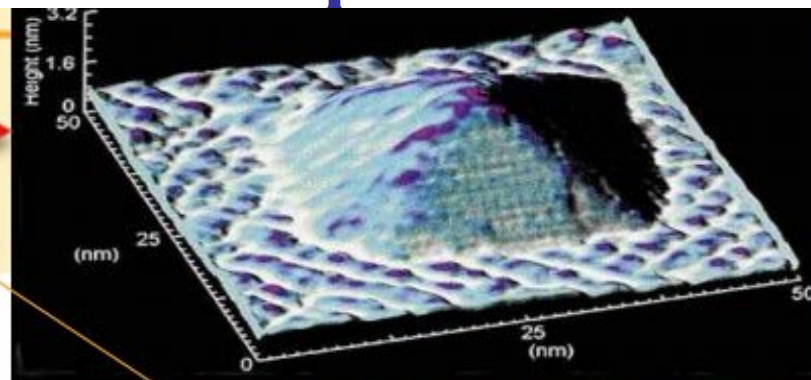
$10^9$  элементов  
на одном чипе!



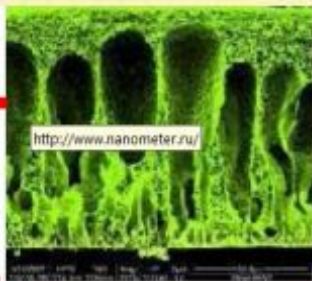


# Искусственные наноматериалы

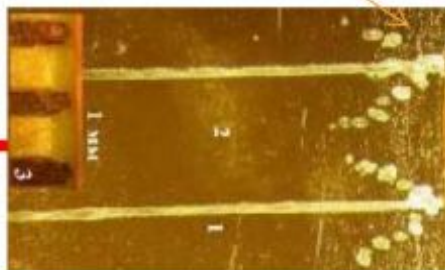
Изображение квантовой точки, состоящей из 15 атомных слоев



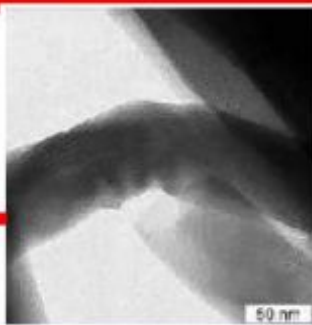
• Объемные (3D) наноструктурированные материалы: металлы и сплавы с ультрамикрзернистой структурой, нанокерамика



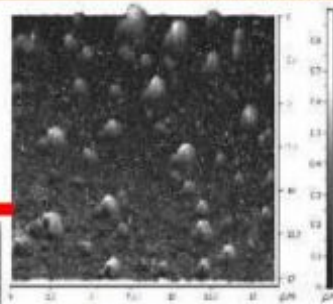
• Наноструктурированные планарные материалы 2D: пленки и покрытия, нанопечатная литография, самособирающиеся монослои



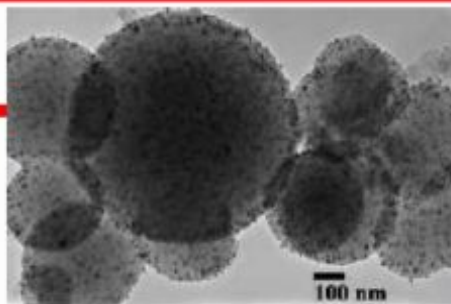
• Наноструктурированные (1D) материалы: нанотрубки, нановолокна, наноагрегаты и нанопроволоки



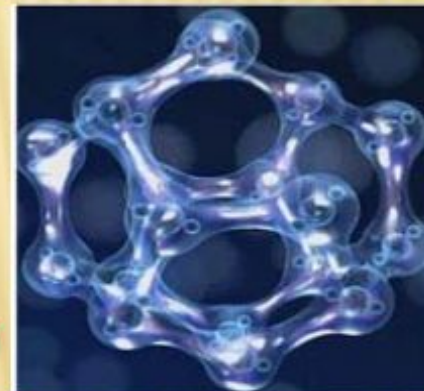
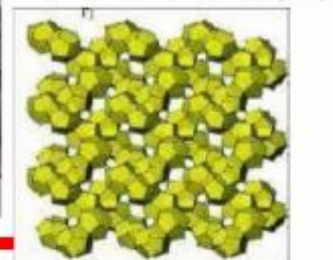
• Нанодисперсные (0D) материалы: нанопорошки, нанокристаллы, квантовые точки



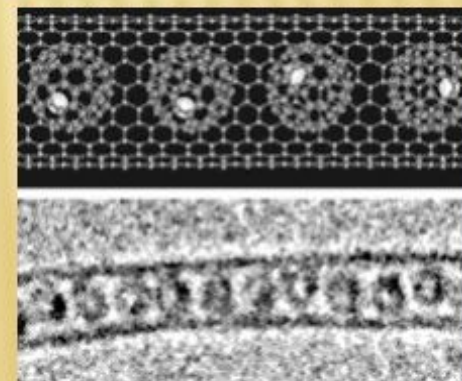
• Нанокompозиты: наноструктурированные наночастицы в керамической, металлической или полимерной матрице



• Супрамолекулярные материалы

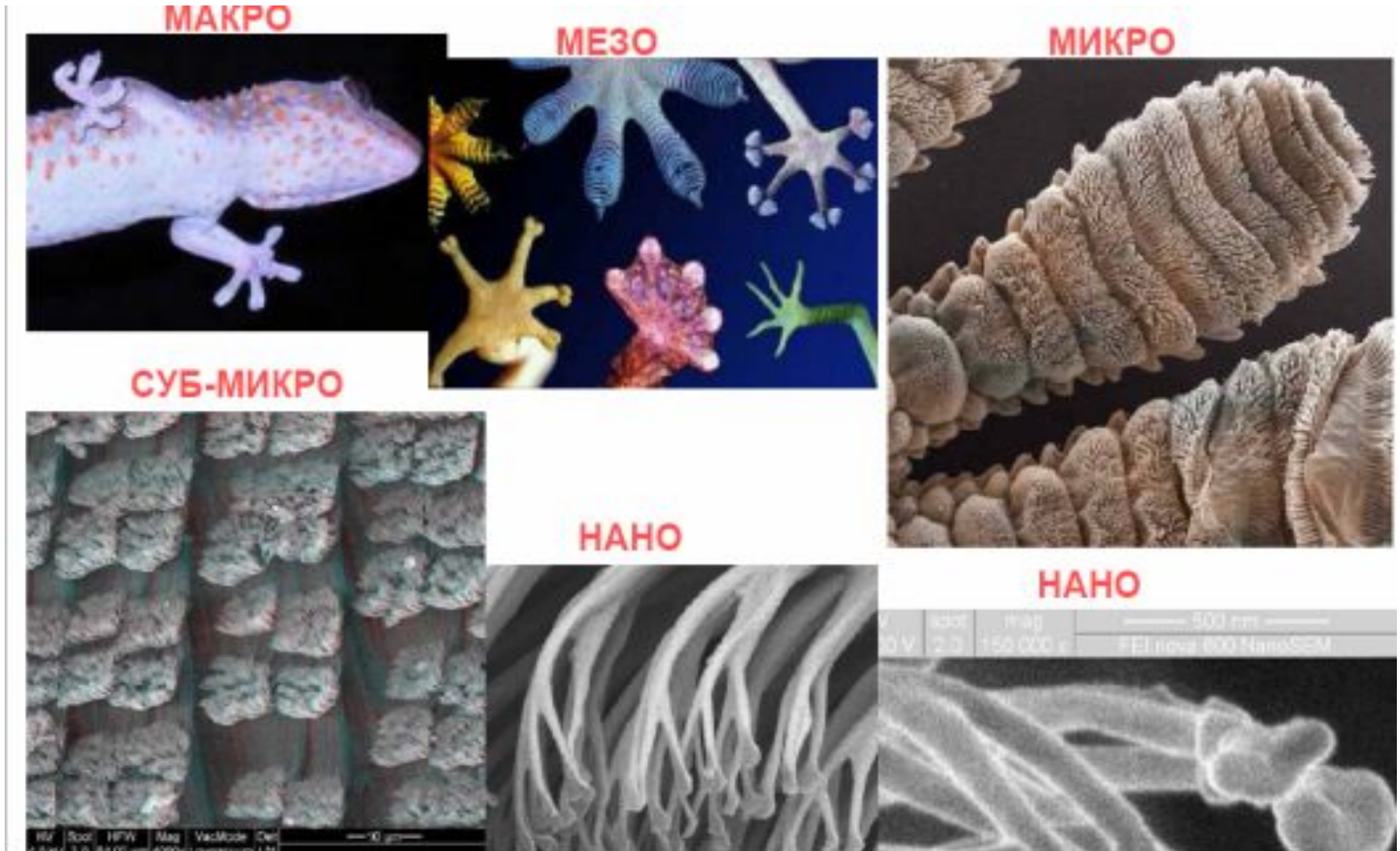


Фуллерены и нанотрубки



# Нанообъекты в природе

- Строение лап геккона

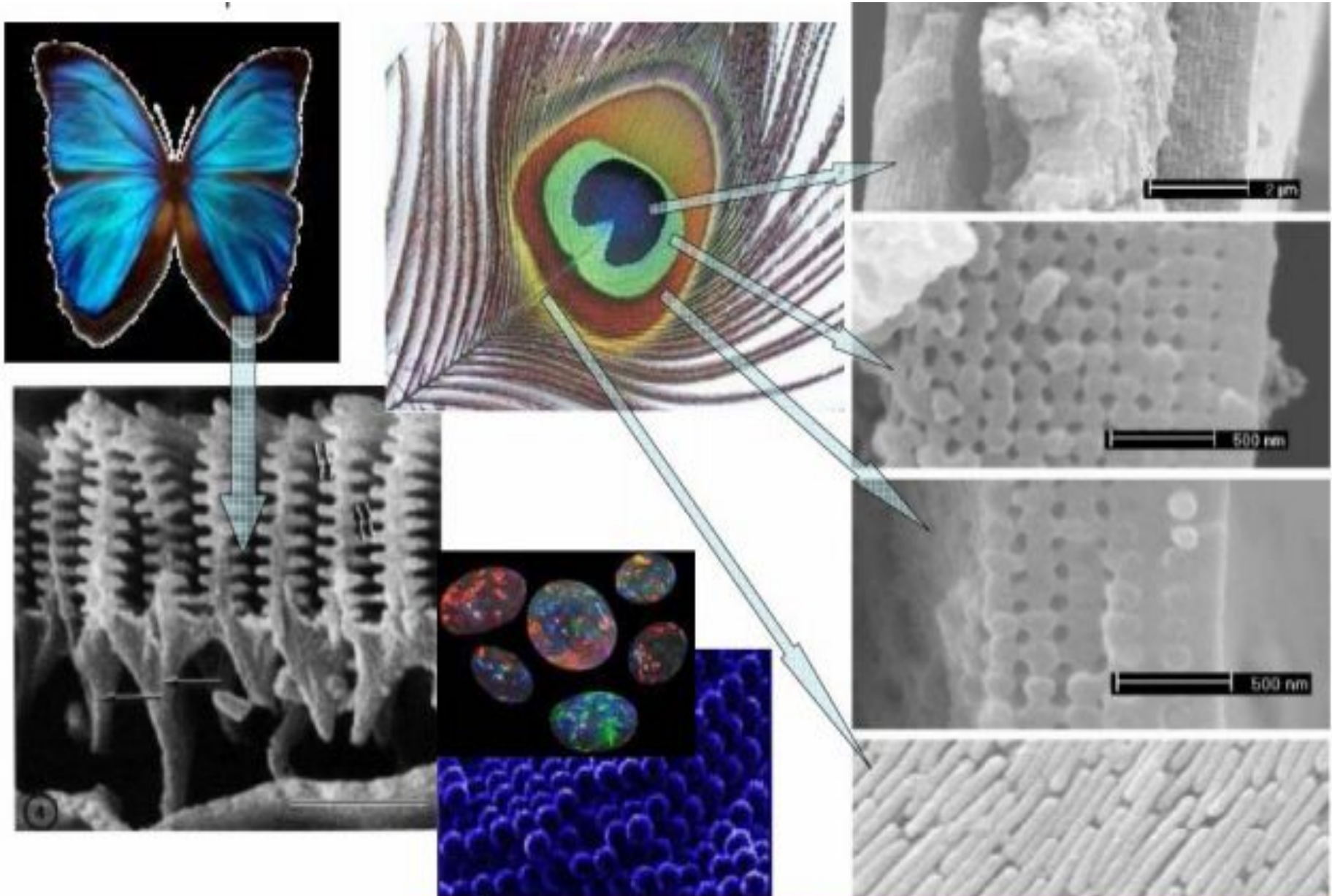


([K. Autumn, et al. *American Scientist*, 2006, 124] )



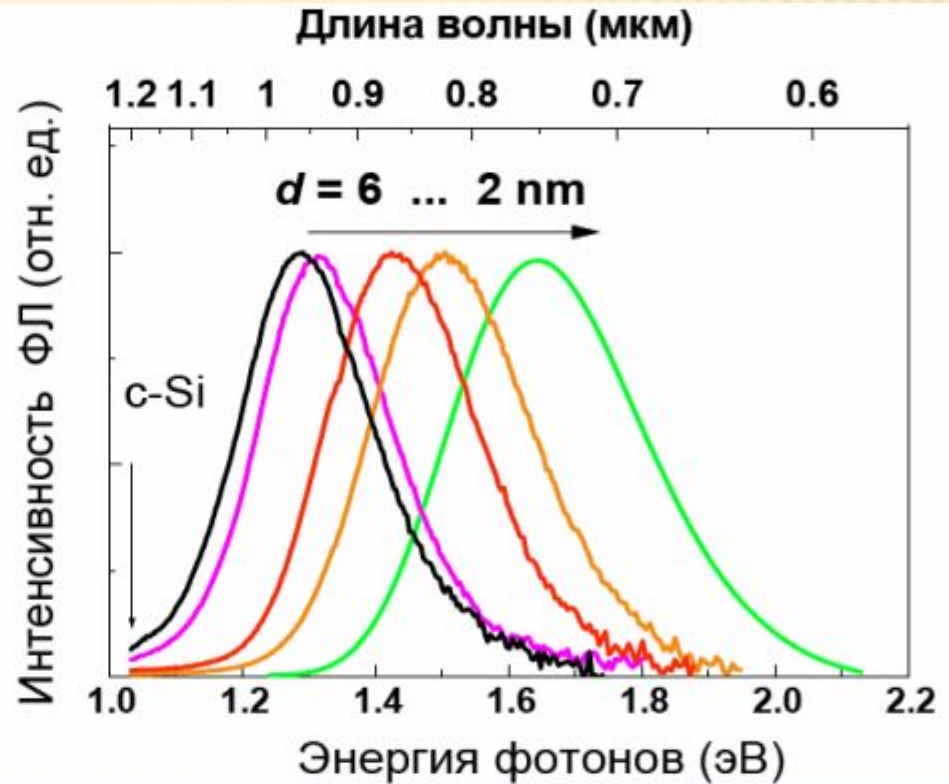
# Нанообъекты в природе

- Строение крыла бабочки



# Физические основы нанотехнологий

Уникальные свойства наноматериалов определяются квантово-размерными эффектами. Начиная с некоторого размера, на свойствах вещества начинают сказываться квантовые эффекты. Проявление этих эффектов зависит от размеров системы.



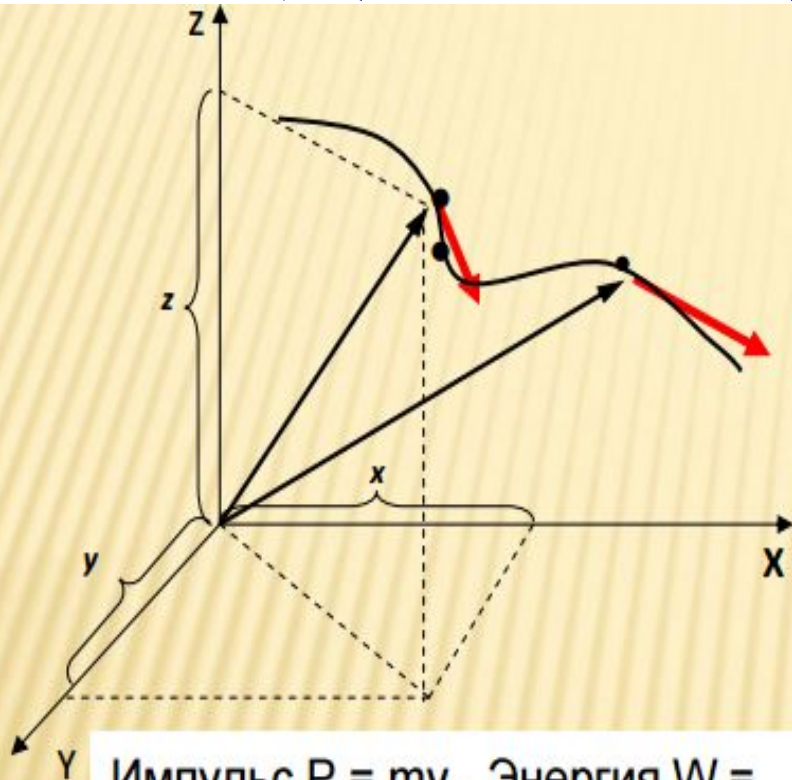
С уменьшением размеров нанокристаллов Si спектр их люминесценции сдвигается в коротковолновую область

← Образцы наноструктурированного кремния



# Описание движения в классической механике

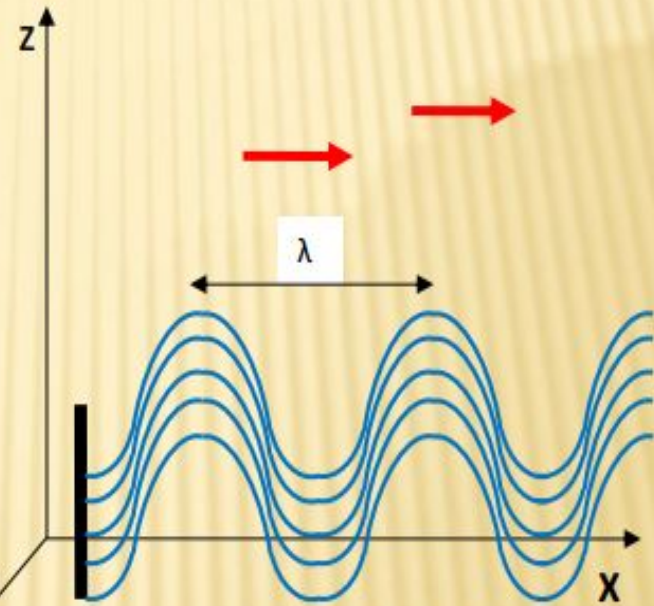
## • ЧАСТИЦА (движение точки)



Импульс  $P = mv$ , Энергия  $W = mv^2/2$

Зная уравнения движения  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ , в любой момент времени, в каждой точке траектории можно определить значение координат, импульса и энергии частицы.

## ВОЛНА (модель волны)



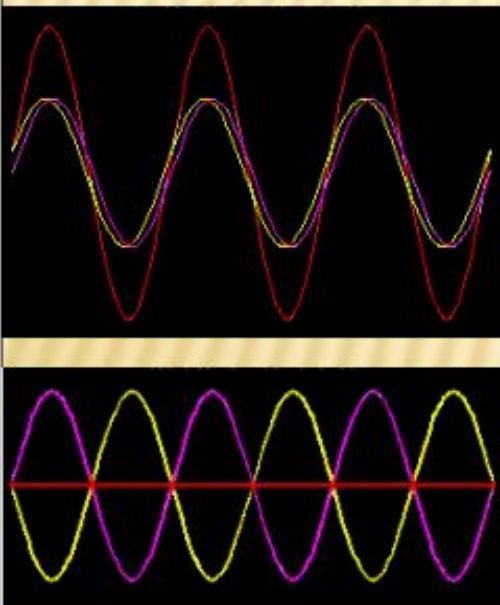
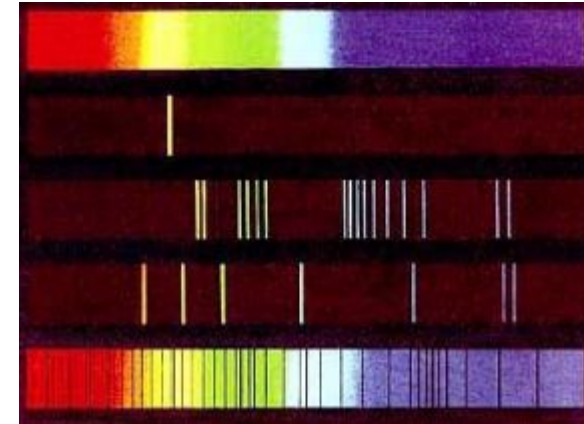
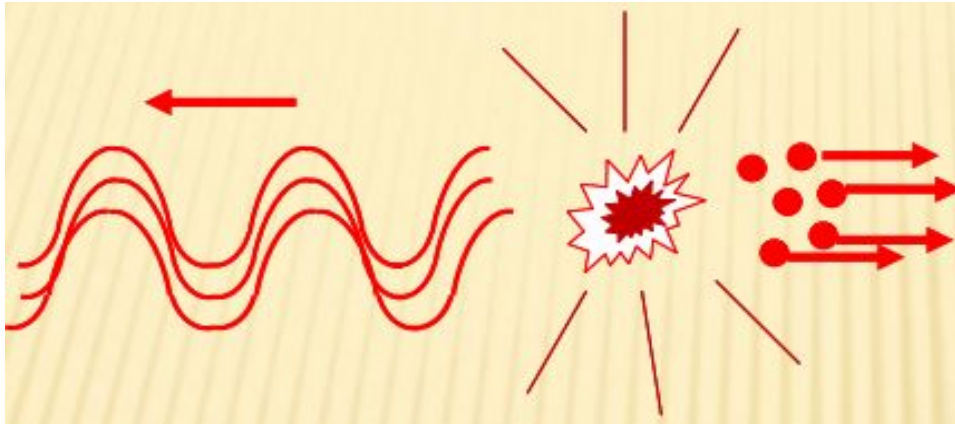
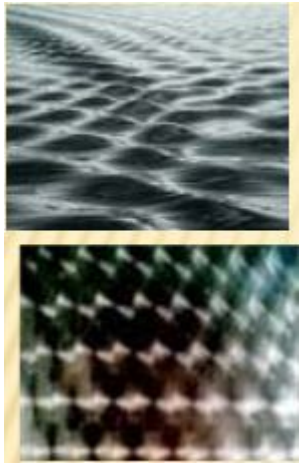
Длина волны  $\lambda = v T$

Уравнение волны  $y(x,t) = A \sin(\omega t - x/v)$  описывает распространение колебаний в пространстве. В любой момент времени каждая точка волны движется по-своему, энергия волны распределена по всему пространству, занятому волной.



# Корпускулярно-волновой дуализм света

## Модель света



Доказательства  
волновой  
природы:

Интерференция

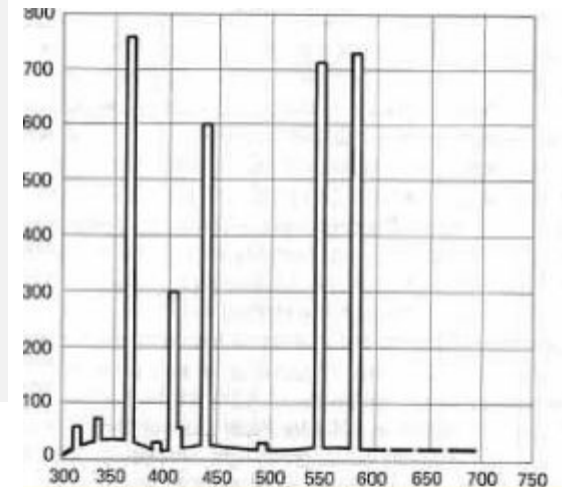
Дифракция

Поляризация

Дисперсия

Доказательства  
корпускулярной  
природы

Линейные  
спектры  
излучения и  
поглощения  
Фотоэффект



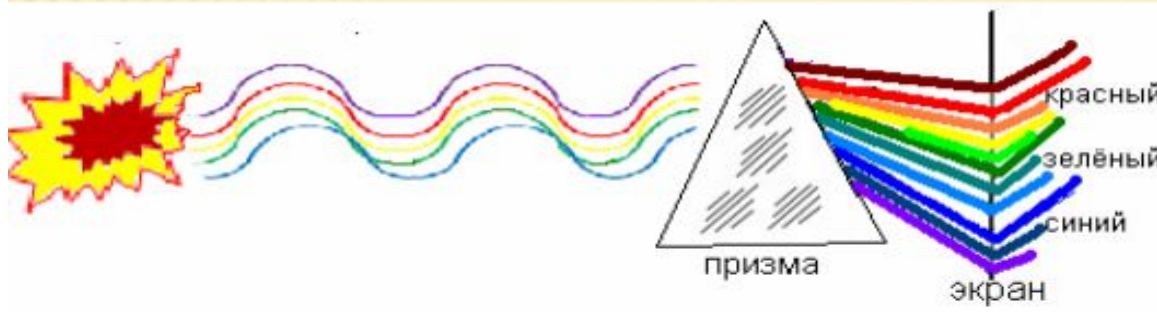
# Световые кванты ( $E = h\nu$ )

## Эмпирическая формула

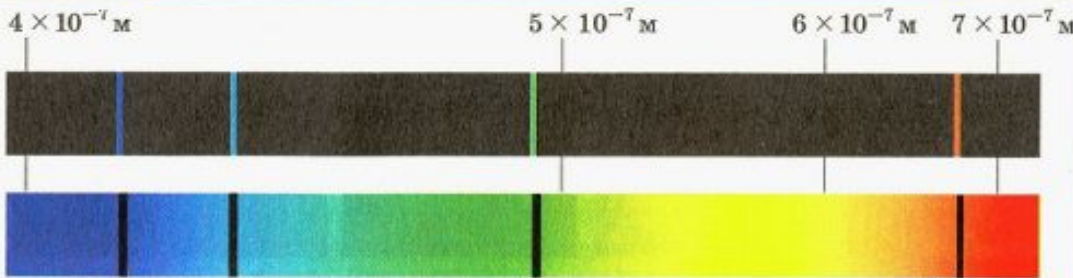
Ридберга

$$\nu_{nm} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Постоянная Ридберга  
 $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$



## Спектры атомарного водорода



← Спектр излучения

← Спектр поглощения

Гипотеза М. Планка: Тела излучают энергию света порциями - квантами. Энергия каждой порции

строго определена и вычисляется по формуле:  **$E = h\nu$** ,

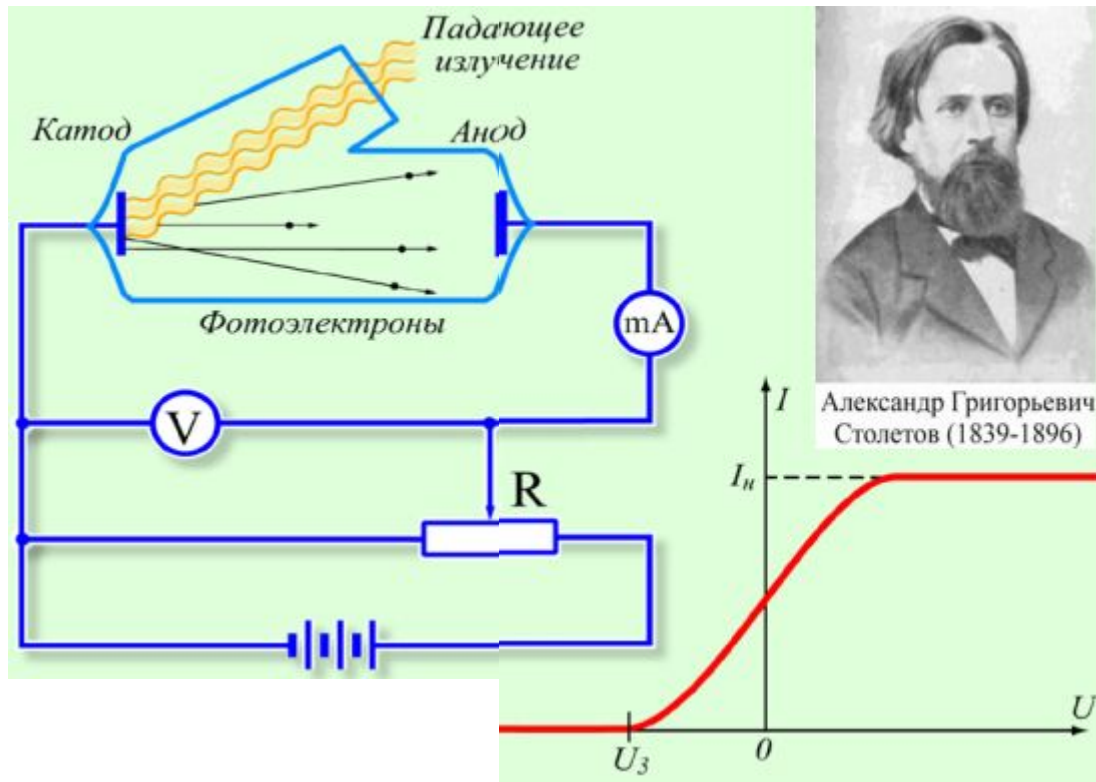
где  **$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$**  – квант действия или **постоянная Планка**

«... кроме атомистической структуры материи существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной  $h$ , введенной Планком. Это открытие стало основой всех исследований в физике XX века с тех пор почти полностью обусловило ее развитие»

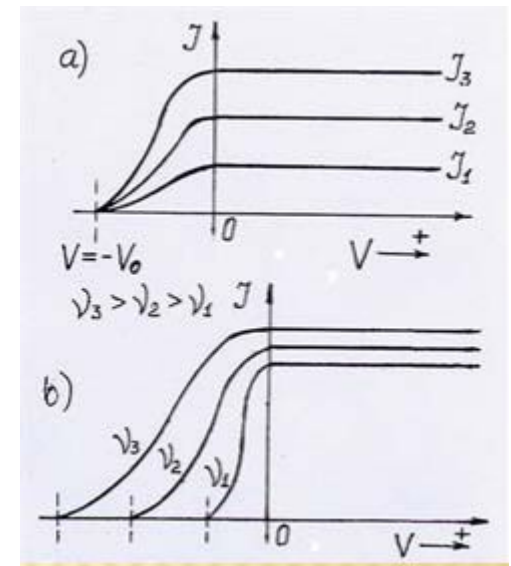
А. Эйнштейн



# Фотоэффект



Александр Григорьевич Столетов (1839-1896)



## Законы Столетова:

1. Чем больше интенсивность падающего света, тем больше ток насыщения  $I_n$ .
2. Запирающее напряжение  $U_3$ , определяемое максимальной кинетической энергией  $\max W_k$  электронов, не зависит от силы света, но зависит от его цвета (частоты).
3. Есть «красная граница» фотоэффекта: предельная частота излучения, ниже которой фотоэффект не происходит.

Излучение падает на катод и выбивает из него электроны, которые под действием электрического поля летят к аноду, образуя ток в цепи (фототок). Ток насыщения  $I_n$  – максимальное значение фототока. Запирающее напряжение  $U_3$  – значение отрицательного анодного напряжения, при котором фототок прекращается.

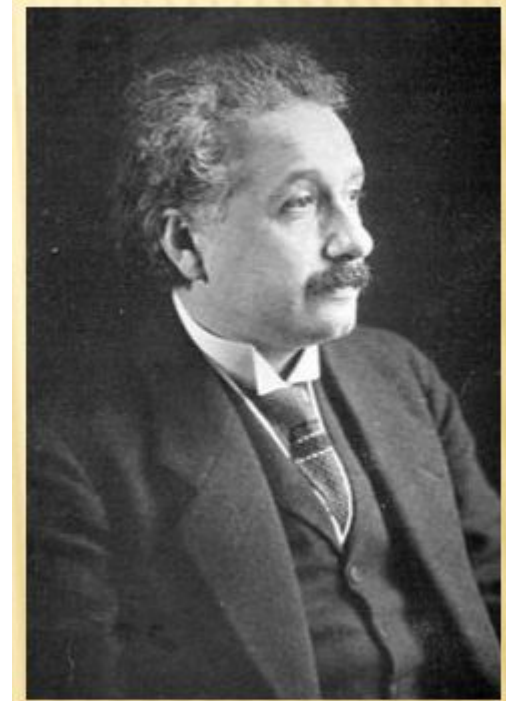
$eU_3 = \max W_k = mv^2/2$ , где  $e$  – заряд электрона,  $\max W_k$  – его кинетическая энергия,  $m$  – масса электрона,  $v$  – его скорость

# Квантовая теория фотоэффекта

- А. Эйнштейн, нобелевская премия 1921 г.

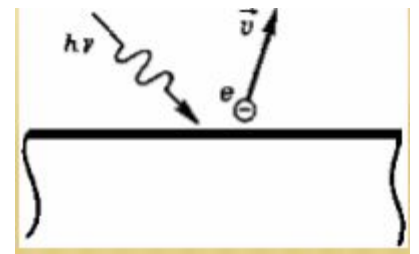
Уравнение фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$



А.Эйнштейн, 1879- 1955

Энергия одного кванта света  $h\nu$  расходуется на совершение работы по выходу электрона из металла  $A_{\text{вых}}$ , оставшаяся часть энергии кванта определяет кинетическую энергию вышедшего электрона  $W_k = mv^2/2$ . Чем больше квантов в потоке света, тем выше его интенсивность  $\rightarrow$  тем больше электронов выбивается из металла (первый закон Столетова). Чем выше частота излучения, тем больше энергия одного кванта  $\rightarrow$  тем больше кинетическая энергия вышедшего электрона (второй закон Столетова). Если частота излучения низка настолько, что энергия одного кванта  $h\nu$  меньше работы выхода  $A_{\text{вых}}$ , электрон не может выйти из металла  $\rightarrow$  фотоэффекта не происходит (третий закон Столетова, «красная граница фотоэффекта»).



Минимальное значение частоты определяется из условия

- $mv^2/2 = 0$ , или  $h\nu_{\text{min}} = A$ ; откуда  $\nu_{\text{min}} = h/A$



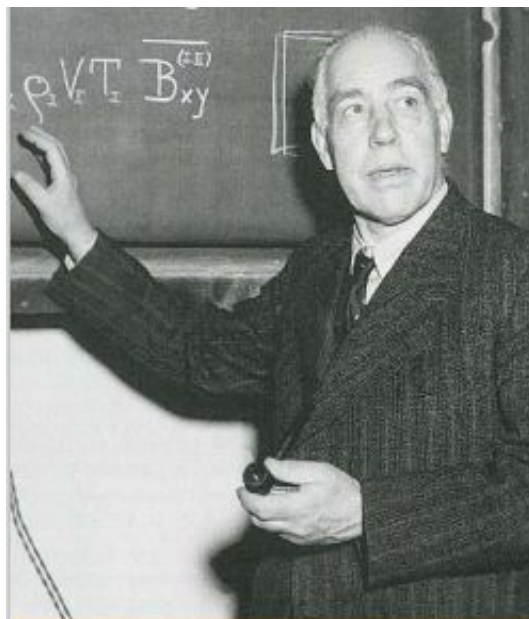
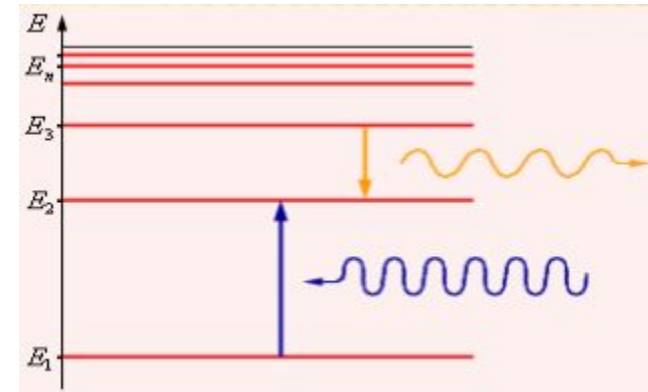
# Модель атома водорода

Квантовые постулаты Бора:

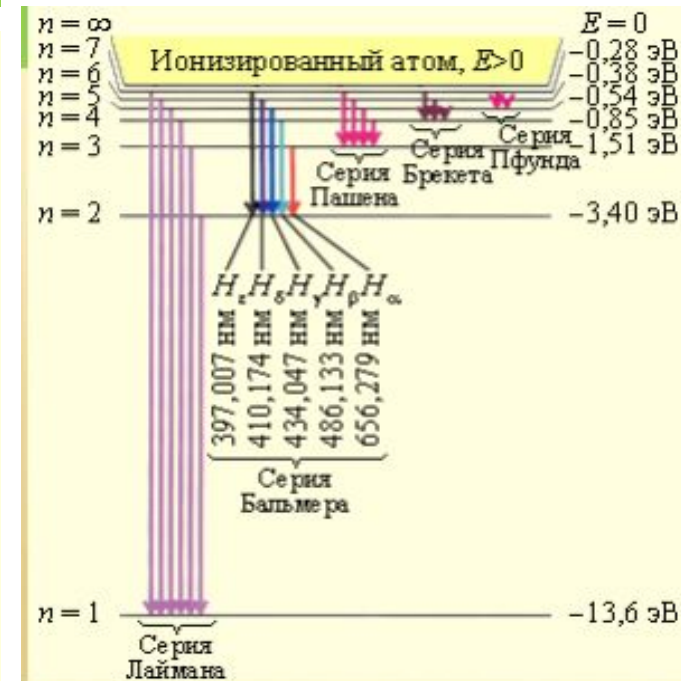
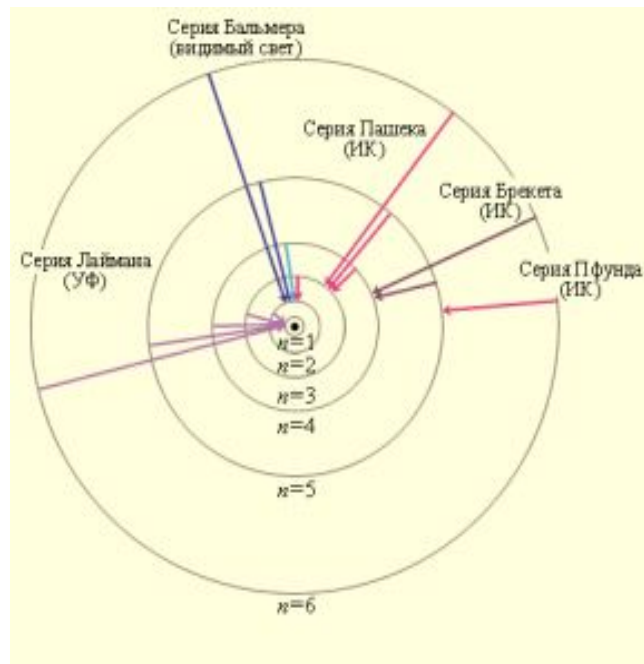
1. Атом может находиться только в особых стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарных состояниях атом не излучает.

2. При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое стационарное состояние с энергией  $E_m$  излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m,$$



Н. Бор, 1885-1962

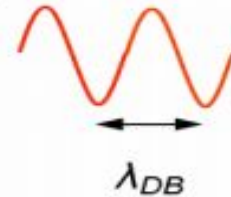


# Волновые свойства частиц

- Луи де Бройль: “корпускулярно-волновой дуализм”  
**частица – волна, волна – частица**



?



Длина волны де Бройля:

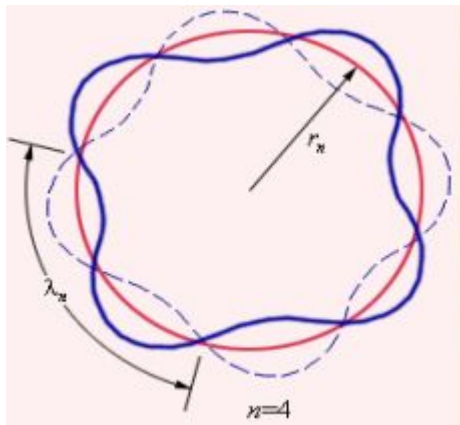
$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p}$$

$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка

$p$  – импульс ( для частицы:  $p = mv$  )

**Например,**

- 1) Свободный электрон  $m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31}$  кг при  $T_{\text{комн}} = 300$  К :  
 $\lambda_{DB} \approx 3$  нм
- 2) Микроб с  $m = 10^{-15}$  кг ,  $v = 1$  мкм/с :  $\lambda_{DB} \approx 0.001$  нм



Каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по сфере около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. Другими словами, стационарная орбита соответствует стоячей волне де Бройля на длине орбиты. В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн  $\lambda$ , т. е.

$$n\lambda_n = 2\pi r_n.$$



# Описание движения в квантовой механике

- Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Для координаты и импульса:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

*! Размер волны не измерить точно на длинах:  $\Delta x \geq h / \Delta p_x \geq \lambda_{DB}$*

Для энергии и времени:

$$\Delta E \Delta t \geq h$$

*! Энергию волны не измерить точно на временах, меньше периода волны :  $\Delta t \geq h / \Delta E \geq 1/\nu = T$*

$$E = E_0 + \Delta E$$

*! Энергия частицы-волны не равна 0, даже если ее энергия покоя  $E_0 = 0$  !*

Состояние частицы описывается волновой функцией:

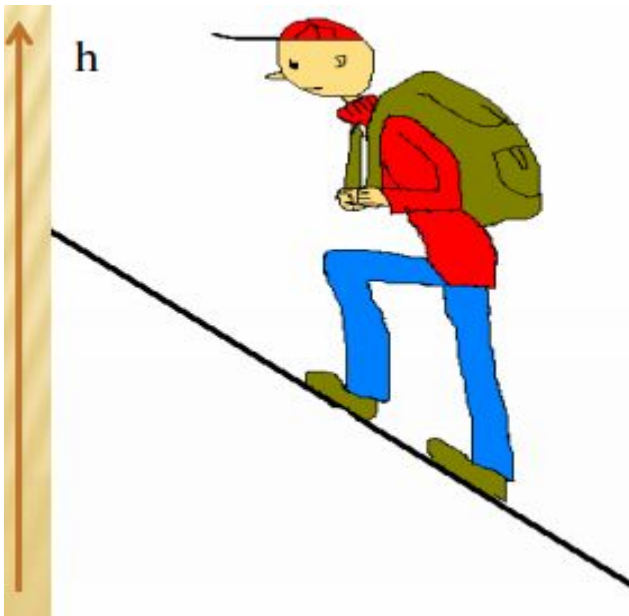
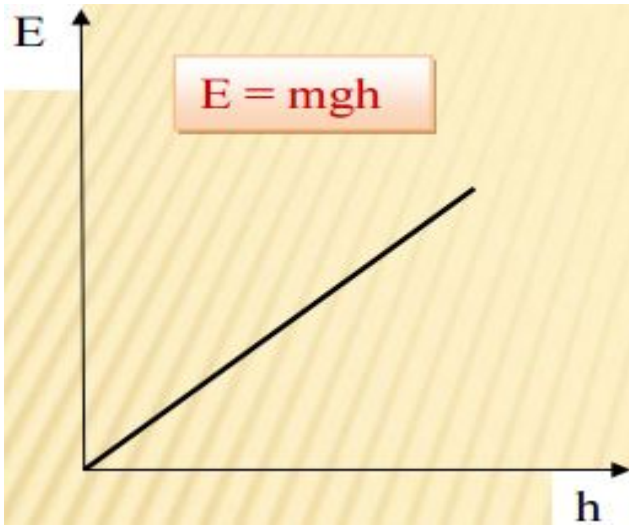
$$\Psi(x, y, z, t)$$

Вероятность  $\Delta w$  найти частицу в объеме  $\Delta V$ :

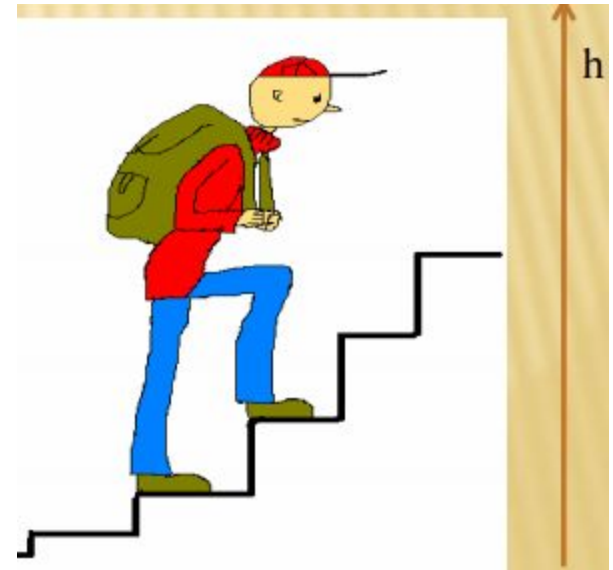
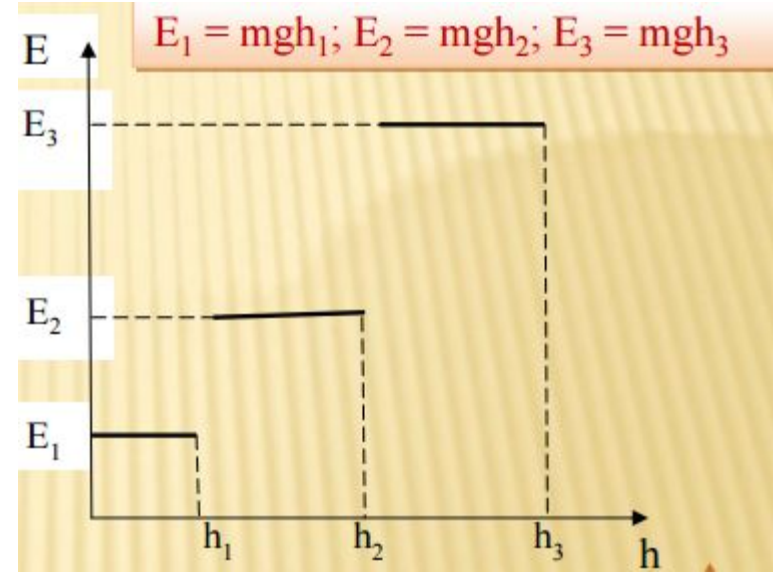
$$\Delta w = |\Psi|^2 \Delta V$$



# Энергия в классической и квантовой механике



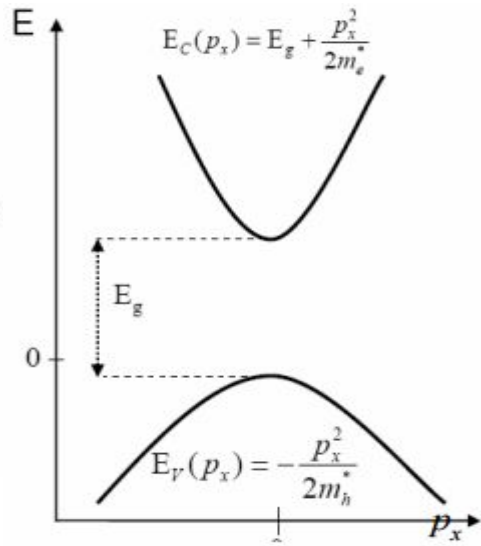
Энергия свободной частицы и в классической, и в квантовой механике может изменяться плавно. Энергия частицы, находящейся в силовом поле, в квантовой механике может изменяться только скачками (квантами)





# Энергия электрона в кристалле

- Вследствие взаимодействий с большим числом атомов в кристалле электрон может иметь не отдельные разрешенные уровни энергии, как в изолированном атоме, а зоны энергий. Энергии электронов валентных оболочек атомов образуют валентную зону  $E_v$ , энергия не связанных с атомами электронов – свободную зону  $E_c$  (зону проводимости). Значение энергии, соответствующее запретной зоне  $E_g$ , не может иметь ни один электрон в кристалле.



$p_x$  – проекция квазиимпульса

$$q_e = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$q_h = e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Квазиимпульс :  $\vec{p} = \hbar \vec{k}$

Квазиволновой вектор:  $\vec{k}$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_e} \Rightarrow p = \hbar \frac{2\pi}{\lambda_e} = \frac{h}{\lambda_e} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} = \frac{h}{\lambda_e}$$

- В кристалле существуют не изолированные свободные электроны, а квазичастицы-волны, обладающие эффективной массой  $m$  (от 0,1 до 2 масс свободного электрона) и квазиимпульсом. Это – **электроны проводимости**  $e$  и незаполненные места валентных оболочек атомов - **дырки**  $h$ .

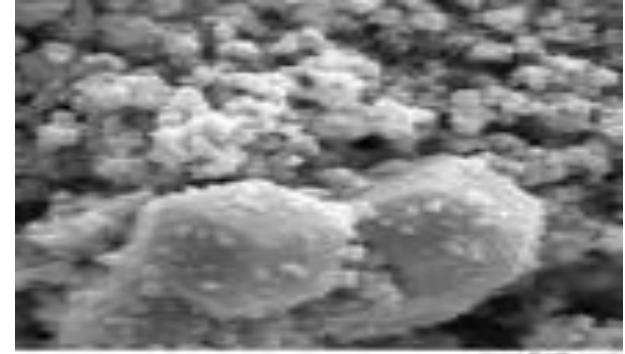
# Основные понятия и терминология

**Наночастицы** — высокодисперсные частицы размером менее 100 нм хотя бы в одном измерении с заданной структурой и свойствами.



**Примеры наночастиц:** фуллерены, квантовые точки

**Наночастицы** под микроскопом



Модель **наночастицы-мицеллы**



# Основные понятия и терминология

- **Квантовые точки** - это искусственные атомы, свойствами которых можно управлять. *Ж.И. Алферов, лауреат Нобелевской премии 2000г.*
- **Квантовые точки** – это изолированные нанобъекты, свойства которых отличаются от свойств объемного материала такого же состава. Сразу следует отметить, что *квантовые точки являются скорее математической моделью, нежели реальными объектами.* Связано это с невозможностью формирования полностью обособленных структур – **малые частицы** всегда взаимодействуют с окружающей средой, находясь в жидкой среде или твердой матрице.
- Первыми **квантовыми точками** были наночастицы металлов, которые синтезировали в древнем Египте для окрашивания различных стекол. Традиционными и широко известными КТ являются выращенные на подложках полупроводниковые частицы GaN и коллоидные растворы нанокристаллов CdSe.

Изображение квантовой точки, состоящей из 15 атомных слоев

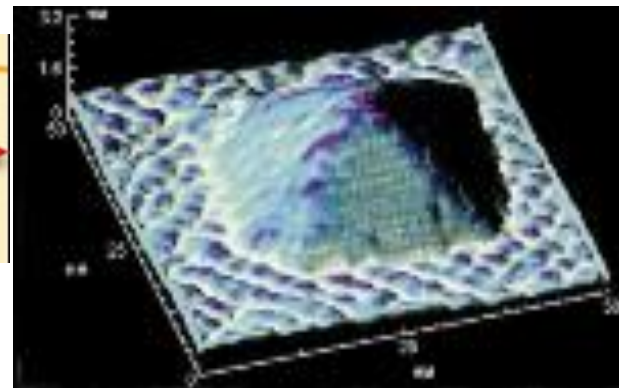


Рис. Объёмное изображение квантовой точки.

# Основные этапы развития нанотехнологий

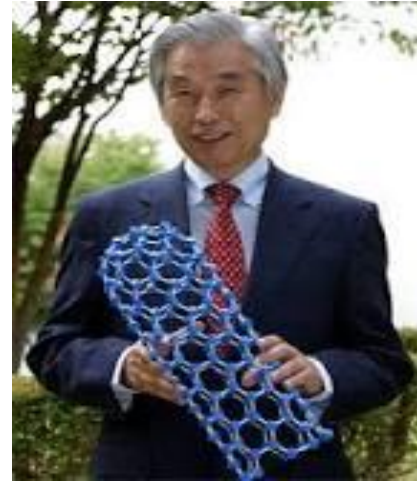
- **29.12.1959 г.** – лекция нобелевского лауреата по физике **Ричарда Фейнмана** (Как много места там, внизу. В миниатюризации)
- Раскрыл перспективы изготовления материалов и устройств на атомарном и молекулярном уровне.
- Отметил возможность использования атомов в качестве строительных частиц.
- Указал на необходимость в создании нового класса измерительной аппаратуры, которая могла бы стать "глазами" и "руками" исследователей наномира.





# Основные этапы развития нанотехнологий

- **1974 г.** – Введение японским ученым **Норио Танигучи** в обиход термина *«нанотехнология»*
- **1981 г.** – Изобретение **сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)** в Швейцарском отделении фирмы IBM (Нобелевская премия – 1986 г. **Heinrich Rohrer** и **Gerd Binnig**)
- **1981 г.** - Работа **Эрика Дрекслера** "Машины созидания. Грядущая эра нанотехнологии":
  - развитие идей Фейнмана
  - особое внимание уделит стратегии создания наноструктур "снизу-вверх"
  - на основе биологических моделей ввел представление о молекулярных робототехнических машинах.



Норио Танигучи



Heinrich Rohrer



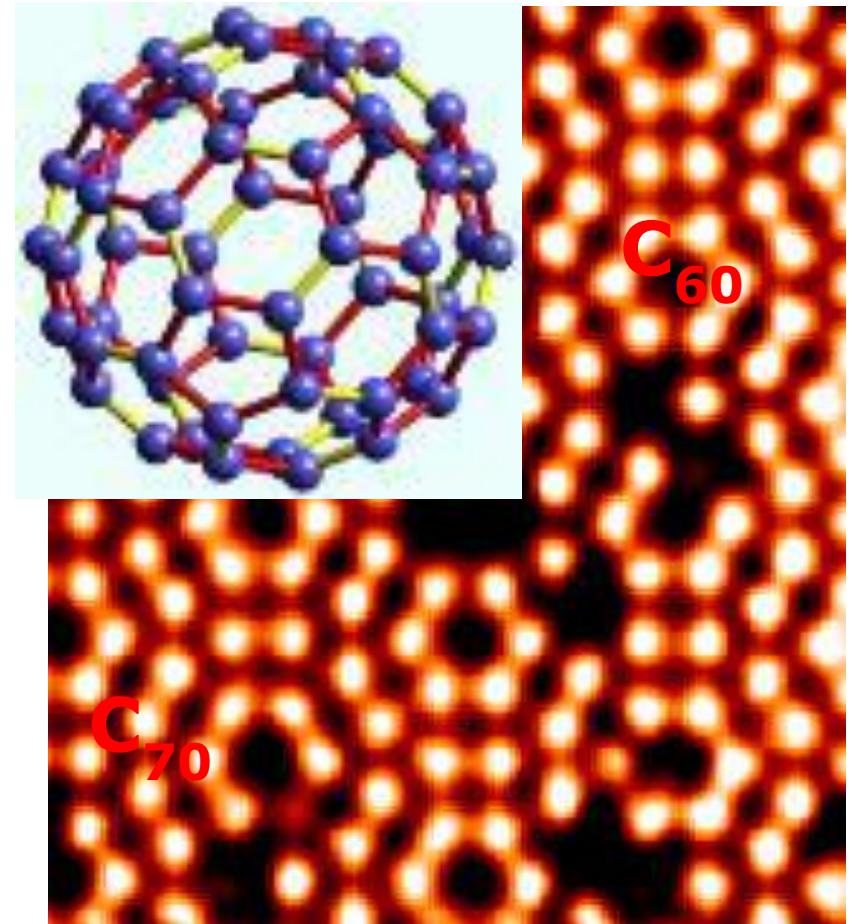
Gerd Binnig



Eric Drexler<sup>37</sup>

# Основные этапы развития нанотехнологий

- **1982-1985 гг.** – Достижение **атомарного разрешения** при исследовании топографии поверхности с помощью СТМ
- **1985 г.** – **Открытие фуллерена** тремя американскими химиками (**Ричард Смэлли, Роберт Карл и Хэрольд Крото** - Нобелевские лауреаты 1996 г.) —Эти ученые впервые сумели измерить объект размером 1 нм.
- **1986 г.** – **Герд Бинниг** разработал сканирующий **атомно-силовой зондовый микроскоп**, позволивший визуализировать атомы любых материалов (не только проводящих), а также манипулировать ими.

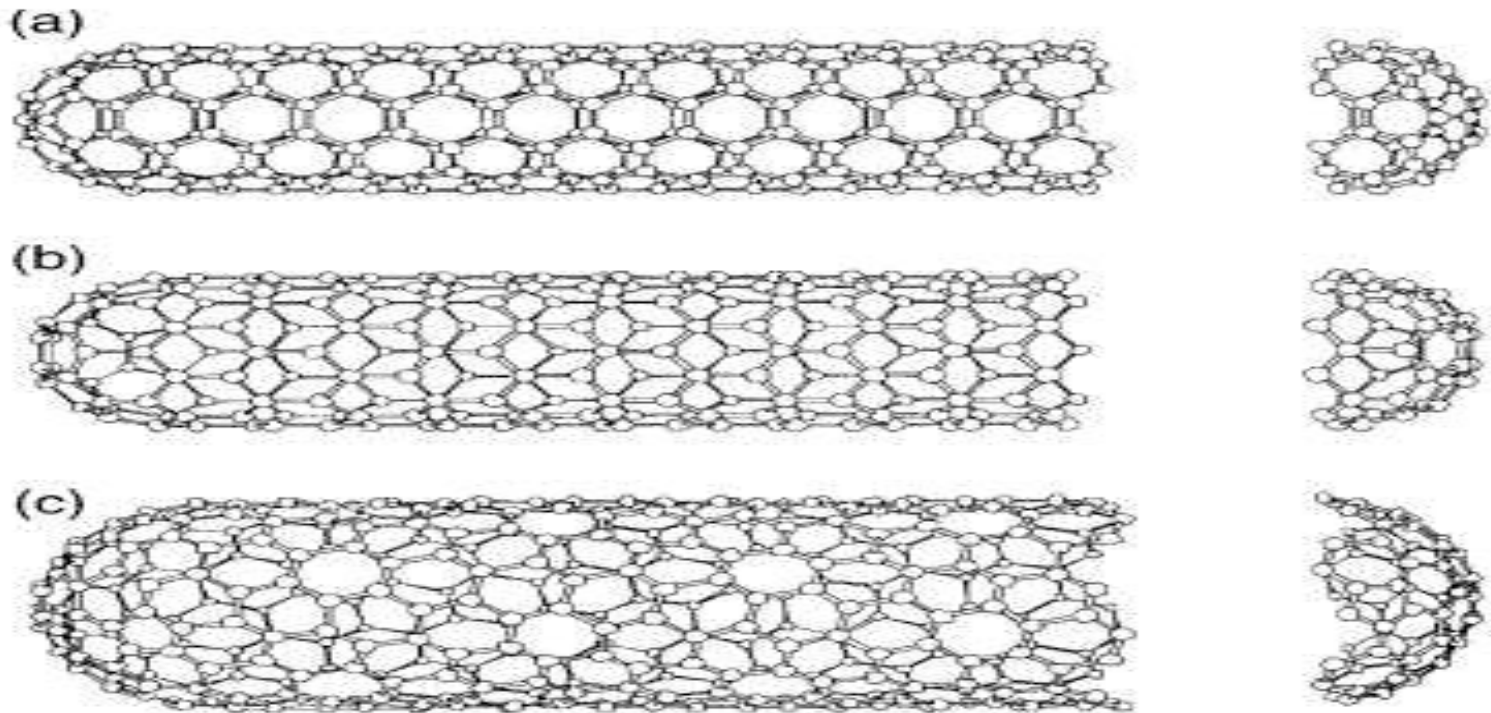


Поверхность Si(111)7x7, АСМв8

# Основные этапы развития нанотехнологий

- **1990 г.** – Научились манипулировать единичными атомами
- **1991 г.** – Открытие **нанотрубок** японским учёным **Сумио Лиджима**.

Он использовал фуллерены для создания углеродных трубок (нанотрубок) диаметром 0,8 нм.



# Краткая хронология основных достижений в рассматриваемой области

Год	Существенные достижения в области нанотехнологий
1928	Предложена принципиальная схема устройства сканирующего оптического микроскопа ближнего поля
1932	Создание первого просвечивающего электронного микроскопа
1938	Создание первого сканирующего электронного микроскопа
1959	Ричард Фейнман выдвинул идею создания веществ и объектов методом поштучной «атомарной» сборки
1972	Создано реальное устройство. Работающее по принципу микроскопа ближнего поля
1975	Теоретически рассмотрена возможность существования квантовых точек
1981	Создание сканирующего туннельного микроскопа
1985	Химики синтезировали первые фуллерены
1986	Эрик Дрекслер выдвинул концепцию создания «молекулярных машин»      Создание атомно-силового микроскопа
1991	Развитие в Японии техники манипулирования атомами и молекулами.      Получение первых нанотрубок
1998	Изготовлен элемент памяти электронного запоминающего устройства (с объемом памяти 128 мегабит), работающий при комнатной температуре
2000	США приступили к реализации программы исследований, названной Национальной      40 Нанотехнологической Инициативой

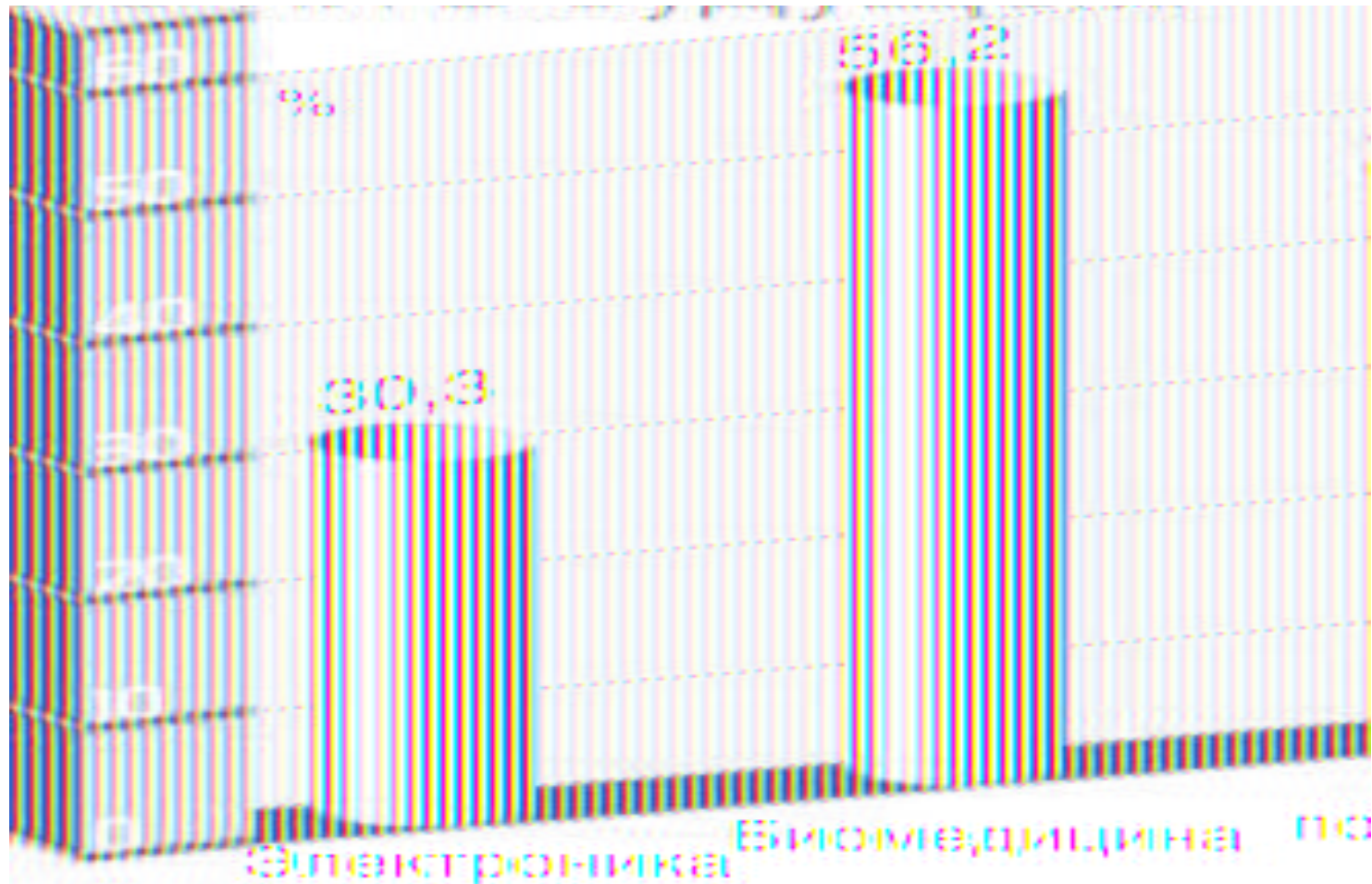


# Нанотехнологии как третья научно-техническая революция

- **На 1-ом этапе** до 2004 г. лишь некоторые нанотехнологии находили применение в высокотехнологичных материалах.
- **На 2-ом этапе**, который характеризовался прорывом в области нанотехнологических инноваций и длится до настоящего времени, доминирует наноэлектроника.
- **На 3-ем этапе** нанотехнологии будут широко применяться в медицинских и биотехнологических материалах и станут проникать в фармацевтику и медицинское оборудование и другие отрасли, в т.ч. в полиграфию и упаковку.
- **В ближайшей перспективе** прогнозируется рост применения нанотехнологий в
  - электронике (30,3%),
  - медицине (56,2%)
  - в потребительской сфере (45,9%).

# Нанотехнологии как третья научно-техническая революция

Прогноз развития рынка нанотехнологий в будущем

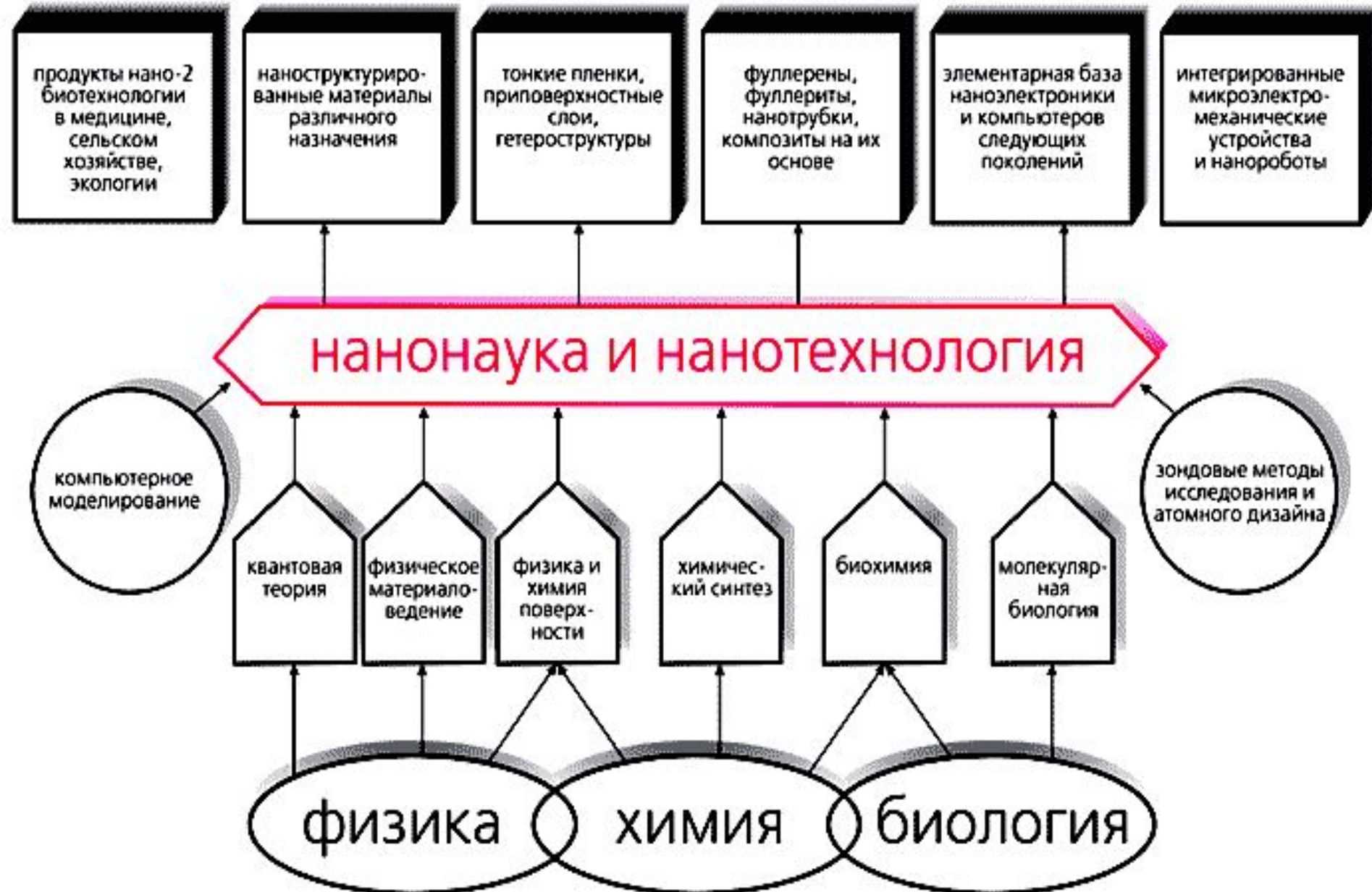


# Нанотехнологии как третья научно-техническая революция

- По мнению экспертов, **XXI в.** будет веком **нанонауки и нанотехнологий**, которые и определяют его лицо.
- **Нанотехнологии** базируется на технологическом, машиностроительном, производственном и научном обеспечении процессов, связанных с управлением атомами и молекулами.
- Воздействие **нанотехнологий** на жизнь обещает изменить экономику и затронуть все стороны быта, работы, социальных отношений.
- С помощью нанотехнологий можно постоянно повышать уровень и качество жизни.
- **Квантовый характер** нанотехнологических процессов делает их в высшей степени наукоёмкими и стимулирует развитие таких направлений, как вычислительные разделы химии, физики, биологии, электроники, многоуровневое математическое моделирование.



# Нанотехнологии как третья научно-техническая революция



продукты нано-2  
биотехнологии  
в медицине,  
сельском  
хозяйстве,  
экологии

наноструктуриро-  
ванные материалы  
различного  
назначения

тонкие пленки,  
приповерхностные  
слои,  
гетероструктуры

фуллерены,  
фуллериты,  
нанотрубки,  
композиты на их  
основе

элементарная база  
наноэлектроники  
и компьютеров  
следующих  
поколений

интегрированные  
микроэлектро-  
механические  
устройства  
и нанороботы

## нанонаука и нанотехнология

компьютерное  
моделирование

квантовая  
теория

физическое  
материало-  
ведение

физика и  
химия  
поверх-  
ности

химичес-  
кий синтез

биохимия

молекуляр-  
ная  
биология

зондовые методы  
исследования и  
атомного дизайна

физика

химия

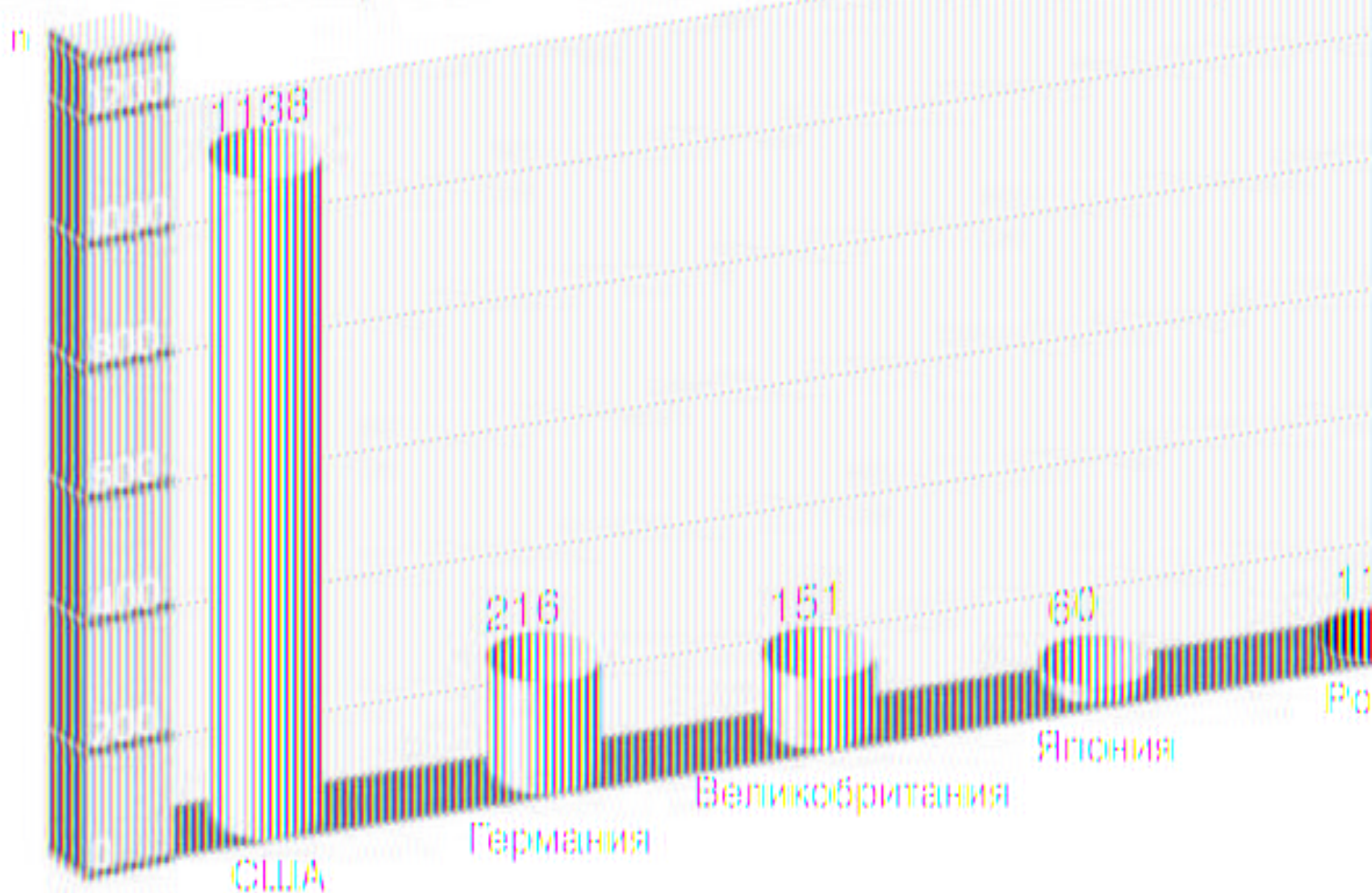
биология

# Развитие нанотехнологий за рубежом

- В 1998 году объем инвестиций на развитие нанотехнологии был на низком уровне.
- В США в 2000 г. первоначально на исследования было выделено 270 млн. долл., в 2001 г. американские нанотехнологии освоили уже 770 млн. долл., на следующий год финансирование составило **849 млн.** долл., а в последующие три года вложения составили 2,4 млрд. долл. Большая часть этих инвестиций поступает в Национальный научный фонд США, министерства обороны и энергетики.
- Китай в 2002 г. году израсходовал на наноисследования 200 млн. долл., Япония — **750 млн.**, а в 2003 году ее инвестиции в нанотехнологии достигли миллиарда долларов.
- В наст. время инвестиции растут в геометрической прогрессии.

# Развитие нанотехнологий за рубежом

Рис. 1. Распределение по странам компаний занимающихся нанотехнологиями ([www.na](http://www.na))





# Прогноз развития рынка продукции нанотехнологии на 2015-2016 гг.

К продуктам нанотехнологий относят:

- **наноструктурированные объекты**, которые состоят из объемов с различными электрическими, оптическими, магнитными, акустическими свойствами и предназначены для создания приборов и устройств;
- **массивные объекты** (материалы), в структуре которых имеются наноразмерные частицы, придают им особые механические свойства;
- **сами наноразмерные частицы**, обладающие уникальными комбинациями механических и физических свойств.

# Прогноз развития рынка продукции нанотехнологии на 2015-2016 гг.



**В России на 2007 - 2012 гг. выделено  
134 млрд руб. (около 5 млрд долларов)**

## *Раздел рынка нанотехнологий по направлениям*

- Новые материалы 30-35 %
- Полупроводники 18-25 %
- Устройства хранения данных 15-20 %
- Биотехнологии 9-14 %
- Полимеры 8-12 %
- Электрохимия 3-5 %
- Оптика 2-4 %

## *Раздел рынка нанотехнологий по странам*

- США 40-45 %
- Япония 25-30 %
- Европа 15-20 %
- Азия 5-10 %

Спасибо за внимание

