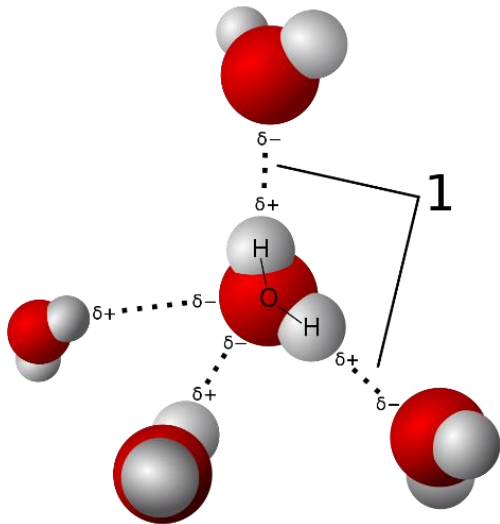


# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Дзюба Сергей Андреевич



Сайт: <https://hf.nsu.ru/freshmen.html>



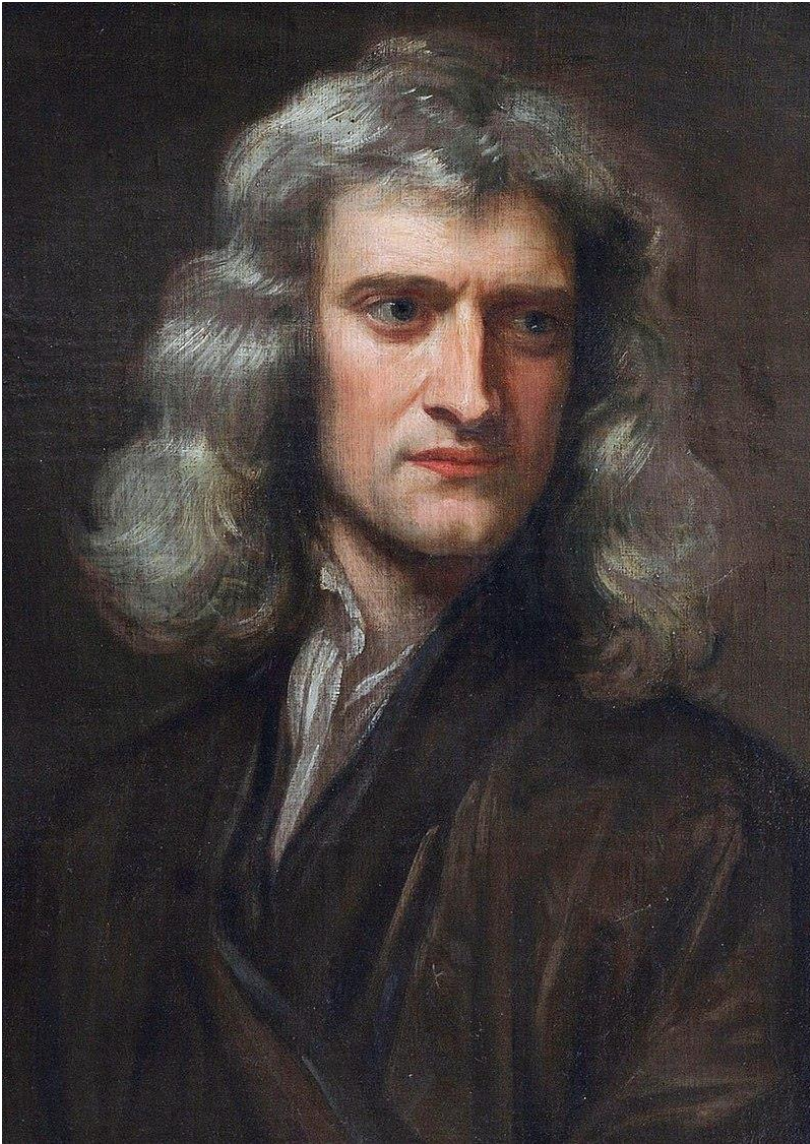
Фрагмент фрески «Афинская школа» Рафаэля Санти в Ватиканском дворце (1510 – 1511)

Греческие философы Левкипп и Демокрит (V – IV век до н.э.):

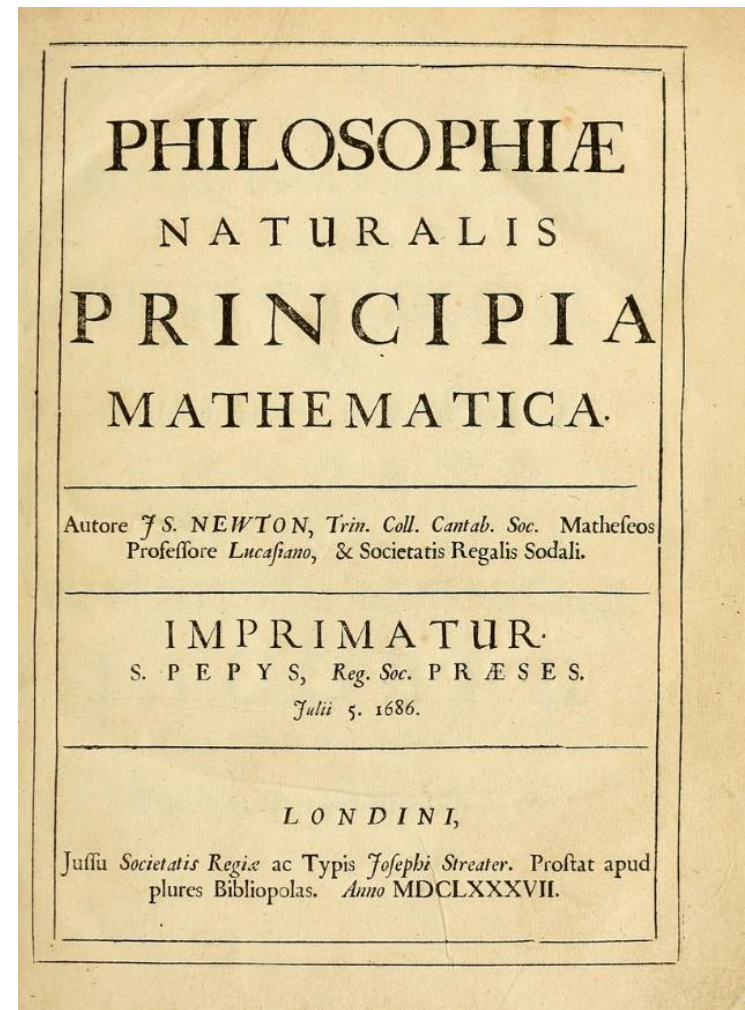
Атом (ἄτομος «неделимый, неразрезаемый») — неделимая частица вещества, обладающая истинным бытием, не разрушающаяся и не возникающая.

Все вещи состоят из этих микроскопических, неделимых частиц, которые взаимодействуют и соединяются, создавая все предметы мира.

XVII век



Исаак Ньютон



«Математические начала  
натуральной философии»  
(1684-1686)

$$\mathbf{F} = ma$$

**Молекулярное строение вещества:** научные доказательства стали появляться только в XIX веке

## **Закон постоянства состава**

(Французский химик Ж.Л. Пруст, 1806 г.):

массы химических элементов в химическом соединении находятся в определенном соотношении, независимо от способа его получения.

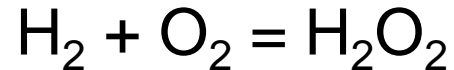
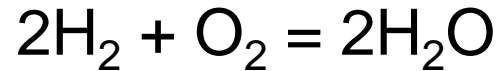
Например, 1 весовая часть водорода для образования воды всегда соединяется с 8 весовыми частями кислорода.



## Закон кратных отношений (английский физик и химик Дж. Дальтон, 1808 г.)

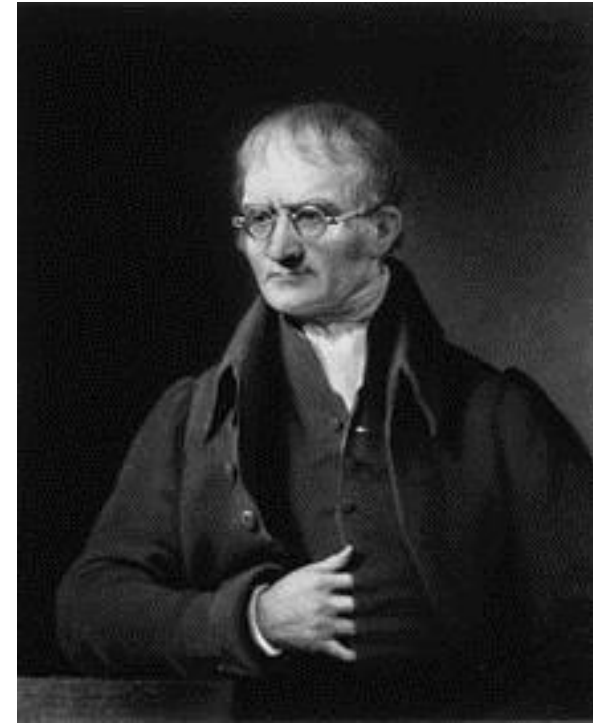
2 г водорода, соединяясь с 16 г кислорода, дают воду, а для получения перекиси водорода 2 г водорода необходимо соединить с 32 г кислорода.

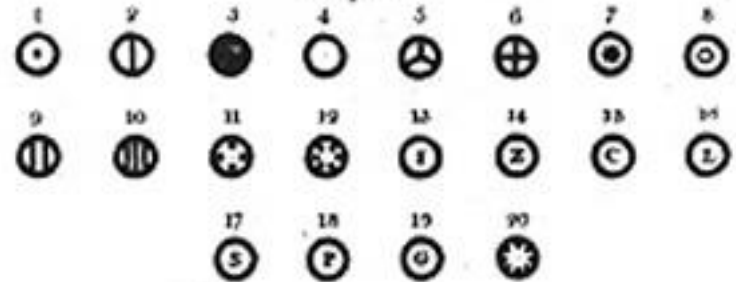
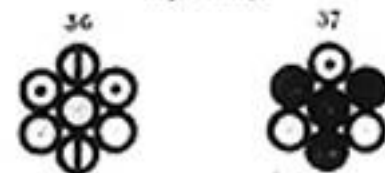
Сейчас мы знаем, почему это:



Кислорода надо взять ровно в 2 раза больше, чем в случае образования воды.

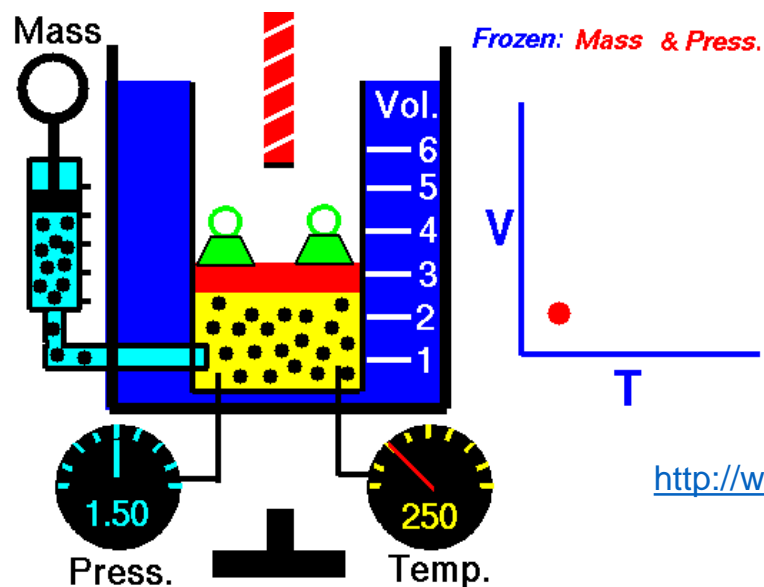
Объяснить этот закон невозможно, не прибегая к предположению о дискретности материи.



*Simple**Binary**Ternary**Quaternary**Quinary & Sextenary**Septenary*

Структуры молекул  
по Дальтону (1808)

# Газовые законы – Гей-Люссака, Бойля-Мариотта, Шарля (конец XVIII - начало XIX века).



Объём газа при постоянном давлении пропорционален температуре (закон Гей-Люссака)

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/aglussac.html>

**Закон Авогадро:** одинаковые объемы разных газов при одинаковых температуре и давлении содержат одинаковое число молекул (в 1811 году гипотеза, через 50 лет становится законом).



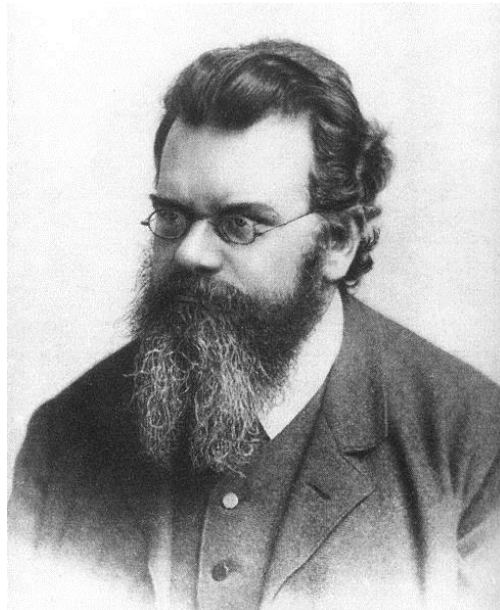


Середина и конец XIX века – объяснение газовых законов Максвелл, Больцман и др. в рамках т.н. **молекулярно-кинетической теории**:

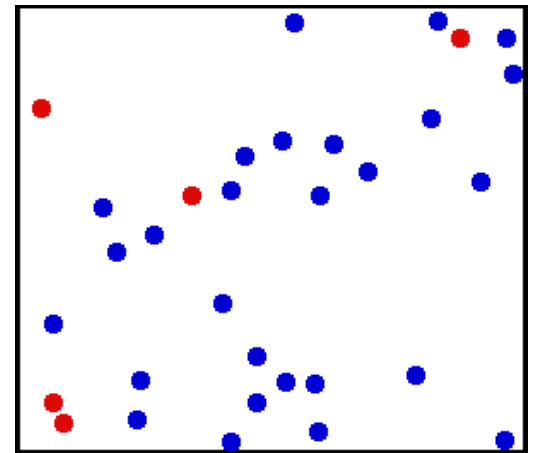
- все тела состоят из мельчайших частиц: атомов, молекул или ионов;
- эти частицы находятся в непрерывном хаотичном движении (**кинэтика**: др.-греч. κίνησις «движение»);
- частицы взаимодействуют друг с другом путём абсолютно упругих столкновений.



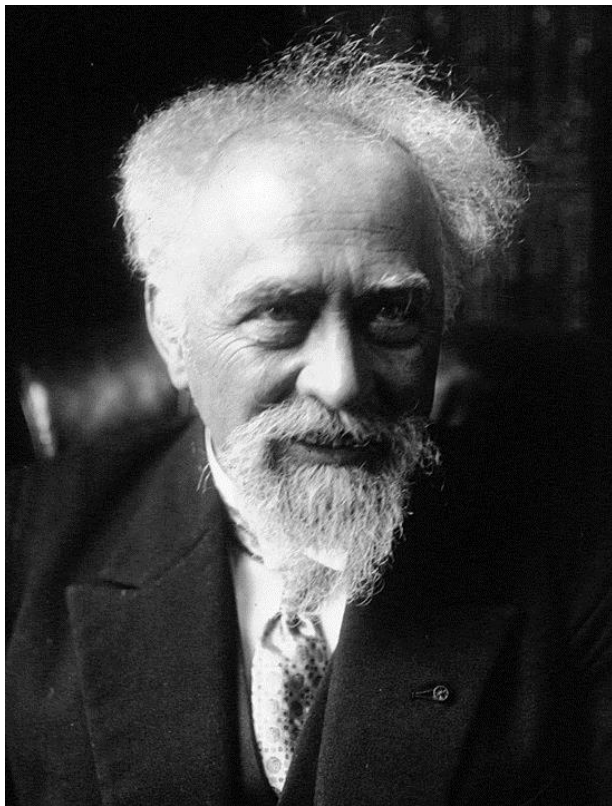
Джеймс Клерк Максвелл



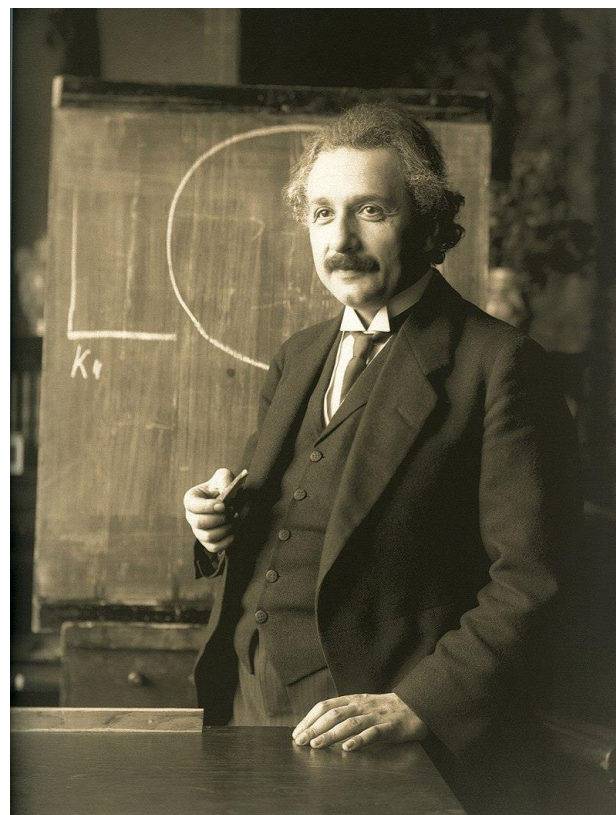
Людвиг Больцман



Начало XX века – стали известны размеры и массы молекул, число молекул в единице объема, постоянная Авогадро (фр. ученый Перрен, на основе теорий Больцмана, Эйнштейна и др.)

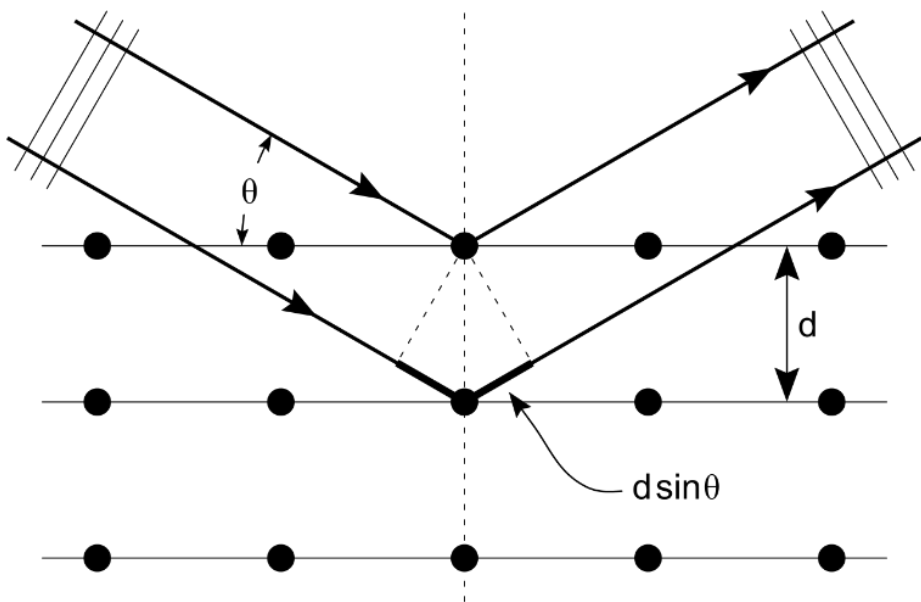


Жан Перрен

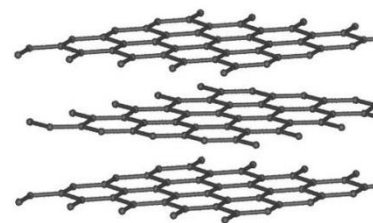
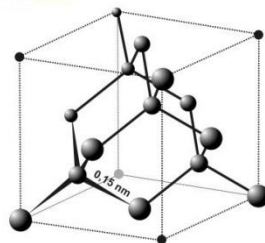


Альберт Эйнштейн

# Рентгеноструктурный анализ кристаллов (начиная с 1912 г.)

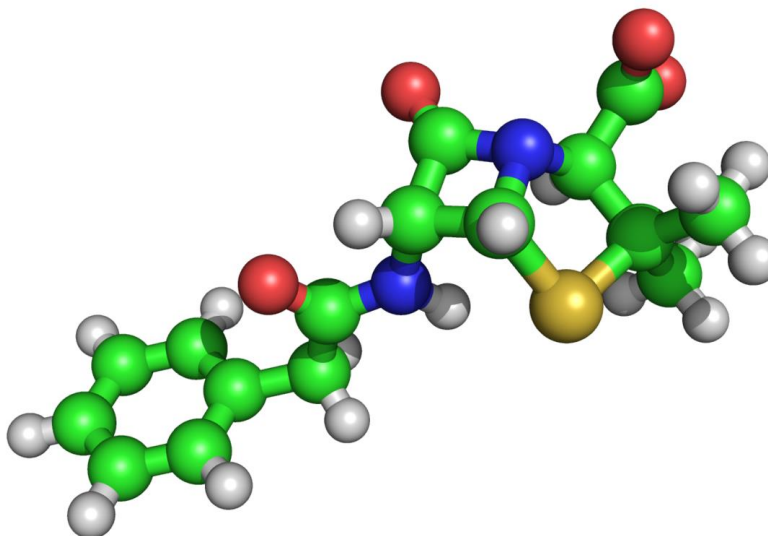


Графит

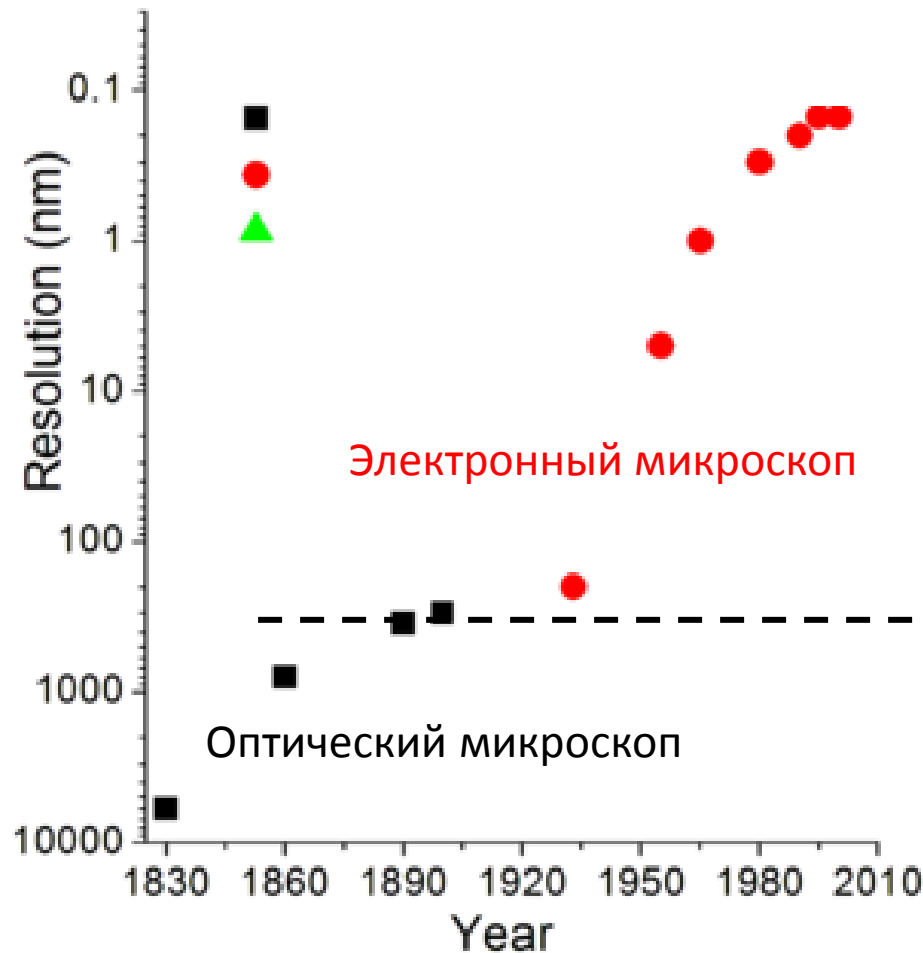
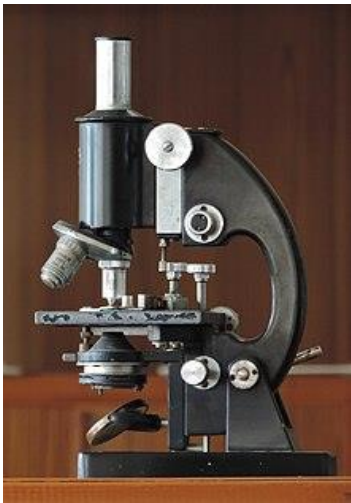


## Рассеяние рентгеновских лучей на кристаллической решетке

Пенициллин

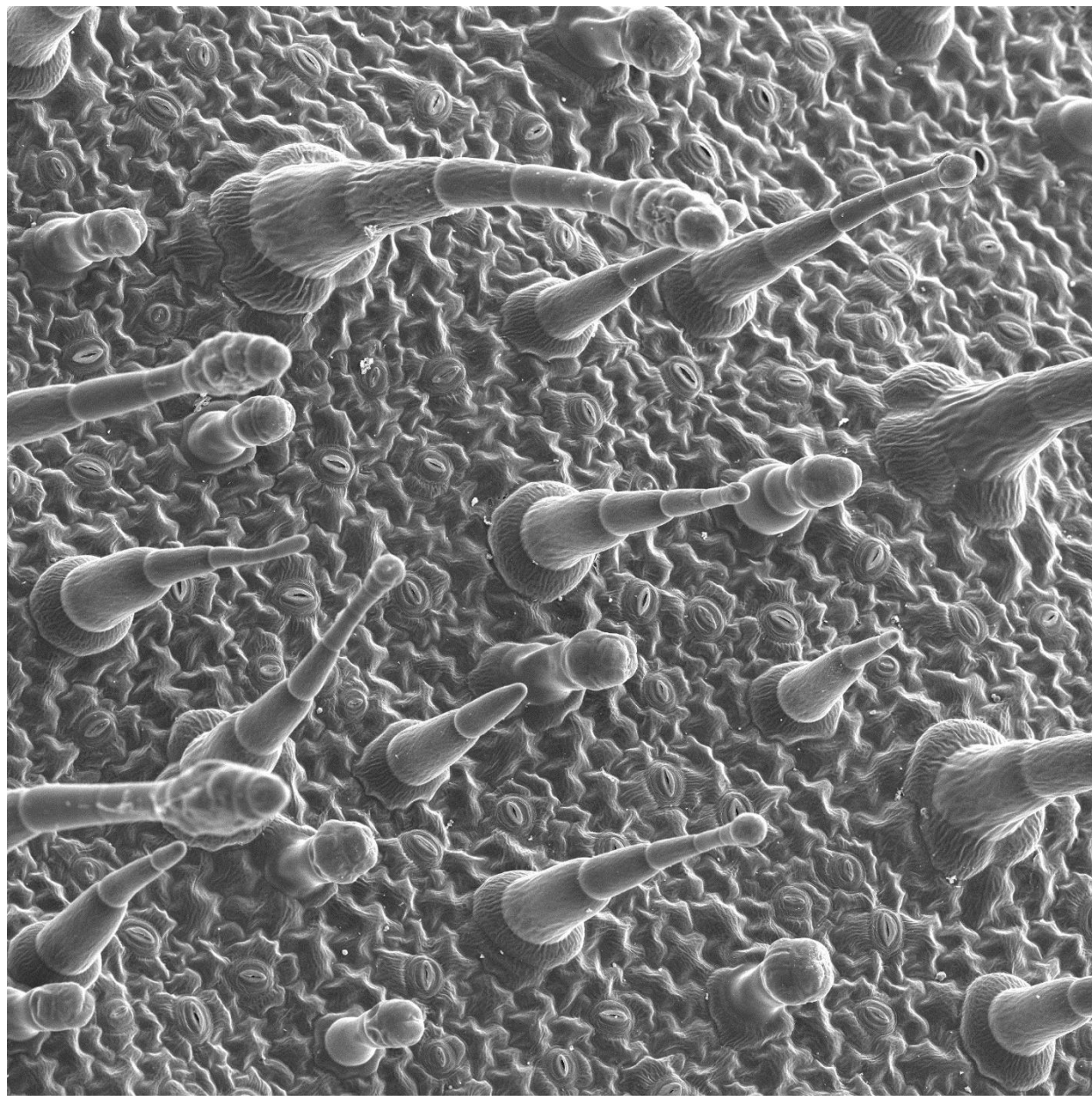


# Микроскопия



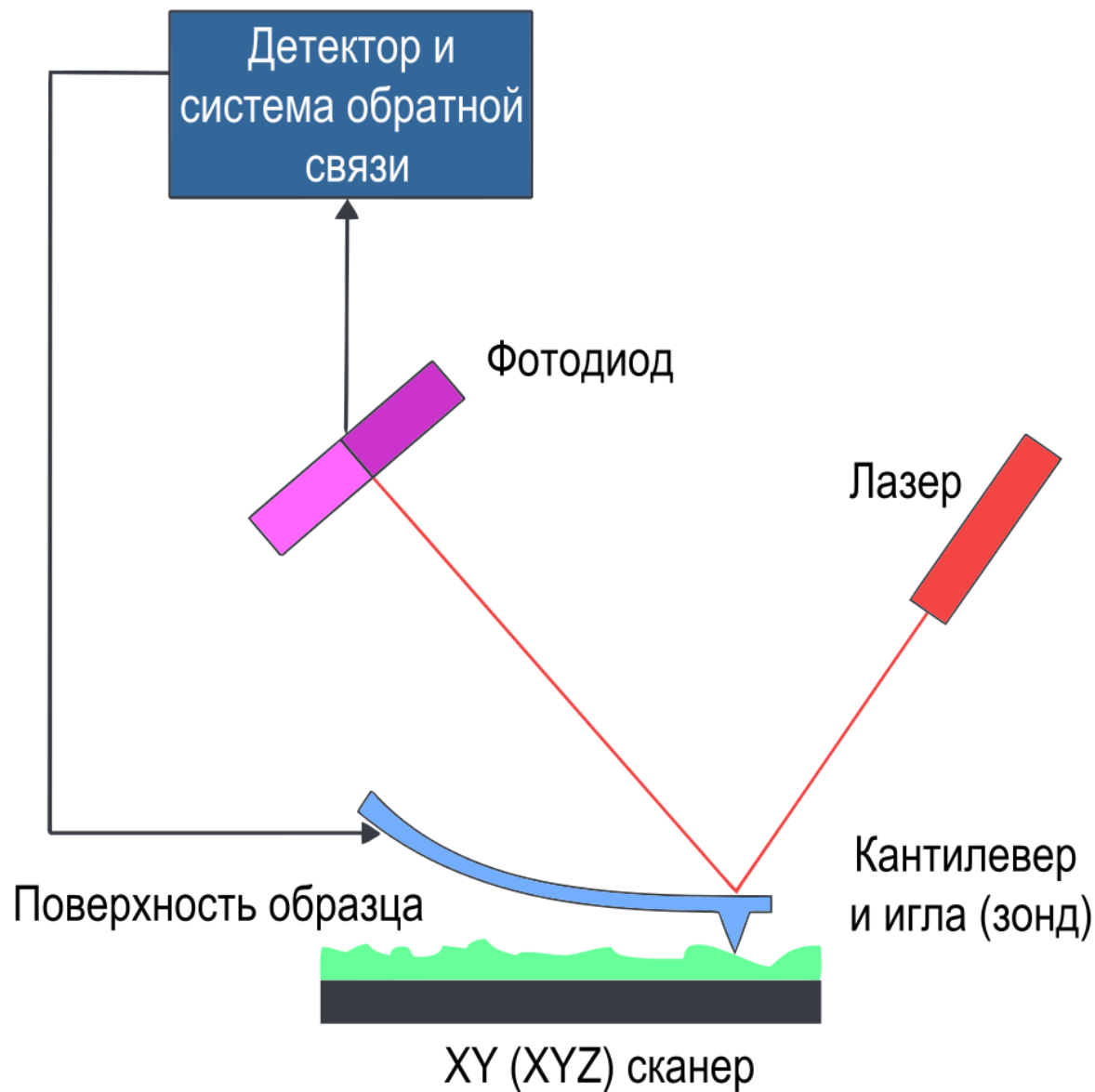
200 нм – дифракционный предел для оптического микроскопа (половина длины волны видимого света)

Поверхность листка  
дерева в  
электронном  
микроскопе

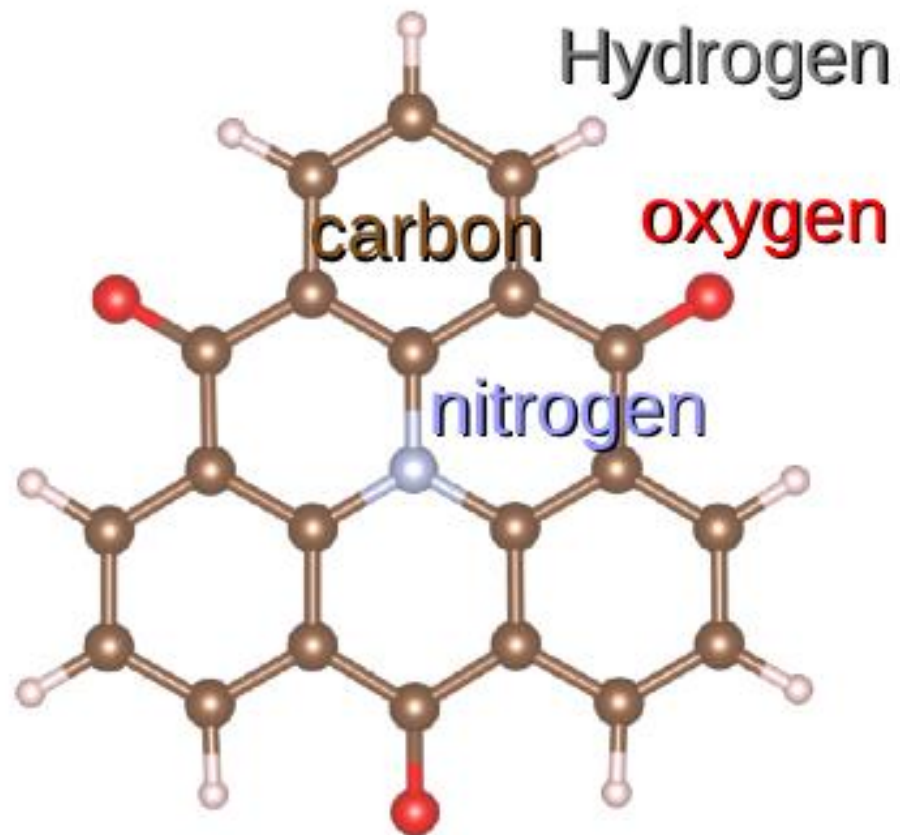
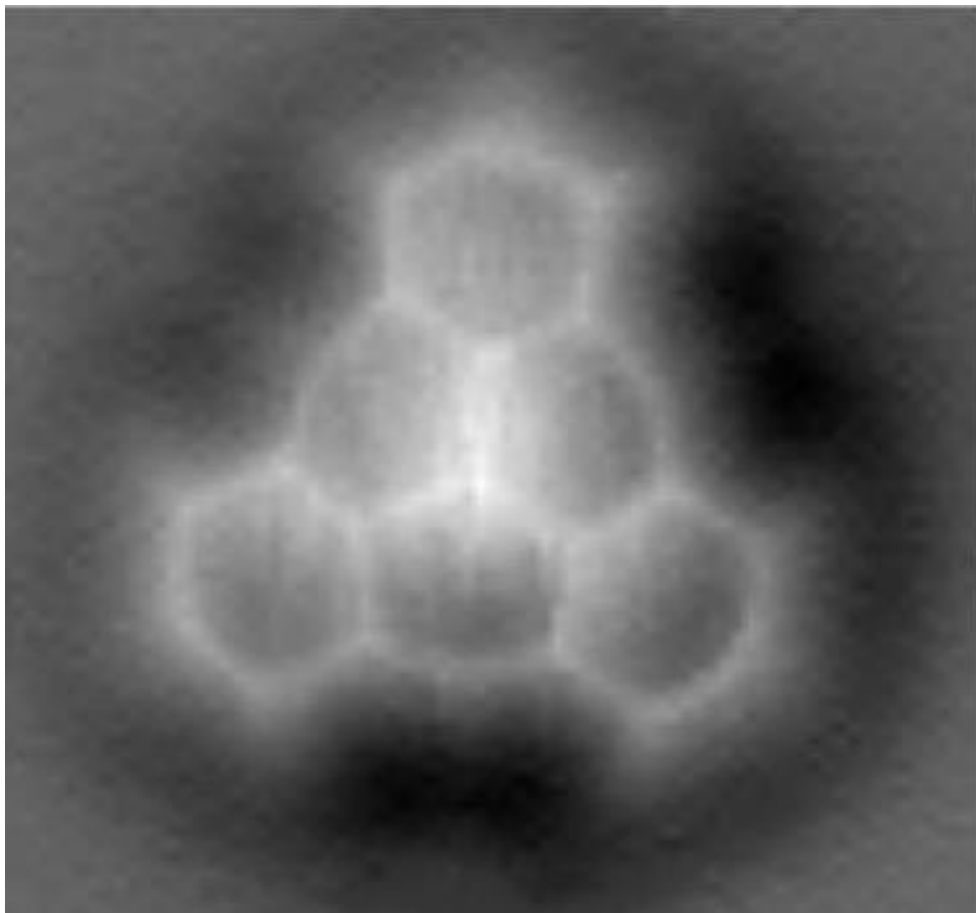


200 нм

# Конец 20-го века: Сканирующая зондовая микроскопия



# Снимок одиночной органической молекулы



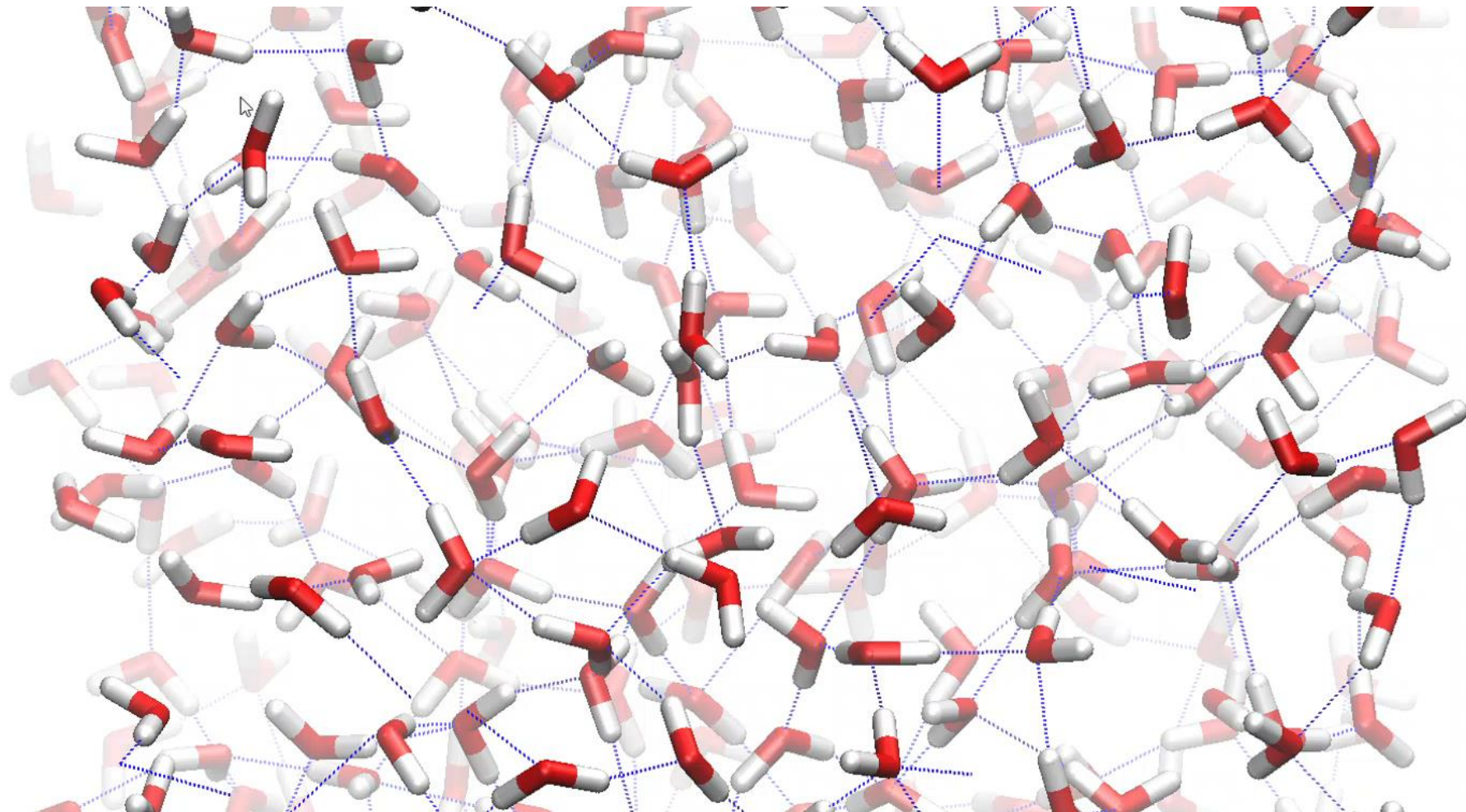
## Метод молекулярной динамики (вторая половина 20-го века)

Численное интегрирование на мощных компьютерах ньютоновский уравнений движения для набора отдельных молекул, взаимодействующих между собой с потенциалом взаимодействия  $U(\vec{r})$ .

$$m \frac{d^2}{dt^2} \vec{r} = - \frac{dU(\vec{r})}{d\vec{r}}$$

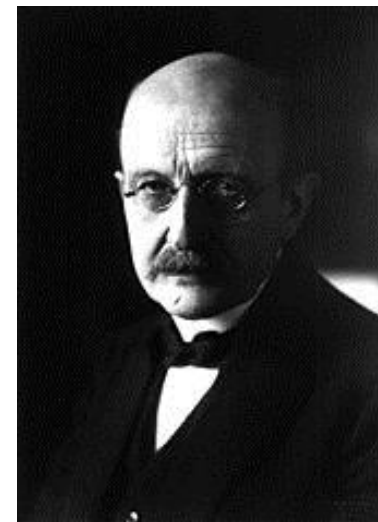
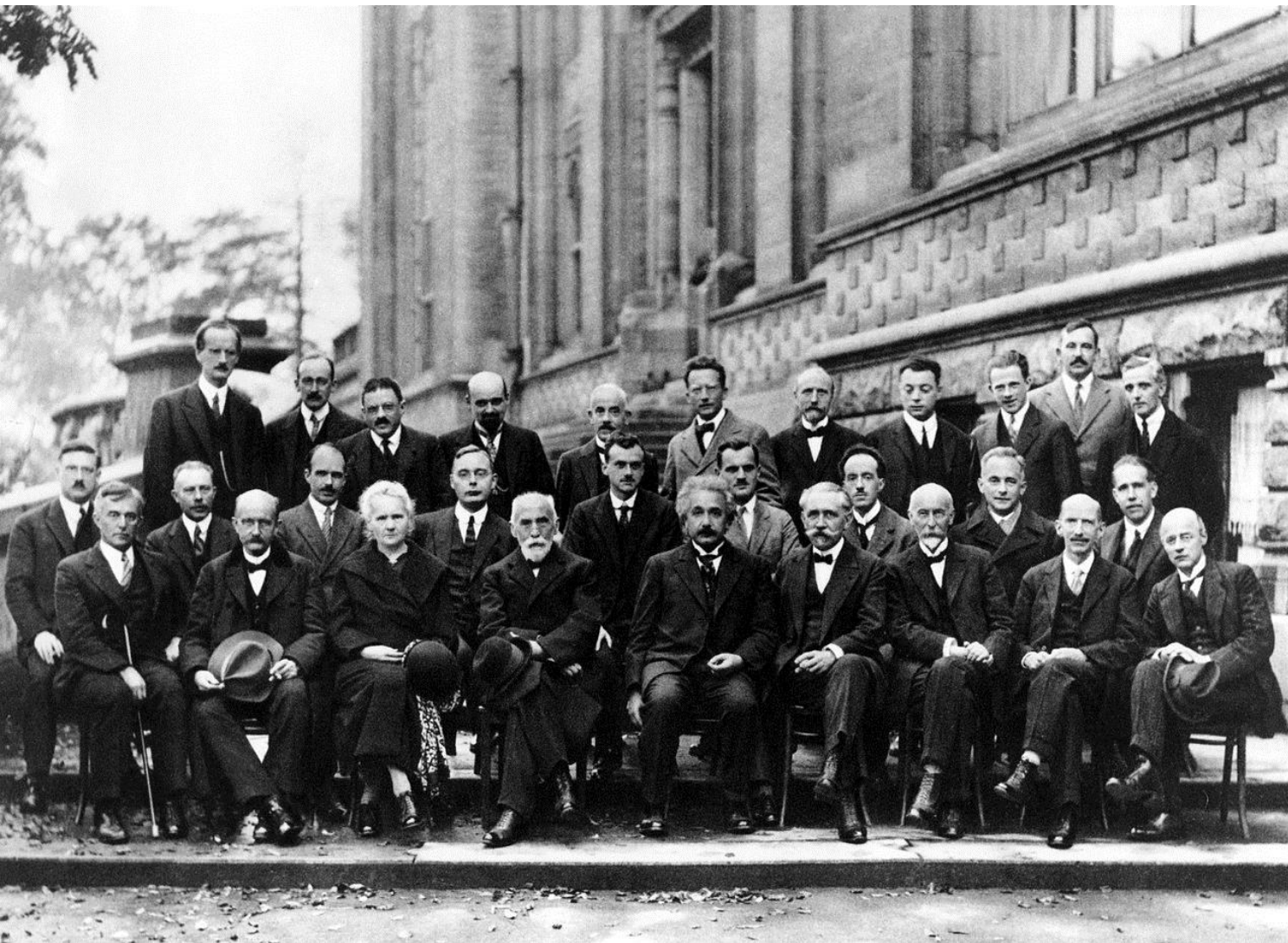


## Расчет для молекул воды.



Полное время 100 пикосекунд ( $10^{-10}$  с)

20-е годы XX века – создание квантовой механики,  
законы атомной физики, формирование молекул



Макс Планк

Конференция  
в Брюсселе,  
1927 г.

Все вещества состоят из некоторого набора простых веществ – химических элементов. Систематизированы в таблице Менделеева.

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМ

Свойства атомов химических элемен  
находятся в периодической

## Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ства их соединений  
ных ядер



I A												VIII A												
1												18												
1	1,00794 <b>1 H</b> ВОДОРОД											2	4,00260 <b>He</b> ГЕЛИЙ											
		II A																						
		2																						
2	6,941 <b>3 Li</b> ЛИТИЙ	9,01218 <b>4 Be</b> БЕРИЛЛИЙ											5	10,811 <b>B</b> БОР	6	12,0107 <b>C</b> УГЛЕРОД	7	14,0067 <b>N</b> АЗОТ	8	15,9994 <b>O</b> КИСЛОРОД	9	18,9984 <b>F</b> ФТОР	10	20,1797 <b>Ne</b> НЕОН
3	22,9898 <b>11 Na</b> НАТРИЙ	24,3050 <b>12 Mg</b> МАГНИЙ											13	26,9815 <b>Al</b> АЛЮМИНИЙ	14	28,0855 <b>Si</b> КРЕМНИЙ	15	30,9738 <b>P</b> ФОСФОР	16	32,065 <b>S</b> СЕРА	17	35,453 <b>Cl</b> ХЛОР	18	39,948 <b>Ar</b> АРГОН
		III B	IV B	V B	VI B	VII B	8	VIII B	10	I B	II B													
		3	4	5	6	7		9		11	12													
4	39,0983 <b>19 K</b> КАЛИЙ	40,078 <b>20 Ca</b> КАЛЬЦИЙ	44,9559 <b>21 Sc</b> СКАНДИЙ	47,867 <b>22 Ti</b> ТИТАН	50,9415 <b>23 V</b> ВАНАДИЙ	51,9961 <b>24 Cr</b> ХРОМ	54,9380 <b>25 Mn</b> МАРГАНЕЦ	55,845 <b>26 Fe</b> ЖЕЛЕЗО	58,9332 <b>27 Co</b> КОБАЛЬТ	58,6934 <b>28 Ni</b> НИКЕЛЬ	63,546 <b>29 Cu</b> МЕДЬ	65,38 <b>30 Zn</b> ЦИНК	69,723 <b>31 Ga</b> ГАЛЛИЙ	72,64 <b>32 Ge</b> ГЕРМАНИЙ	74,9216 <b>33 As</b> МЫШЬЯК	78,96 <b>34 Se</b> СЕЛЕН	79,904 <b>35 Br</b> БРОМ	83,798 <b>36 Kr</b> КРИПТОН						
5	85,4678 <b>37 Rb</b> РУБИДИЙ	87,62 <b>38 Sr</b> СТРОНЦИЙ	88,9058 <b>39 Y</b> ИТТРИЙ	91,224 <b>40 Zr</b> ЦИРКОНИЙ	92,9064 <b>41 Nb</b> НИОБИЙ	95,96 <b>42 Mo</b> МОЛИБДЕН	[98] <b>43 Tc</b> ТЕХНЕЦИЙ	101,07 <b>44 Ru</b> РУТЕНИЙ	102,905 <b>45 Rh</b> РОДИЙ	106,42 <b>46 Pd</b> ПАЛЛАДИЙ	107,868 <b>47 Ag</b> СЕРЕБРО	112,411 <b>48 Cd</b> КАДМИЙ	114,818 <b>49 In</b> ИНДИЙ	118,710 <b>50 Sn</b> ОЛОВО	121,760 <b>51 Sb</b> СУРЬМА	127,60 <b>52 Te</b> ТЕЛЛУР	126,904 <b>53 I</b> ИОД	131,293 <b>54 Xe</b> КСЕНОН						
6	132,905 <b>55 Cs</b> ЦЕЗИЙ	137,327 <b>56 Ba</b> БАРИЙ	138,906 <b>57 La</b> ЛАНТАН	178,49 <b>72 Hf</b> ГАФНИЙ	180,948 <b>73 Ta</b> ТАНТАЛ	183,84 <b>74 W</b> ВОЛЬФРАМ	186,207 <b>75 Re</b> РЕНИЙ	190,23 <b>76 Os</b> ОСМИЙ	192,217 <b>77 Ir</b> ИРИДИЙ	195,084 <b>78 Pt</b> ПЛАТИНА	196,967 <b>79 Au</b> ЗОЛОТО	200,59 <b>80 Hg</b> РУТУТЬ	204,383 <b>81 Tl</b> ТАЛЛИЙ	207,2 <b>82 Pb</b> СВИНЕЦ	208,980 <b>83 Bi</b> ВИСМУТ	[209] <b>84 Po</b> ПОЛОНИЙ	[210] <b>85 At</b> АСТАТ	[222] <b>86 Rn</b> РАДОН						
7	[223] <b>87 Fr</b> ФРАНЦИЙ	[226] <b>88 Ra</b> РАДИЙ	[227] <b>89 Ac</b> АКТИНИЙ	[267] <b>104 Rf</b> РЕЗЕРФОРДИЙ	[270] <b>105 Db</b> ДУБНИЙ	[271] <b>106 Sg</b> СИБОРГИЙ	[274] <b>107 Bh</b> БОРИЙ	[277] <b>108 Hs</b> ХАССИЙ	[278] <b>109 Mt</b> МЕЙТНЕРИЙ	[281] <b>110 Ds</b> ДАРМШЛАДТИЙ	[281] <b>111 Rg</b> РЕНТГЕНИЙ	[285] <b>112 Cn</b> КОПЕРНИЦИЙ	[286] <b>113 Uut</b>	[289] <b>114 Fl</b> ФЛЕРОВИЙ	[289] <b>115 Uup</b>	[293] <b>116 Lv</b> ЛИБЕРМОРИЙ	[294] <b>117 Uus</b>	[294] <b>118 Uuo</b>						
		140,116 <b>58 Ce</b> ЦЕРИЙ	140,908 <b>59 Pr</b> ПРАЗЕОДИМ	144,242 <b>60 Nd</b> НЕОДИМ	[145] <b>61 Pm</b> ПРОМЕТИЙ	150,36 <b>62 Sm</b> САМАРИЙ	151,964 <b>63 Eu</b> ЕВРОПИЙ	157,25 <b>64 Gd</b> ГАДОЛИНИЙ	158,925 <b>65 Tb</b> ТЕРБИЙ	162,500 <b>66 Dy</b> ДИСПРОЗИЙ	164,930 <b>67 Ho</b> ГОЛЬМИЙ	167,259 <b>68 Er</b> ЭРБИЙ	168,934 <b>69 Tm</b> ТУЛИЙ	173,054 <b>70 Yb</b> ИТТЕРБИЙ	174,97 <b>71 Lu</b> ЛУТЕЦИЙ									
		232,038 <b>90 Th</b> ТОРИЙ	231,036 <b>91 Pa</b> ПРОТАКТИНИЙ	238,029 <b>92 U</b> УРАН	[237] <b>93 Np</b> НЕПУНИЙ	[244] <b>94 Pu</b> ПЛУТОНИЙ	[243] <b>95 Am</b> АМЕРИЦИЙ	[247] <b>96 Cm</b> КЮРИЙ	[247] <b>97 Bk</b> БЕРКЛИЙ	[251] <b>98 Cf</b> КАЛИФОРНИЙ	[252] <b>99 Es</b> ЭЙНШТЕЙНИЙ	[257] <b>100 Fm</b> ФЕРМИЙ	[258] <b>101 Md</b> МЕНДЕЛЕВИЙ	[259] <b>102 No</b> НОБЕЛИЙ	260,11 <b>103 Lr</b> ЛОУРЕНЦИЙ									

127,60 ← Относительная атомная мас  
**52 Te** ← Атомный номер и химическ  
ТЕЛЛУР ← Название элемента  
☼ ← Радиоактивный элемент

**Атомы** – наименьшие частицы каждого химического элемента. Состоят из ядра из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, и отрицательно заряженных электронов. Число протонов равно числу электронов – атомы электронейтральны.

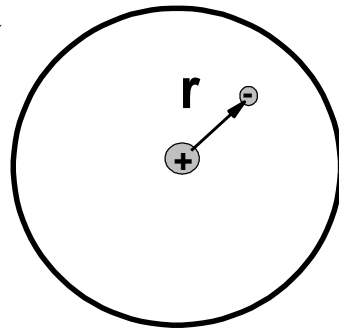
**Порядковый номер атома в таблице Менделеева** – число протонов.

**Изотопы** – атомы одного порядкового номера, с разным количеством нейтронов в ядре.  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  (D),  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$

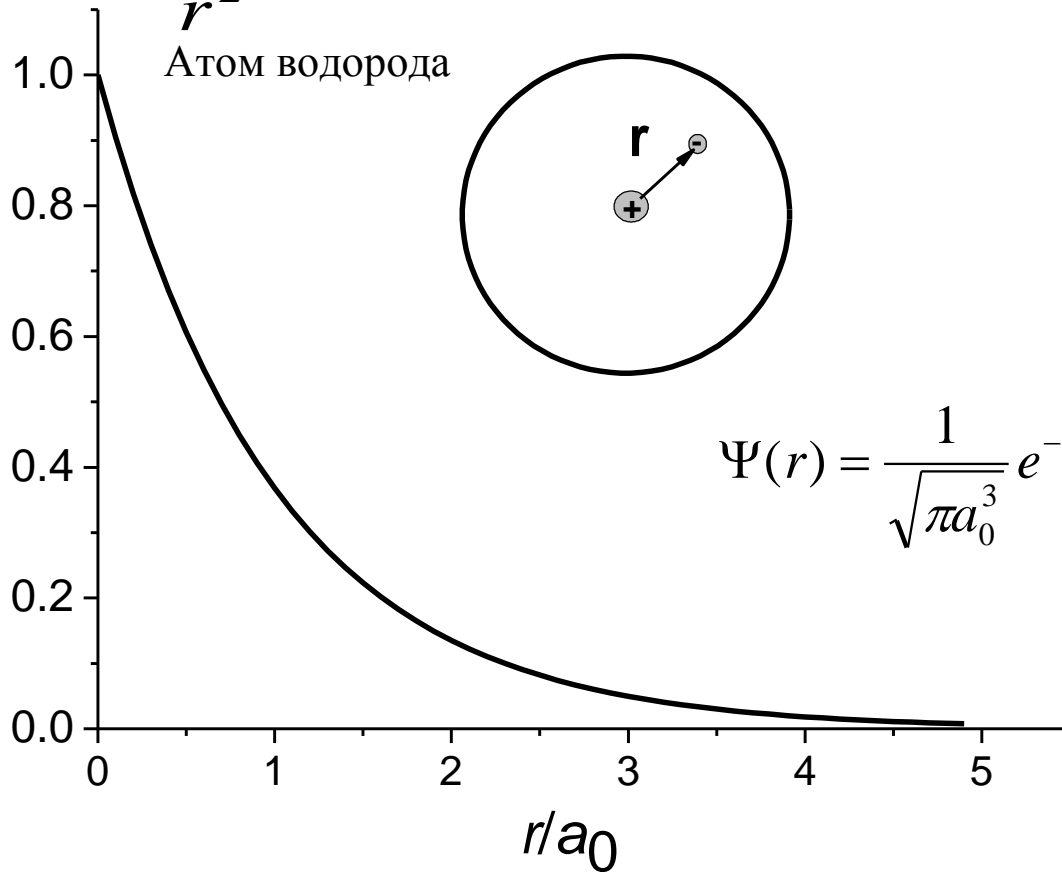
Силы взаимодействия в атоме – электростатические. Закон Кулона:

$$F = \frac{e^2}{r^2} \quad e = 4.8 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ}$$

Атом водорода



$\Psi(r)$ , а.у.



$$\Psi(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$$



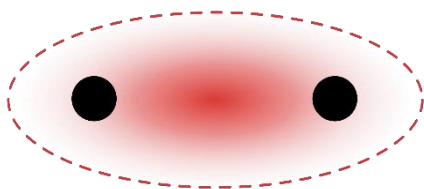
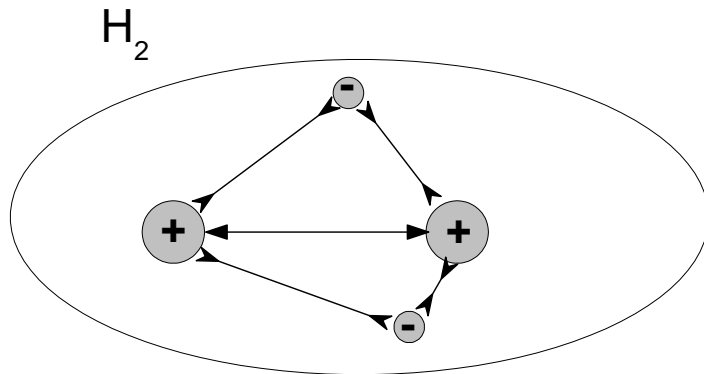
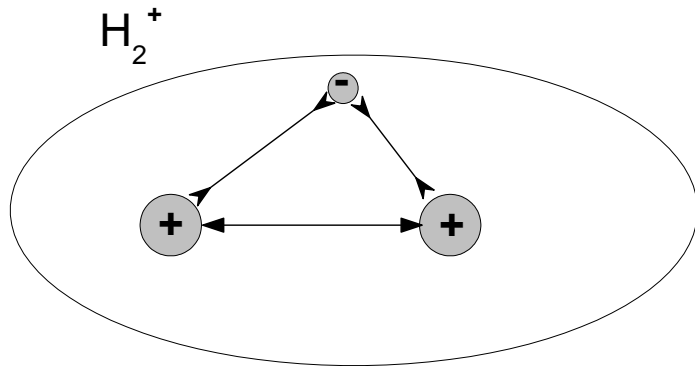
«Электронное облако»

$a_0 = 0.529 \text{ \AA}$ , Ангстрем =  $10^{-8}$  см.

Размер ядер  $10^{-13} - 10^{-12}$  см.

# Молекулы

Атомы соединяются в молекулы. Простейшая молекула  $H_2^+$  (молекулярный ион).

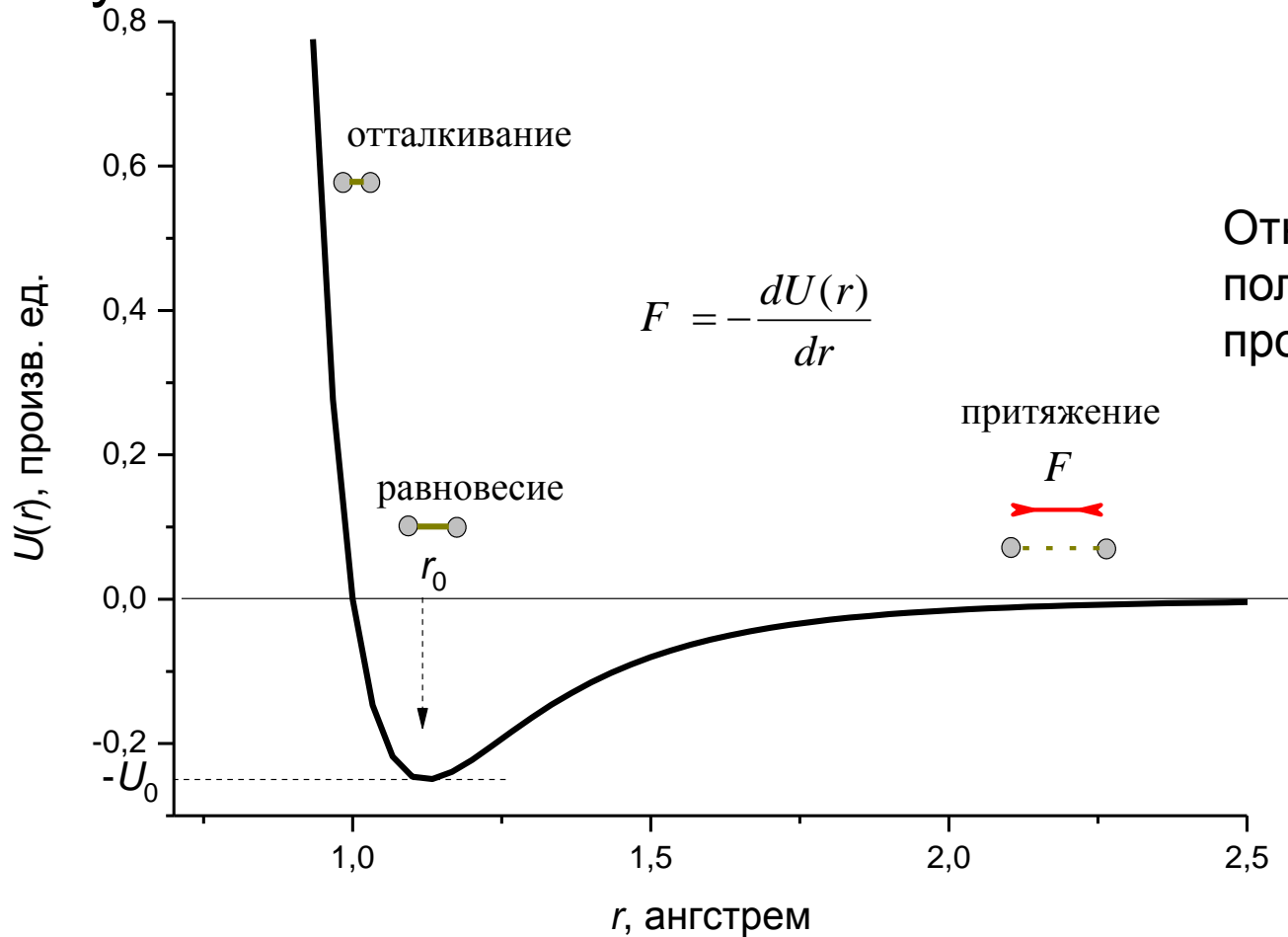


В молекуле электроны как бы «склеивают» атомы – притягиваются к обоим ядрам. Больше электронов – прочнее связь.

В молекуле  $H_2$  два электрона, связь более прочная, чем в  $H_2^+$ .

Квантовомеханический принцип Паули – на одной орбитали может находиться не более двух электронов. Поэтому третьему электрону уже нет места на этой орбитали.

# Взаимодействие двух атомов на расстоянии $r$ в двухатомной молекуле



Молекула	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>
$r_0$	0,75 Å	1,2 Å	2,0 Å
$U_0$	4,5 эв	5,1 эв	2,5 эв

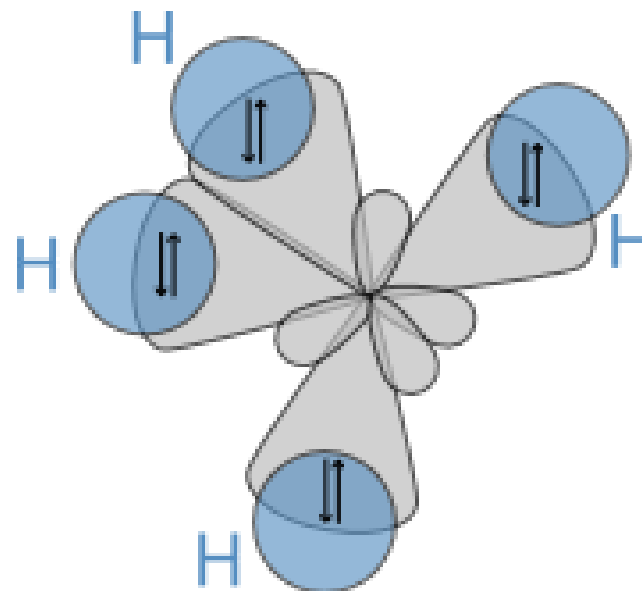
1 электронвольт (эв) = 1,602 176  
 6208(98) · 10<sup>-19</sup> Дж = 1,602 176  
 6208(98) · 10<sup>-12</sup> эрг.

# *Многоатомные молекулы.*

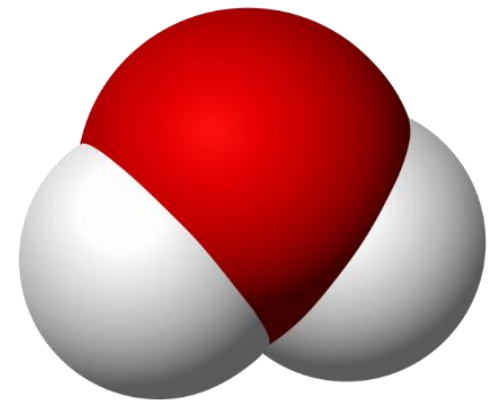
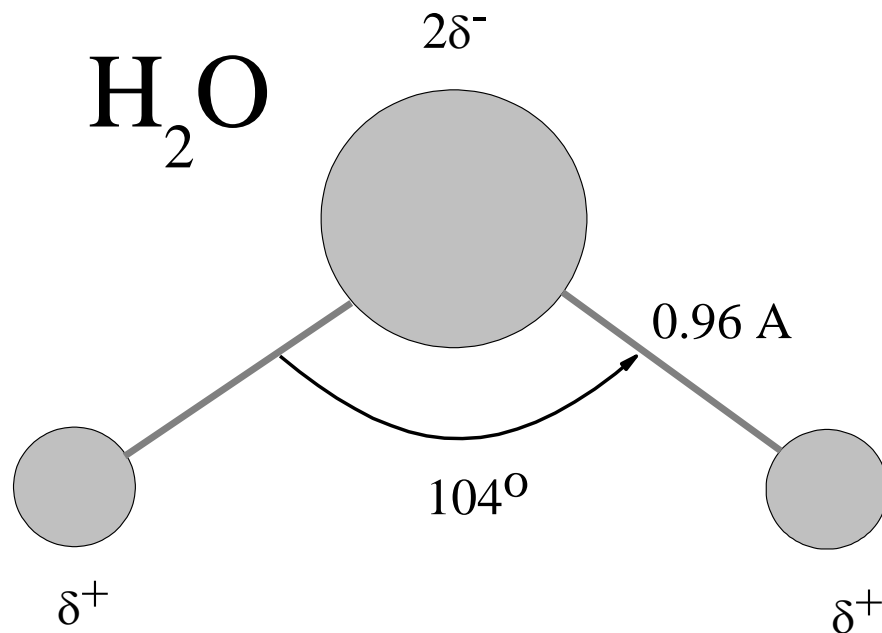
**Валентность** атомов: химическая связь образуется для заполнения незаполненной электронной оболочки атомов, для этого из-за принципа Паули требуется лишь строго определенное количество других атомов.

**Насыщаемость** связей – способность атома образовывать молекулы только с ограниченным числом других атомов.

Молекула метана.  
Тетраэдрическая структура,  
угол между связями  $109^\circ$







Молекулы могут иметь электрический дипольный момент

Массы молекул и атомов измеряются в **атомных единицах массы (а.е.м.)**. Другие названия – дальтон (Да), углеродная единица (у.е.).

1 а. е. м. = 1/12 массы изотопа  $^{12}\text{C}$ .

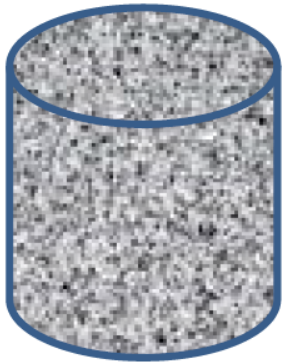
**Атомная масса** (уст. - атомный вес) – масса атома в а.е.м. Величина безразмерная. Атомная масса  $^{12}\text{C}$  равна 12.

**Моль** есть количество вещества, содержащее  $N_A = 6.02214076 \times 10^{23}$  молекул (или атомов, или ионов).  $N_A$  называется **константой Авогадро**, ее размерность моль $^{-1}$ . Моль измеряется в г·моль $^{-1}$ .

Это определение  $N_A$  принято в 2019 г. До этого молярная масса  $^{12}\text{C}$  была 12 г/моль *точно*. С 2019 года она равна 12 г/моль *«примерно»*.

# Агрегатные состояния вещества

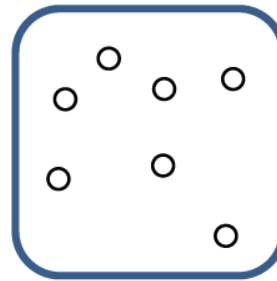
Одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может находиться в разных агрегатных состояниях.



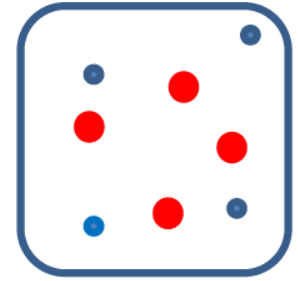
Твердое тело



Жидкость



Газ



Плазма



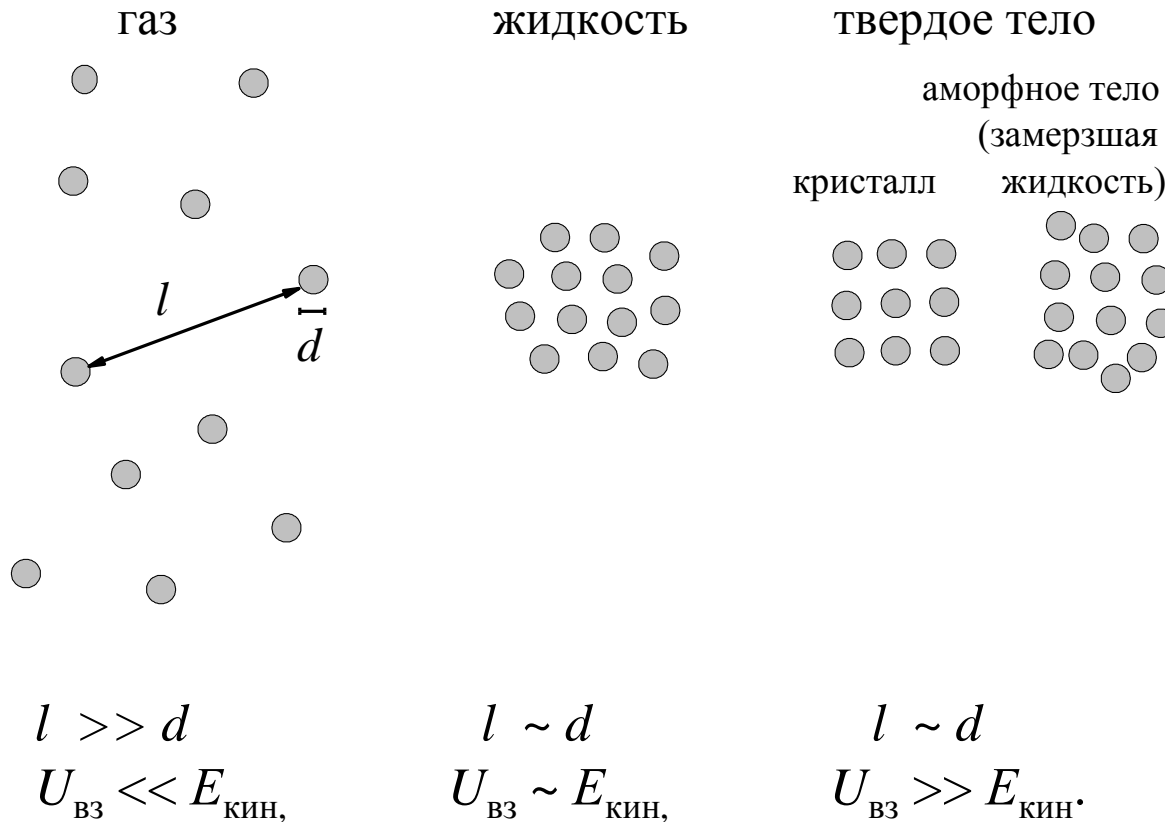
Температура

Твердые тела несжимаемы и не меняют форму.

Жидкости несжимаемы, принимают форму сосуда, в котором находятся.

Газы – легкие вещества, легко сжимаемые, принимающие форму сосудов, в которых находятся.

# Агрегатные состояния с точки зрения молекулярного строения:



Для газов энергия взаимодействия молекул  $U_{вз}$  мала по сравнению со средней их кинетической энергией,  $E_{кин}$ ,  $U_{вз} \ll E_{кин}$ , для жидкостей  $U_{вз} \sim E_{кин}$ , для твердых тел  $U_{вз} \gg E_{кин}$ .

Твердые тела чаще всего кристаллы. Но бывают и аморфные твердые тела – застывшая жидкость.

# Жидкие кристаллы (открыты в 1888 г., 1970-е годы – начало применения в дисплеях)

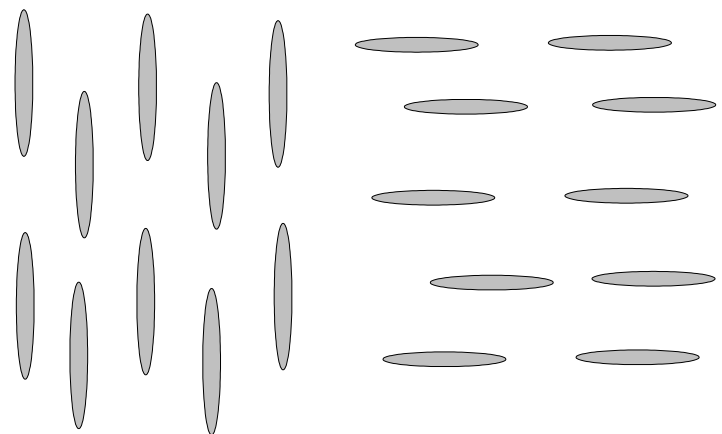
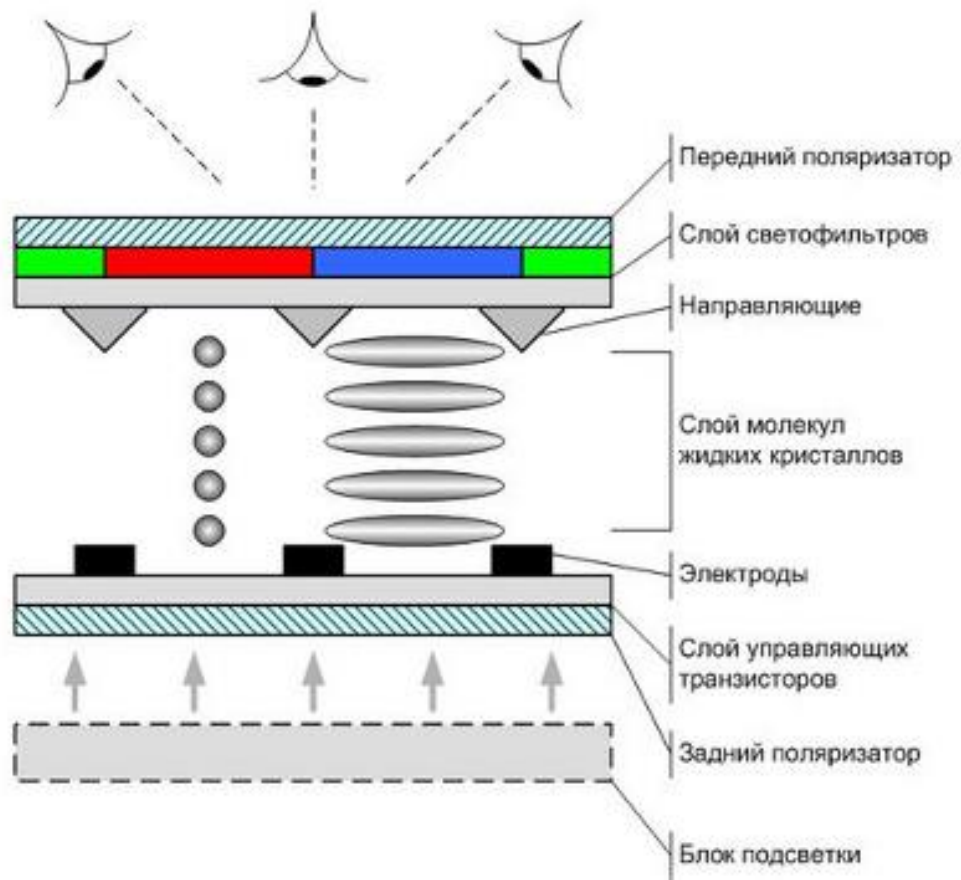
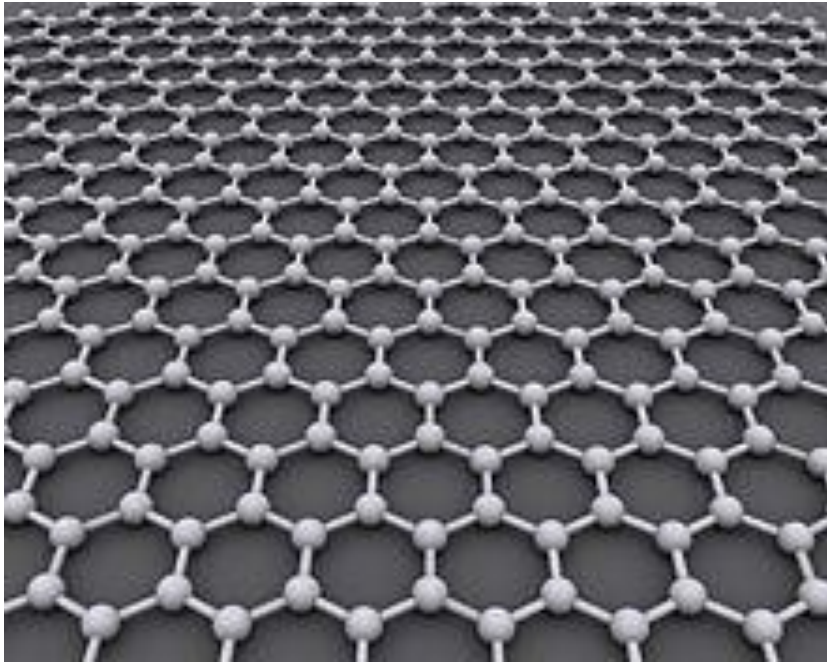


Схема строения ЖК-панели типа IPS

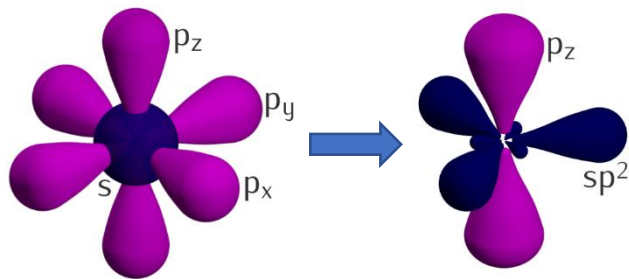


ЖК дисплеи ноутбуков, смартфонов, планшетов и т.д.

Графен – двумерное твердое тело, образованное атомами углерода



2004 – изолирование и характеристика

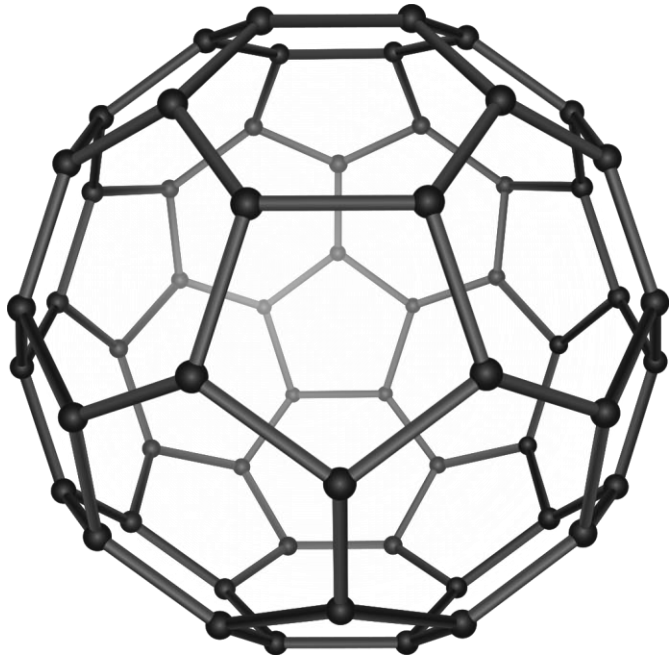


$sp^2$ -гибридизация

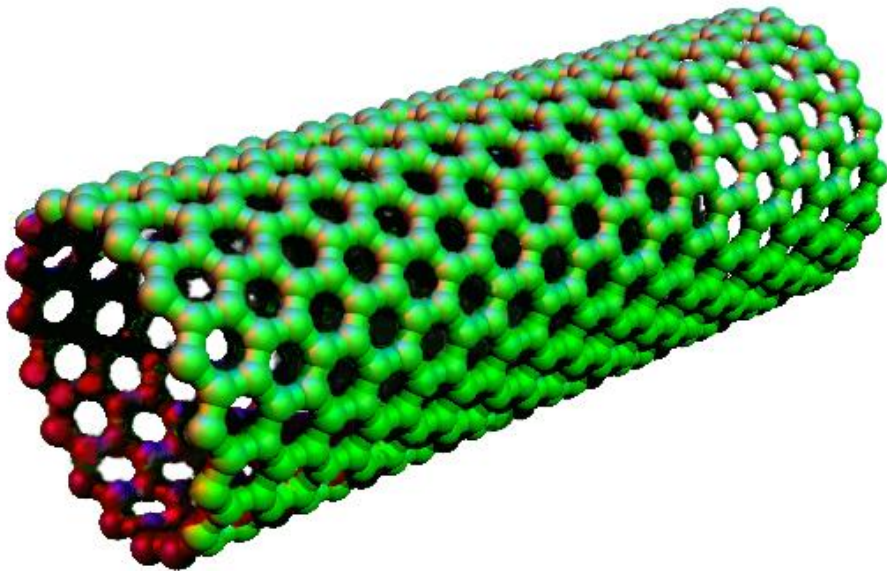
Нобелевская премия 2010 года – Андрей Гейм и Константин Новоселов

Другие соединения  
углерода:

Фуллерены

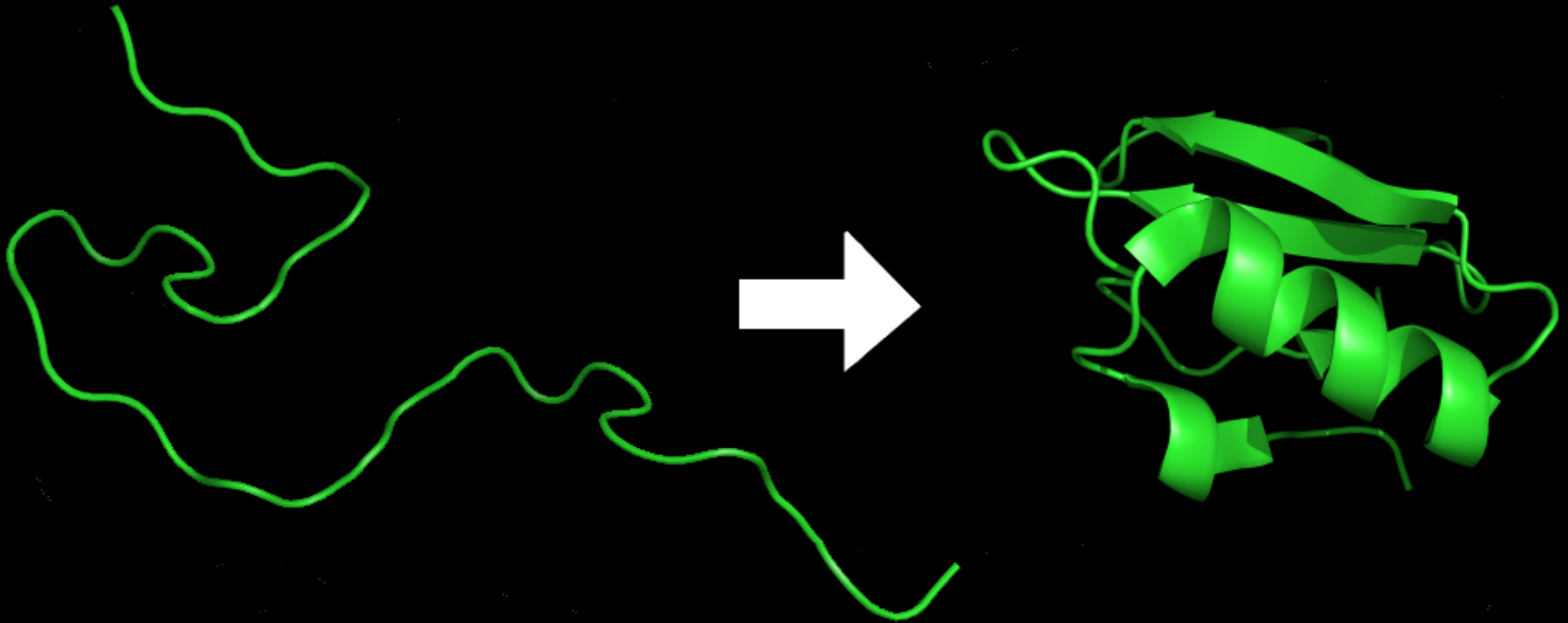


Нанотрубки



# Молекулярная физика биологических систем

Пример существующих здесь проблем:  
складывание белков



Сразу после синтеза в клетке

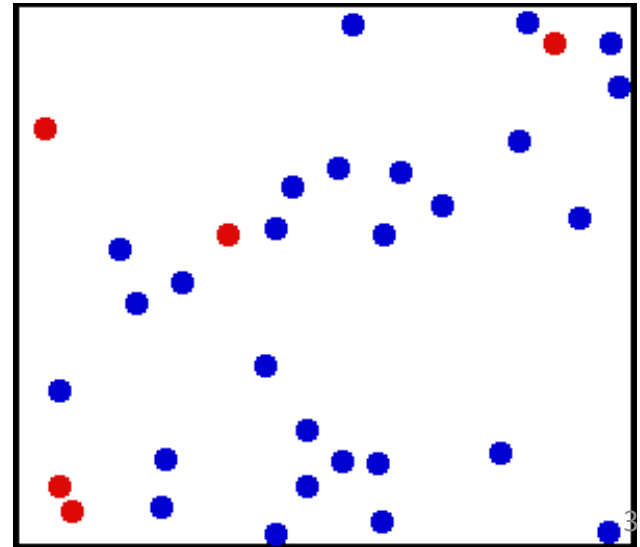
Конечная структура

Белок «знает», как ему складываться?

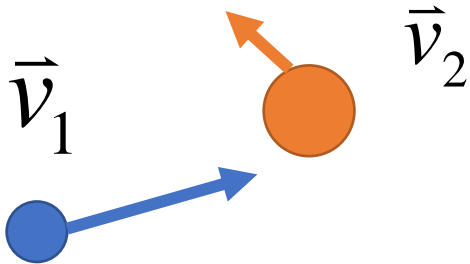


# Идеальный газ, вероятности, функции распределения

Идеальный газ – теоретическая модель газа, в которой пренебрегается взаимодействием между молекулами, за исключением кратких моментов упругих столкновений.



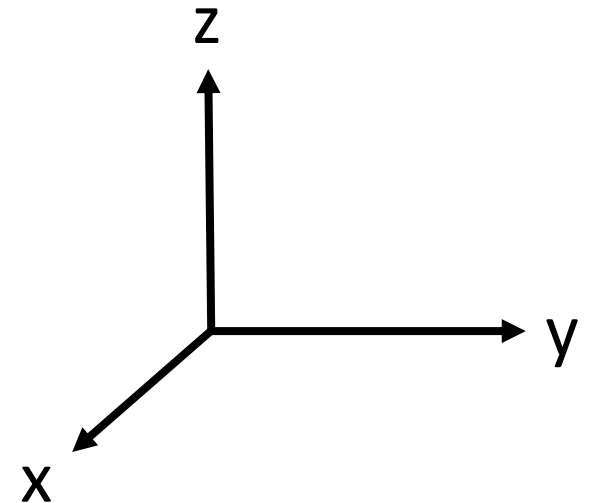
# Гипотеза молекулярного хаоса (Дж. К. Максвелл, 1867)



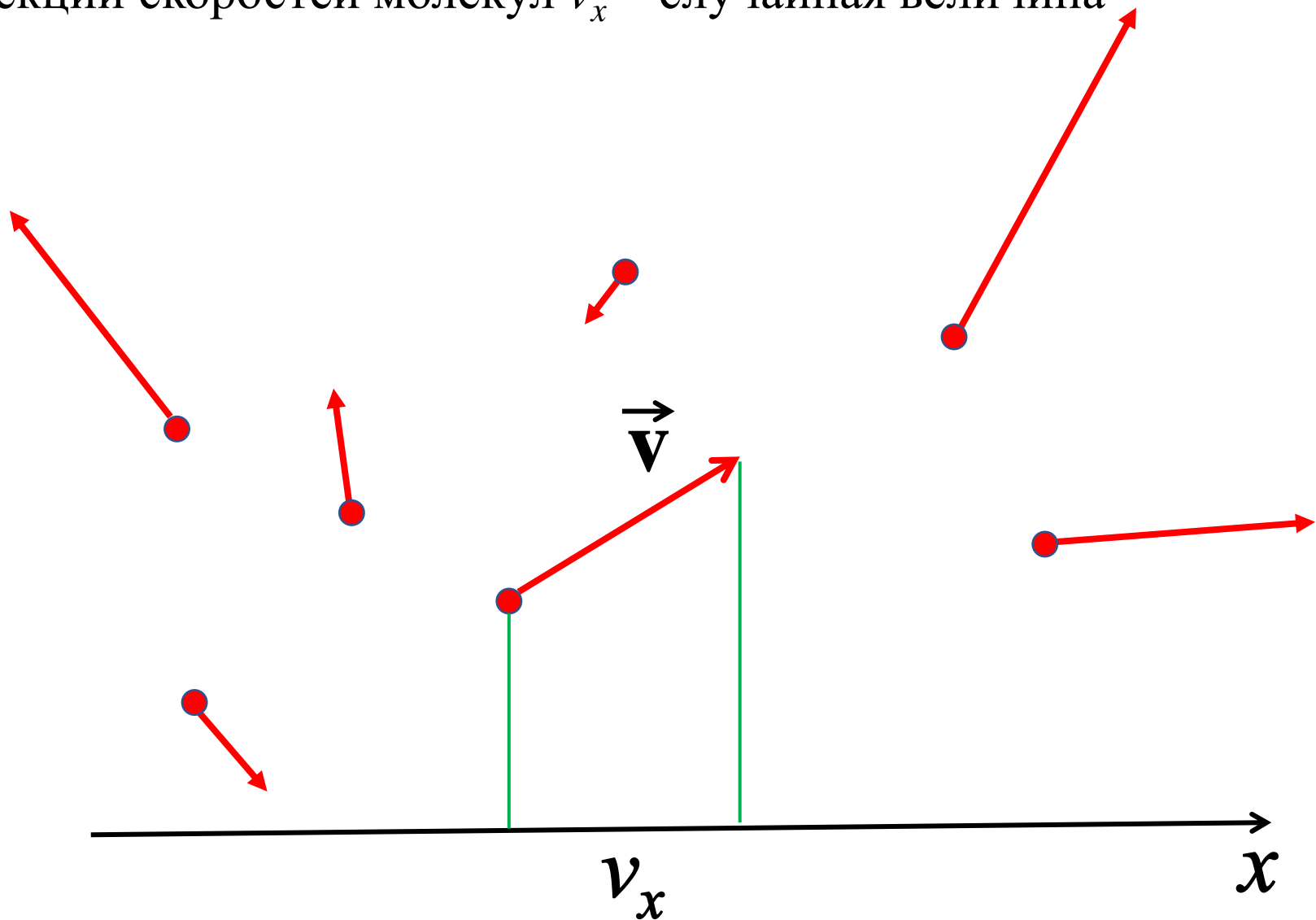
Скорости сталкивающихся частиц некоррелированы между собой (то есть никак между собой не связаны).

Скорости молекул не зависят от их положения в пространстве.

Движение вдоль трех координатных осей пространства происходит некоррелированным образом.



Проекция скорости молекул  $v_x$  – случайная величина



Меняется непрерывно в интервале

$$-\infty < v_x < \infty$$

# Случайные величины, вероятности, средние значения





$$W_i = \frac{1}{2}, \quad (i = 1, \dots, M, \quad M = 2)$$



$$W_i = \frac{1}{6}, \quad (i = 1, \dots, M, \quad M = 6)$$

Вероятность случайного события есть отношение числа появлений этого события к общему числу испытаний

$$W_i = \frac{N_i}{N} \Big|_{N \rightarrow \infty}$$

Сумма вероятностей всех  $M$  событий равна единице

$$\sum_{i=1}^M W_i = 1$$

Припишем каждому событию  $i$  некоторое числовое значение  $A_i$ . Например, что при бросании монеты пусть будет  $A_1 = 0$ ,  $A_2 = 1$ . а при бросании кубика  $A_i$  пусть будет просто  $A_i \equiv i$ . Для последовательных испытаний с номером  $n$  каждого ( $n = 0, 1, 2, \dots, N$ )  $A_i$  для каждого из событий обозначим:

$$A(n) \Big|_{\text{случайным образом}} = \begin{cases} \text{либо } A_1 \\ \text{либо } A_2 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \text{либо } A_M \end{cases}$$

Средним значением называется

$$\bar{A} \equiv \overline{A(n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A(n) \Big|_{N \rightarrow \infty}$$

Все одинаковые величины  $A(n)$  можно сгруппировать в  $M$  групп, в каждой из которых значение  $A(n)$  равно одному и тому же числу  $A_i$ , а число элементов равно  $N_i$ . (Для бросания монеты 2 группы и 6 групп для бросания кубика). Величина среднего тогда:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A(n) \Big|_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M N_i A_i \Big|_{N \rightarrow \infty} = \sum_{i=1}^M W_i A_i$$

Среднее значение квадрата  $\overline{A^2} = \sum_{i=1}^M W_i A_i^2$

Мерой разброса случайной величины служит среднее значение квадрата ее отклонения от среднего значения:

$$\overline{(A(n) - \bar{A})^2} = \overline{A^2} - 2\bar{A}\bar{A} + \bar{A}^2 = \overline{A^2} - \bar{A}^2$$

Это дисперсия случайной величины

**Независимые события A и B:**  
вероятности перемножаются



$$W(AB) = W(A)W(B)$$

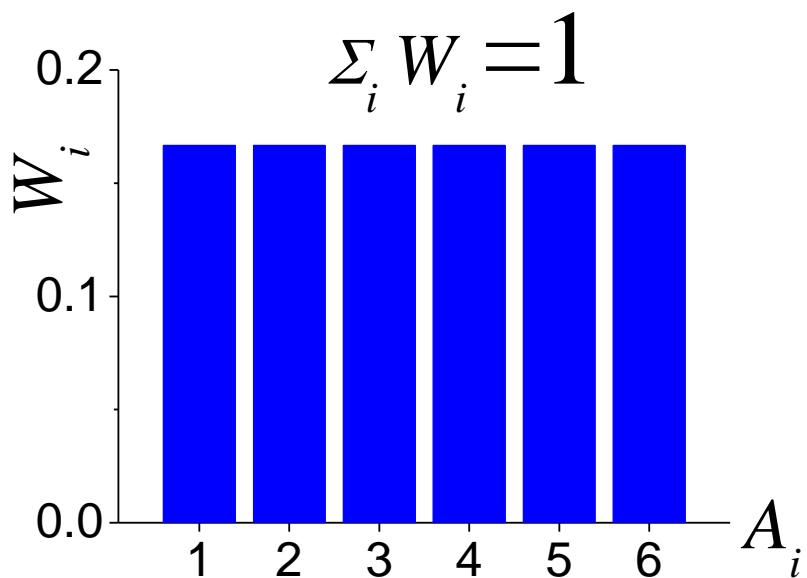
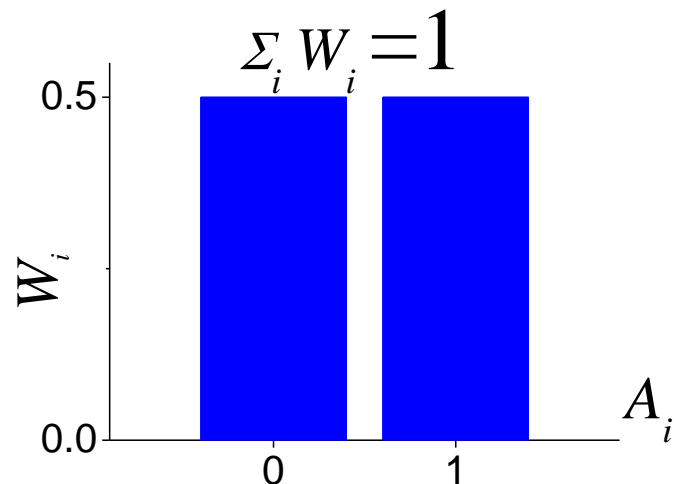
Отсюда следует, что среднее значение события AB

$$\overline{AB} = \sum_{i,j} W_i^A W_j^B A_i B_j = \sum_i W_i^A A_i \sum_j W_j^B B_j = \overline{A} \overline{B}$$

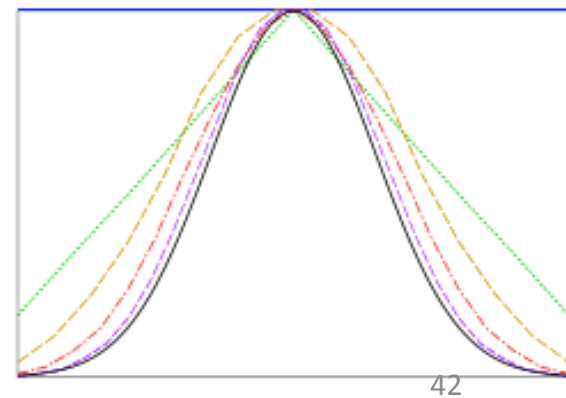
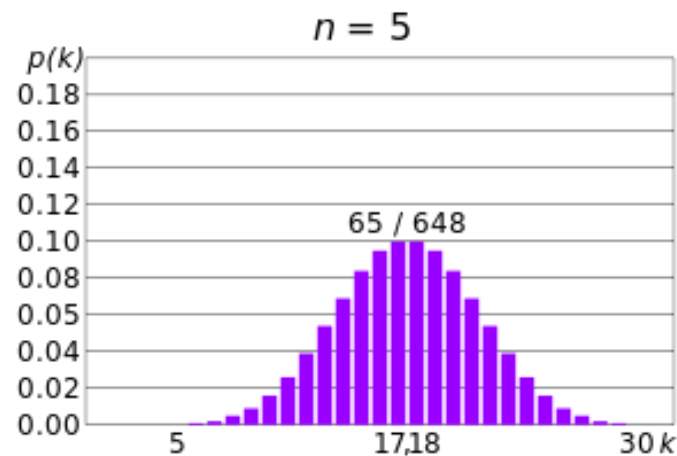
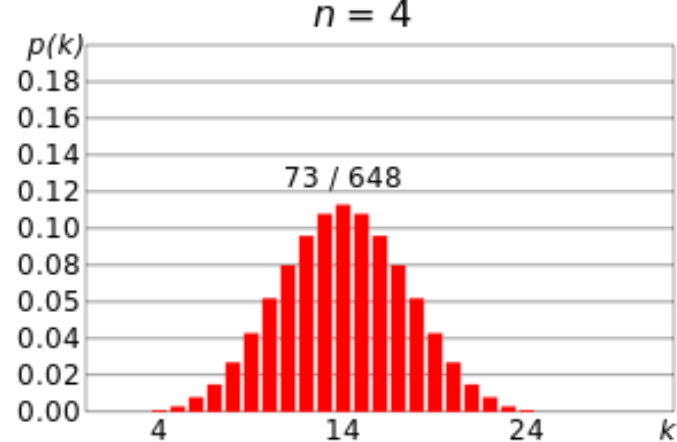
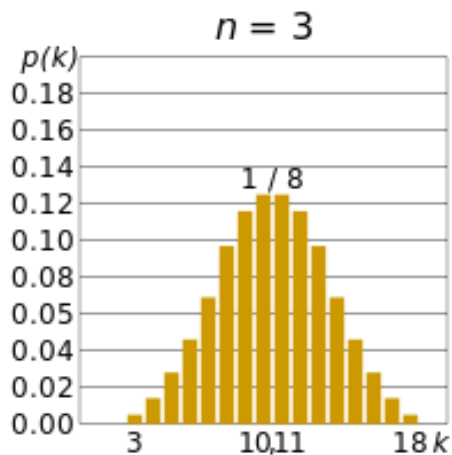
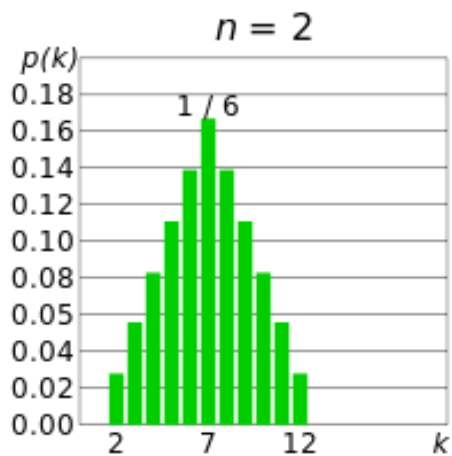
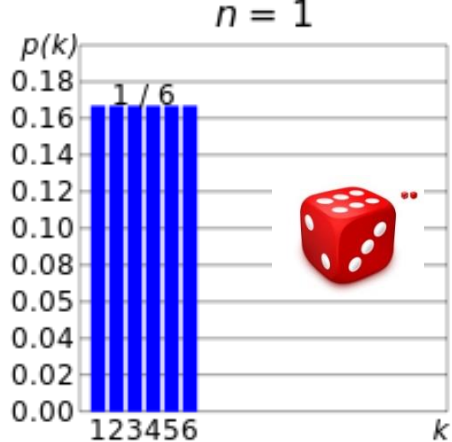
Средние значения тоже перемножаются



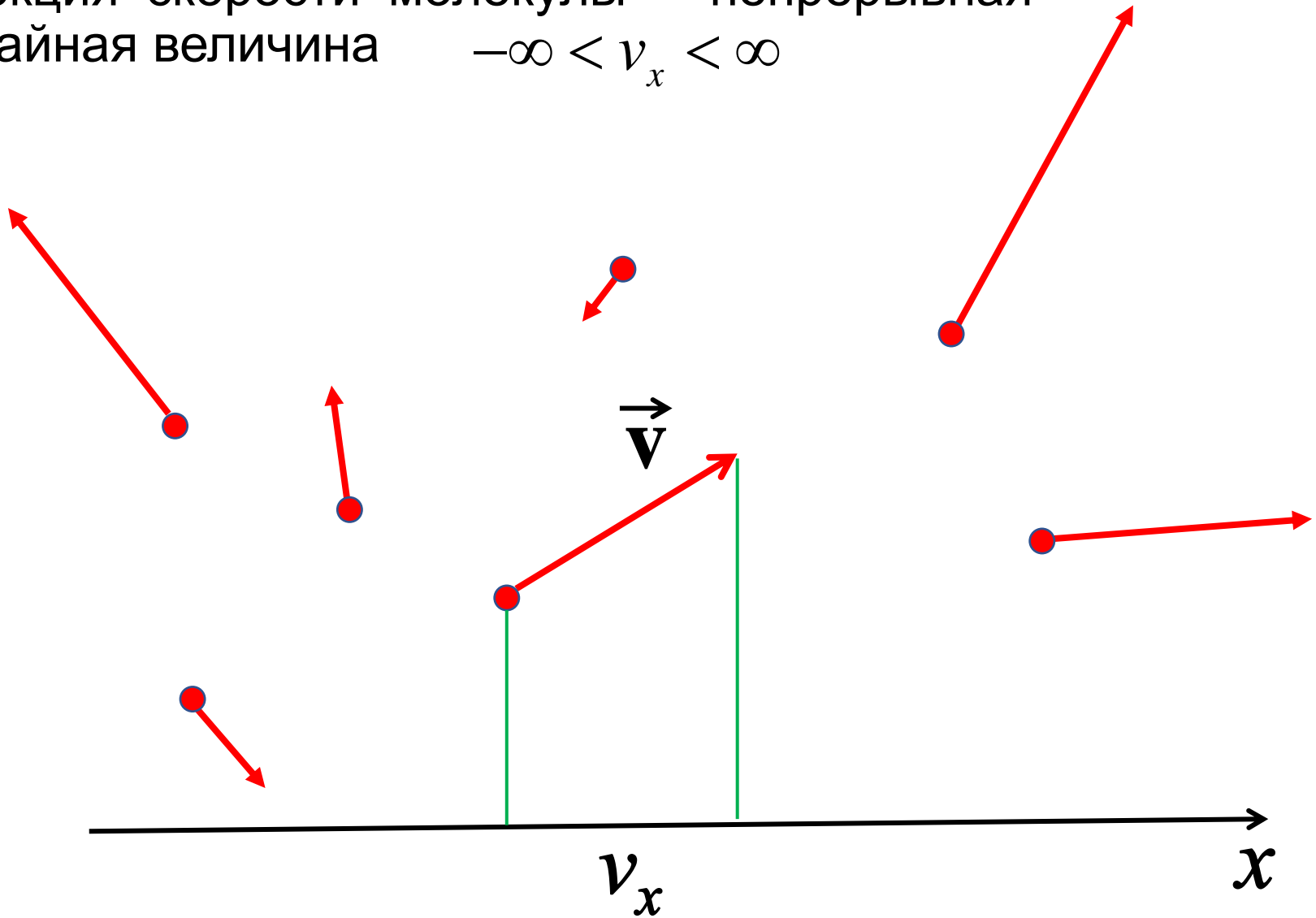
Если вероятности разных событий неодинаковы, удобно ввести понятие функция распределения случайной величины. Это есть набор всех возможных  $W_i$  в зависимости от  $i$



Функция  
распределения суммы,  
выпадающей при  
одновременном  
бросании  $n$  кубиков:



Проекция скорости молекулы – непрерывная случайная величина  $-\infty < v_x < \infty$



**Как построить функцию распределения ?**

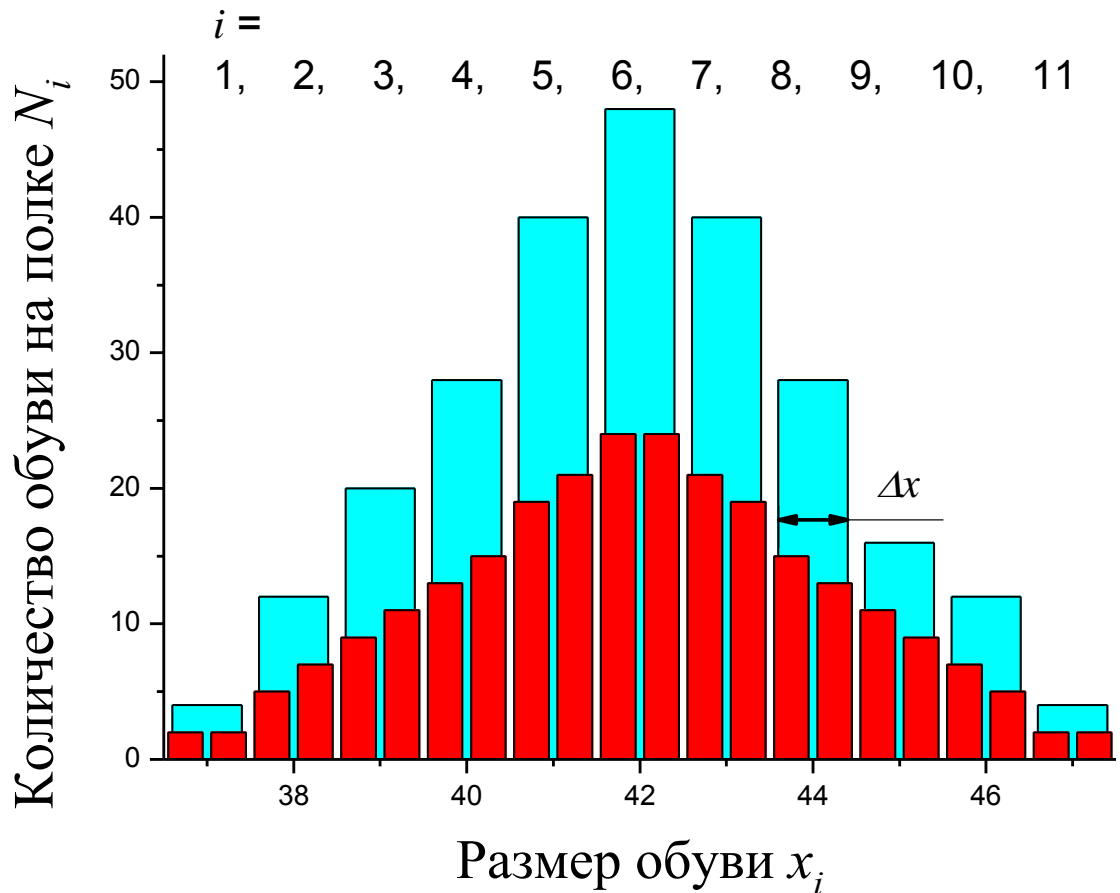
Пример: длина стопы от человека к человеку меняется случайным образом



В магазине размер обуви разложен по дискретным полочкам

$M = 11$  – число полок с разными размерами

$N$  – полное число пар обуви



$$\Delta W_i = \frac{N_i}{N}$$

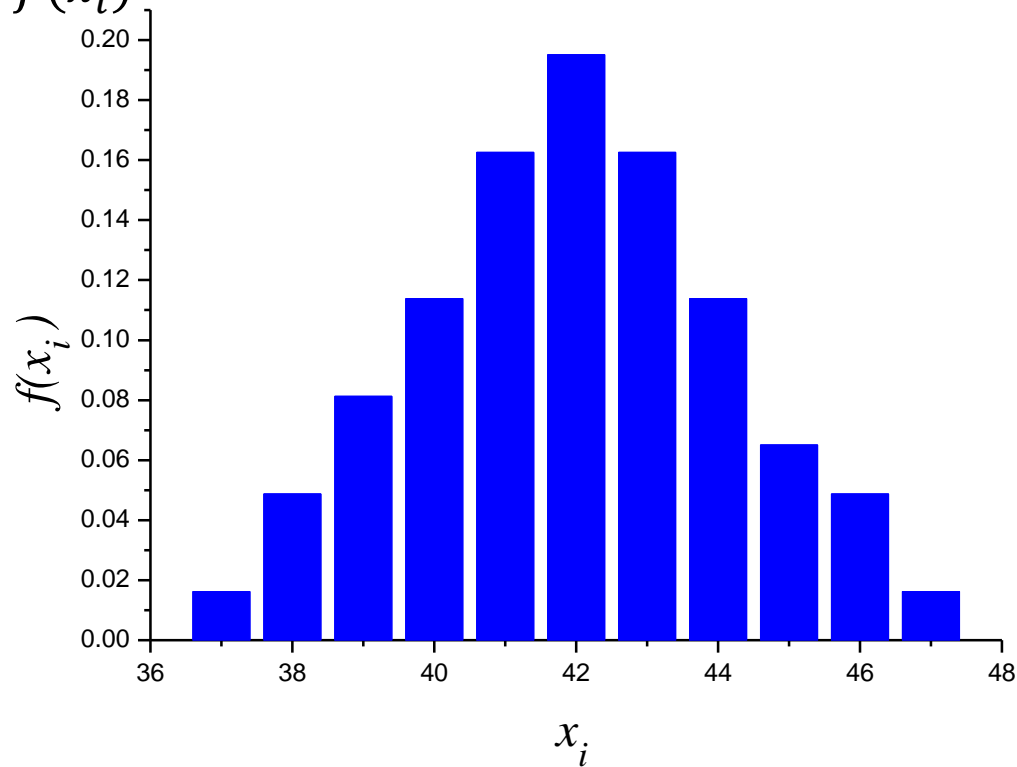
вероятность найти  
обувь данного размера

$$\sum_{i=1}^M \Delta W_i = 1$$

Изменим  $\Delta x$ , тогда  $\Delta W_i$  изменится пропорционально,  $\Delta W_i \approx f(x_i) \Delta x$

$f(x_i)$  – функция распределения. От масштаба разбиения не зависит.

$$\frac{\Delta W_i}{\Delta x} = f(x_i)$$



$$\Delta W_i = f(x_i)\Delta x$$

$$\sum_{i=1}^M f(x_i)\Delta x = \sum_{i=1}^M \Delta W_i = 1$$

Среднее значение: 
$$\bar{x} = \sum_{i=1}^M x_i \Delta W_i = \sum_{i=1}^M x_i f(x_i)\Delta x$$

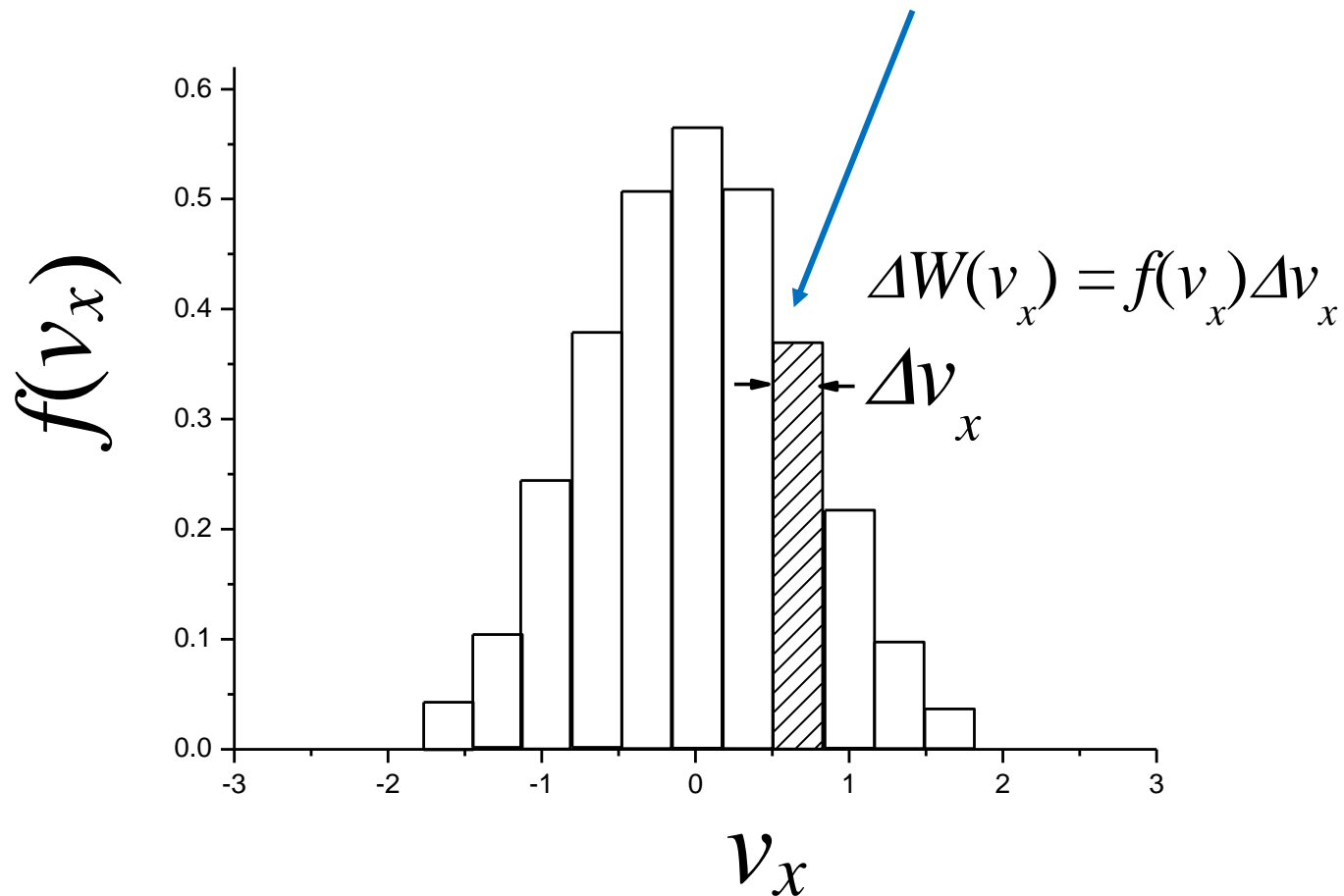
При переходе к скоростям  $v_x$  молекул:

- Роль «размера обуви» играет интервал от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$
- Вероятность данного значения есть  $dW(v_x) = f(v_x)dv_x$
- $f(v_x)$  есть функция распределения

$dv_x$  можно делать дифференциально малым!

Сортируем молекулы по скоростям  $v_x$

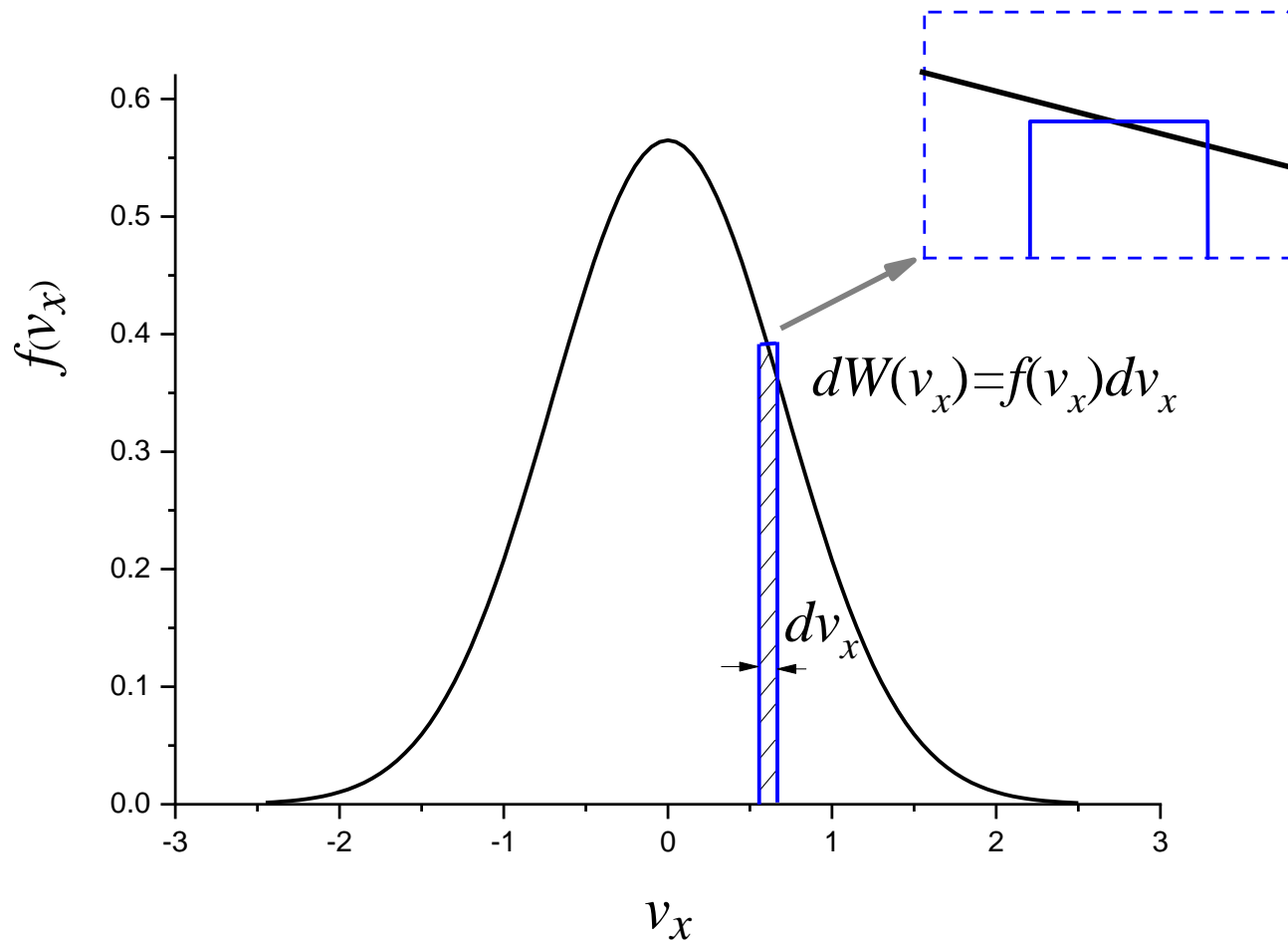
Вводим малый интервал разбиения  $\Delta v_x$



$\Delta W(v_x)$  – вероятность, что скорость попадает в интервал от  $v_x$  до  $v_x + \Delta v_x$ . Пропорциональна  $\Delta v_x$



Делаем  $\Delta v_x$  дифференциально малым – получаем непрерывную функцию распределения по скоростям  $v_x$



Суммы превращаются в интегралы:

$$\bar{v}_x = \int v_x dW(v_x) = \int v_x f(v_x) dv_x \quad (= 0)$$

$$\overline{v_x^2} = \int v_x^2 f(v_x) dv_x$$

Итак.

Вероятность для проекций скоростей  $v_x$  иметь значение в интервале от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$  есть:

$$dW(v_x) = f(v_x)dv_x.$$

Функция  $f(v_x)$  имеет смысл плотности распределения вероятности. Она называется функцией статистического распределения по скоростям движения, или просто *функцией распределения*.