

ФИЗИКА АТОМА
И
АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ

1. Введение

- 1.1. Предмет атомной физики, её краткая история развития, цели и задачи
- 1.2. Основные определения. Электрон, протон, нейтрон, атом, ион, молекула, нуклид, атомное ядро, химический элемент, изотопы
- 1.3. Ядерные и оболочечные свойства атома
- 1.4. Единицы измерения физических величин в атомной физике. Электрон-вольт. Моль, постоянная Авогадро, атомная единица массы, относительная атомная масса. Масштабы энергий, длин, частот, масс в атомной и ядерной физике
- 1.5. Классическая, релятивистская и квантовая физика. Импульс и энергия
- 1.6. Фотон. Шкала энергий фотонов (шкала электромагнитного излучения)

Физика атома

- Атомная физика (физика атома и атомных явлений) — это раздел физики, изучающий строение и свойства атомов, а также элементарные процессы, в которых атомы принимают участие
- Объектами исследования атомной физики являются как атомы, так и молекулы, атомные и молекулярные ионы, экзотические атомы и другие микрочастицы
- В явлениях, изучаемых в рамках атомной физики, основную роль играют электромагнитные взаимодействия
- Результаты исследований в области атомной физики служат основой понимания химической связи, оптических и туннельных явлений, процессов в плазме, нейтральных жидкостях, твёрдых телах (в т. ч. полупроводниках и наноматериалах)
- Теоретической основой самой атомной физики являются квантовая теория и квантовая электродинамика
- Чёткой границы между атомной физикой и другими разделами физики не существует, и в соответствии с международной классификацией, атомная физика включена в область атомной, молекулярной физики и оптики

Краткая история развития атомной физики

- Понятие «атом» употреблялось древнегреческими учеными (V – II веках до н. э.) для обозначения наименьших, неделимых частиц, из которых состоит всё существующее в мире
- Экспериментальные подтверждения атомистических представлений были получены в XIX века в химических и физических исследованиях
- Представление о том, что атом состоит из положительно и отрицательно заряженных частей, было обосновано во второй половине XIX-го века
- В 1897 г. Дж.Дж. Томсоном был открыт электрон, и вскоре доказано, что он является составной частью всех атомов
- Представление об атоме как о системе, состоящей из ядра атомного и электронной оболочки, было обосновано Э. Резерфордом в 1911 году
- После того, как это представление стало общепринятым, из атомной физики выделилась ядерная физика и, несколько позже, физика элементарных частиц

Краткая история развития атомной физики

- Основы современной атомной физики были заложены в начале XX-го века, когда на основе модели атома Э. Резерфорда и развития квантовых представлений М. Планка (1900) и А. Эйнштейна (1905) Н. Бором были даны объяснения ряда важнейших свойств атома (1913) и выдвинуты два «квантовых» постулата
- Согласно первому из них, существуют особые (стационарные) состояния атома, в которых последний не излучает энергии, хотя входящие в его состав заряженные частицы (электроны) совершают ускоренное движение
- Согласно второму постулату, излучение атома происходит при переходе из одного стационарного состояния в другое, а частота ν этого излучения определяется из условия $h\nu = E' - E''$ (правила частот Бора), где h — постоянная Планка, E' и E'' — значения энергии атома в начальном и конечном состояниях
- Первый постулат отражает факт устойчивости атома, второй — дискретность частот в атомных спектрах

Краткая история развития атомной физики

- На смену теории Бора, которая оказалась не в состоянии исчерпывающим образом объяснить свойства атомов и молекул, пришла последовательная квантовая теория, созданная в 20-х – 30-х годах XX-го века (В. Гейзенберг, Э. Шрёдингер, П. Дирак)
- Тем не менее, постулаты Бора по-прежнему сохраняют свою значимость и неотъемлемым образом входят в основы физики микроскопических явлений
- В рамках современной квантовой теории дано максимально полное объяснение свойств атома: принципы формирования оптических и рентгеновских спектров, поведение атомов в магнитных (эффект Зеемана) и электрических (эффект Штарка) полях, получили теоретическое обоснование периодическая система элементов и природа химической связи, были разработаны методы расчёта электронной структуры атомов, молекул и твёрдых тел (метод самосогласованного поля Хартри – Фока), созданы новые устройства для изучения структуры и свойств вещества (электронный микроскоп)
- Развитие идей квантовой теории (гипотеза спина, принцип Паули и др.), в свою очередь, опиралось на экспериментальные исследования в области атомной физики (линейчатые спектры атомов, фотоэффект, тонкая и сверхтонкая структура спектральных линий, опыты Франка и Герца, Дэвиссона и Джермера, Штерна и Герлаха, эффект Комптона, открытие дейтерия и других изотопов, эффект Оже и др.)

Краткая история развития атомной физики

- Во второй трети XX-го века в рамках атомной физики и на основе идей квантовой теории были разработаны новые экспериментальные методы физических исследований: электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС), спектроскопия электронного удара (СЭУ), созданы устройства для их осуществления (мазер, лазер и др.)
- Непосредственное экспериментальное подтверждение получили фундаментальные принципы квантовой теории (интерференция квантовых состояний, лэмбовский сдвиг уровней и др.), предложены новые методы расчёта электронной структуры вещества (теория функционала плотности), предсказаны новые физические явления (сверхизлучение)
- Разработаны методы экспериментальных исследований процессов, происходящих с одиночными атомами, ионами и электронами, удерживаемыми электрическим и магнитным полями специальной конфигурации (атомными и ионными «ловушками»)

Краткая история развития атомной физики

- Новые результаты в области атомной физики последней трети XX-го – начала XXI века в основном связаны с использованием лазеров
- В научной практике широко применяются методы лазерной спектроскопии, в т. ч. нелинейной, на основе которых появилась возможность осуществлять спектроскопические измерения с одиночными атомами и молекулами, определять характеристики высоковозбуждённых состояний атомов, исследовать динамику внутриатомных и внутримолекулярных процессов длительностью до нескольких фемтосекунд (10^{-15} с)
- С помощью лазеров удалось осуществить и детально исследовать многофотонные процессы взаимодействия излучения с атомными системами (многофотонный фотоэффект, умножение частоты), а также охлаждение отдельных атомов до сверхнизких температур
- Теоретические исследования последних десятилетий в области атомной физики связаны со стремительным прогрессом вычислительной техники и направлены на разработку эффективных методов и средств расчёта электронной структуры и свойств многоэлектронных атомных систем с учётом энергии электронной корреляции, релятивистских квантово-механических и квантово-электродинамических поправок

Атомная физика

- Исследования в области атомной физики нашли множество научных и практических применений
- В промышленных целях для определения элементного состава вещества используются методы атомного спектрального анализа, включая ЭПР, ФЭС и СЭУ
- Для решения геологических, биологических и медицинских задач используются методы дистанционного и локального лазерного спектрального атомного анализа, в промышленных и технических целях осуществляется лазерное разделение изотопов
- Экспериментальные и теоретические методы атомной физики находят применение в астрофизике (определение состава и физических характеристик вещества звёзд и межзвёздной среды, исследование ридберговских атомов), метрологии (атомные часы) и других областях науки и техники

Цели и задачи курса атомной физики

- Основная **цель** дисциплины «Физика атома и атомных явлений», как части курса общей физики, заключается в формировании базовых знаний по физике микроскопических явлений на атомно-молекулярном уровне и умения применять их для решения прикладных проблем
- Для достижения этой цели решаются следующие **задачи**:
 - анализ развития атомистических и становления квантовых представлений;
 - изучение важнейших экспериментальных фактов атомной физики и их взаимосвязи;
 - выявление специфики микроявлений и несостоятельности классической теории для их объяснения;
 - изучение основ квантовой механики и методов решения квантово-механических задач;
 - систематическое изучение и объяснение на основе квантовой теории строения и свойств атомов и молекул, их поведения во внешних полях и во взаимодействии друг с другом

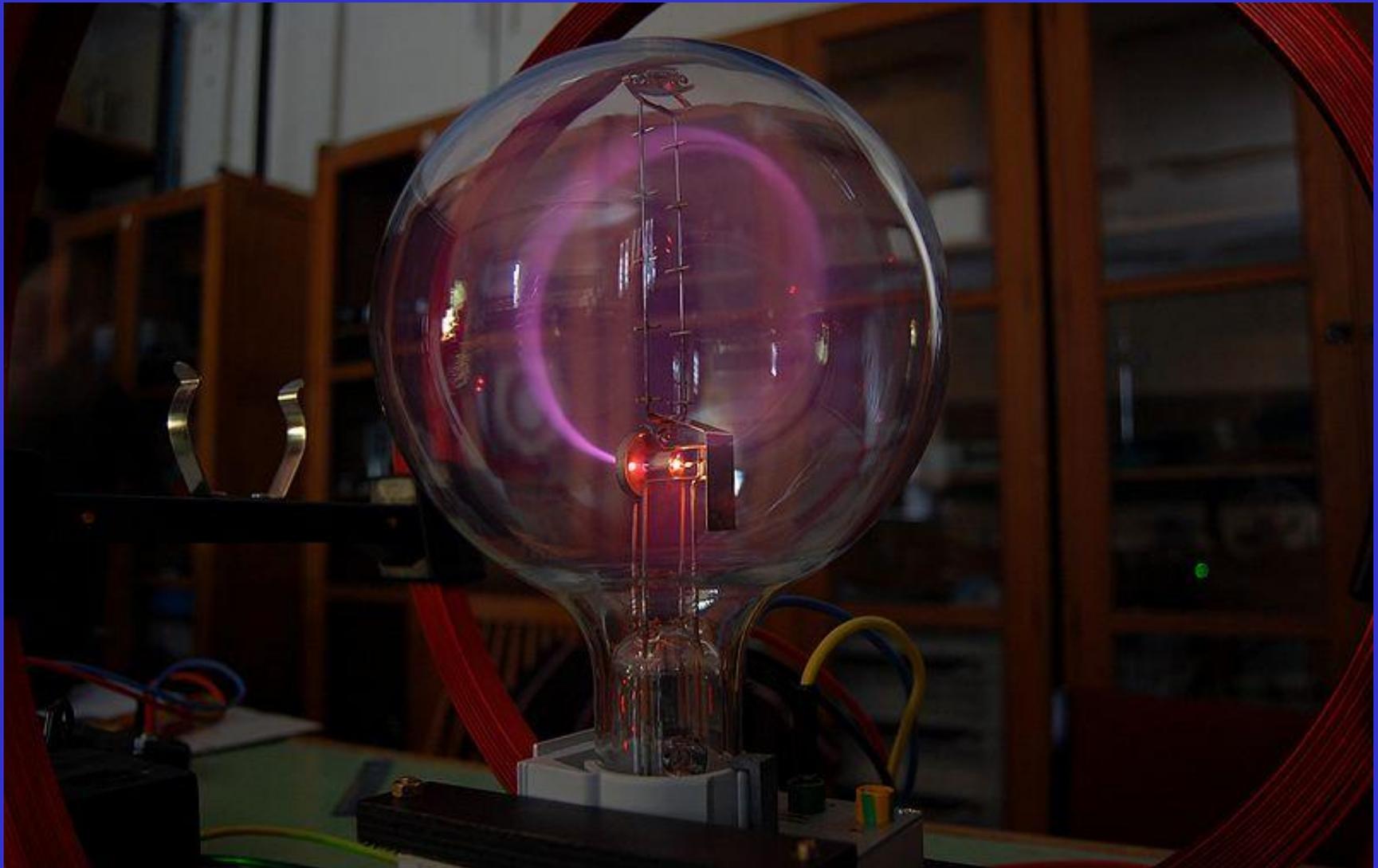
ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ:

ЭЛЕКТРОН, ПРОТОН,
НЕЙТРОН, АТОМ, ИОН,
МОЛЕКУЛА, НУКЛИД,
АТОМНОЕ ЯДРО,
ХИМИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ,
ИЗОТОПЫ

Электрон

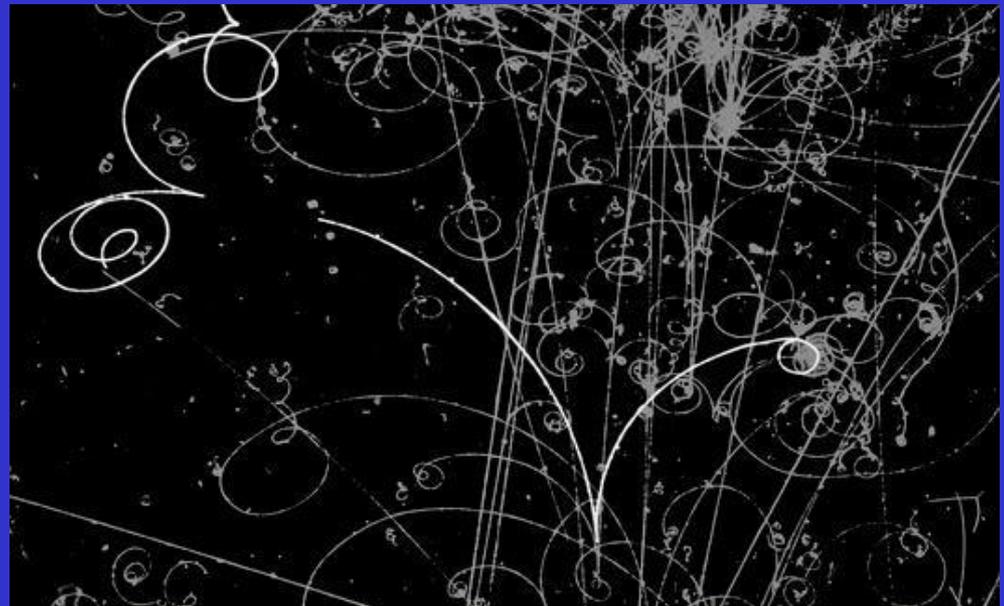
- Электрон — стабильная элементарная частица с отрицательным электрическим зарядом
- Абсолютная величина заряда электрона равна элементарному заряду $q_e = -e \approx -1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл
- Масса электрона $m_e = m \approx 9.11 \cdot 10^{-31}$ кг
- Спин электрона равен $\frac{1}{2}$
- Магнитный момент электрона по модулю примерно равен магнетону Бора $\mu_e \approx -\mu_B \approx -0.579 \cdot 10^{-4}$ эВ/Тл
- Для обозначения электрона используются символ e или e^-
- Электроны образуют электронные оболочки всех атомов и ионов
- Электрон имеет античастицу — позитрон (e^+)

Пучок электронов в магнитном поле



Электрон и позитрон

- Спиральные треки электронов и позитронов в камере Вильсона
- Электрон и позитрон рождаются в результате распада гамма-кванта
- Треки электронов закручены по часовой стрелке, позитронов — против

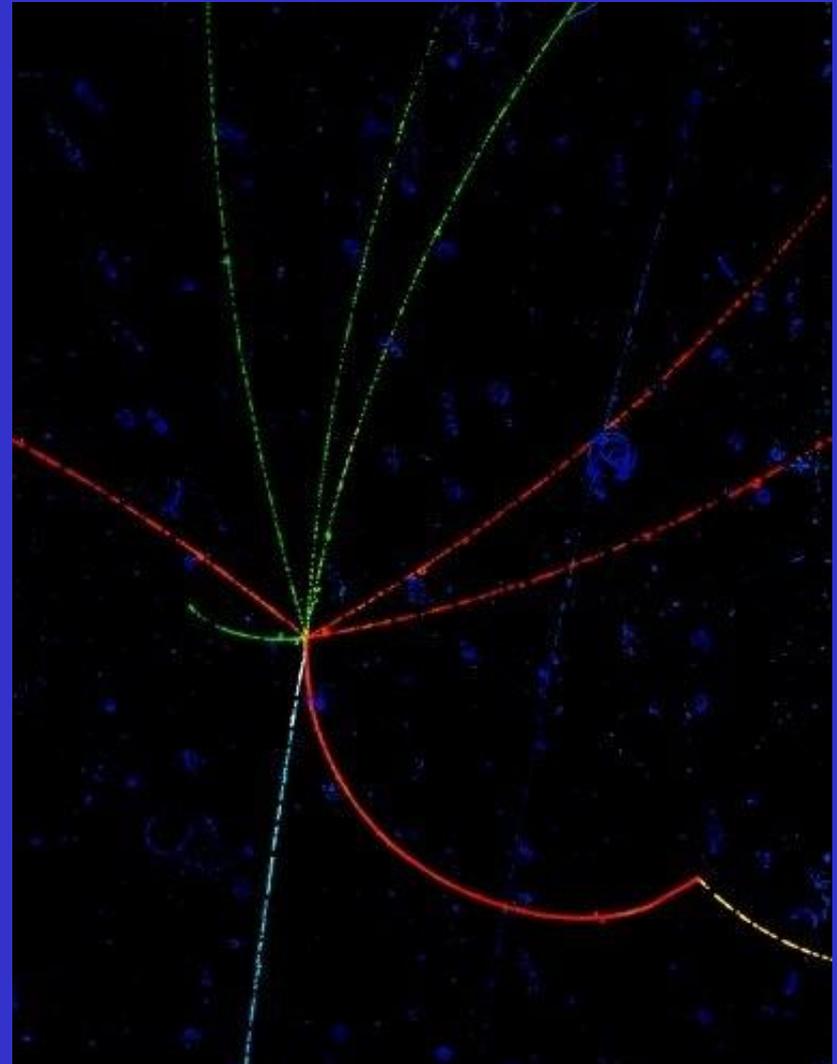


Протон

- Протон — стабильная элементарная частица с положительным электрическим зарядом
- Заряд протона равен элементарному заряду $q_p = e \approx 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл
- Масса протона $m_p \approx 1836m_e \approx 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
- Спин протона равен $\frac{1}{2}$
- Магнитный момент протона $\mu_p \approx 8.803 \cdot 10^{-8}$ эВ/Тл
- Протон обозначается символом p или p^+
- Протон имеет античастицу — антипротон (p^-)

Аннигиляция антипротона

- Антипротон (голубой трек) сталкивается с протоном в пузырьковой камере
- В результате возникают четыре положительных пиона (красные треки) и четыре отрицательных (зелёные треки)
- Жёлтый трек принадлежит мюону, который рождается в результате распада пиона



Нейтрон

- Нейтрон — элементарная частица с нулевым электрическим зарядом
- Время жизни нейтрона в свободном состоянии составляет примерно 886 с
- Масса нейтрона $m_n \approx 1839m_e \approx 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
- Спин нейтрона равен $\frac{1}{2}$
- Несмотря на отсутствие электрического заряда, нейтрон обладает магнитным моментом $\mu_n \approx -6.030 \cdot 10^{-8}$ эВ/Тл
- Нейтрон обозначается символом n или n^0
- Нейтрон имеет античастицу — антинейтрон
- Протоны и нейтроны объединяют общим названием нуклоны
- Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов

Нейтрон

- Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, они не оставляют треков в камерах-детекторах частиц
- Тем не менее нейтроны можно обнаружить по результатам их взаимодействия с другими, заряженными, частицами
- Расцветченное изображение показывает треки частиц в камере Вильсона, наполненной смесью газообразного водорода, этилового спирта и воды
- Пучок нейтронов проникает в камеру снизу и вызывает трансмутации атомов кислорода и углерода, входящих в состав молекул этилового спирта

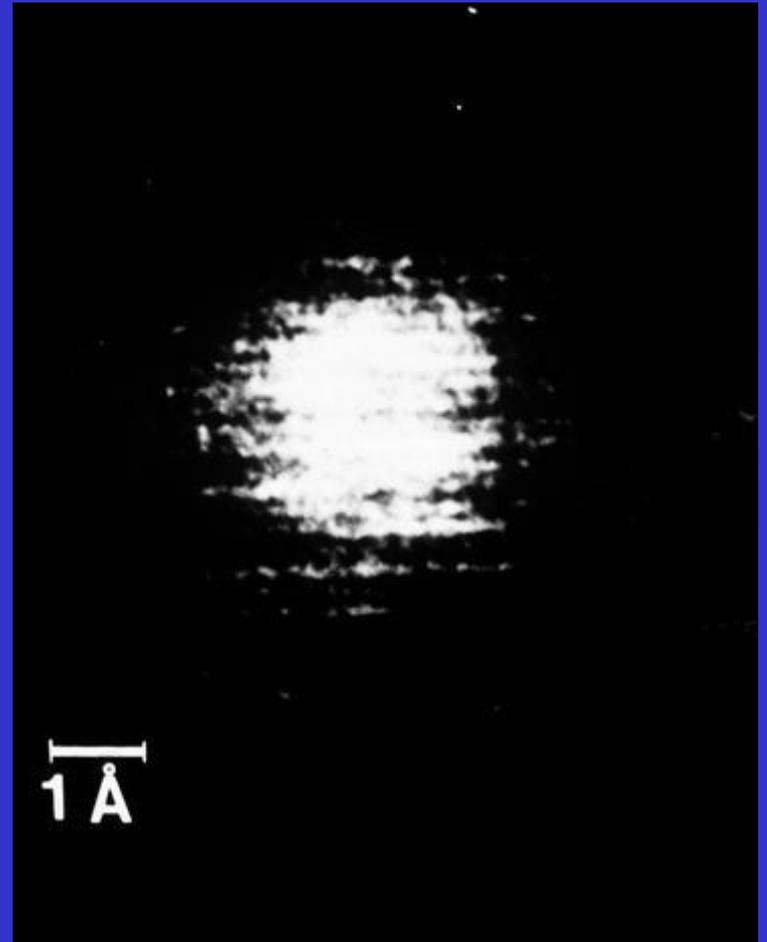


АТОМ

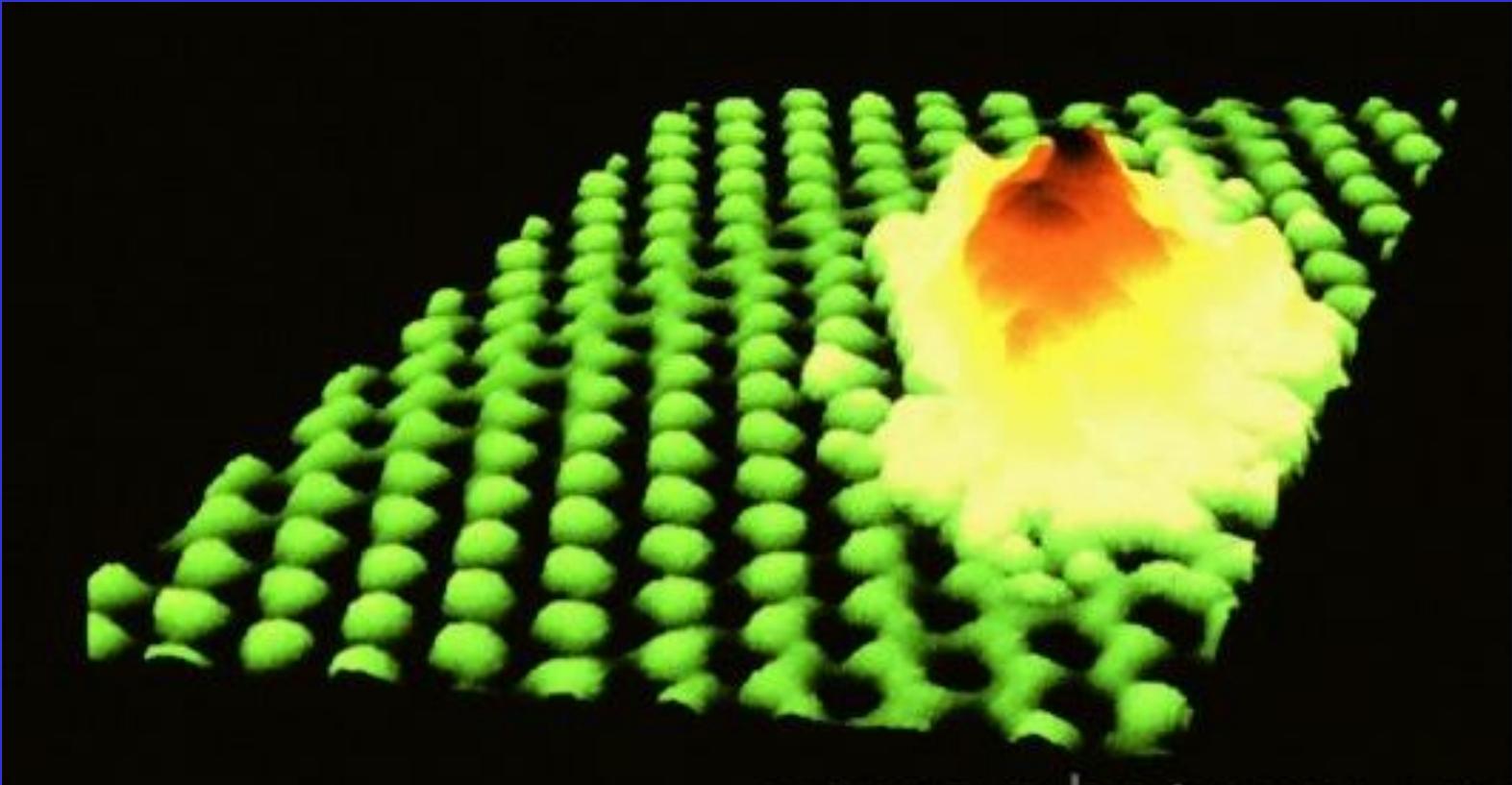
- Атом — микрочастица, состоящая из атомного ядра и окружающих его электронов (электронной оболочки)
- Положительно заряженное ядро удерживает отрицательно заряженные электроны силами электрического притяжения
- Поскольку ядро атома состоит из протонов и нейтронов, и при этом электрический заряд нейтрона равен нулю, протона — элементарному заряду e , заряд электрона равен $-e$, то при числе электронов в оболочке, равном числу протонов в ядре, суммарный электрический заряд атома равен нулю
- Размеры ядра ($\sim 10^{-15} - 10^{-14}$ м) крайне малы по сравнению с размерами атома ($\sim 10^{-10}$ м), однако из-за того, что масса протона (как и нейтрона) почти в 2 тысячи раз больше массы электрона, практически вся масса атома ($\approx 99.97\%$) сосредоточена в ядре

Атом золота Au

- Изображение отдельного атома золота получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа
- Увеличение в 30 000 000 раз до размера в 35 нм



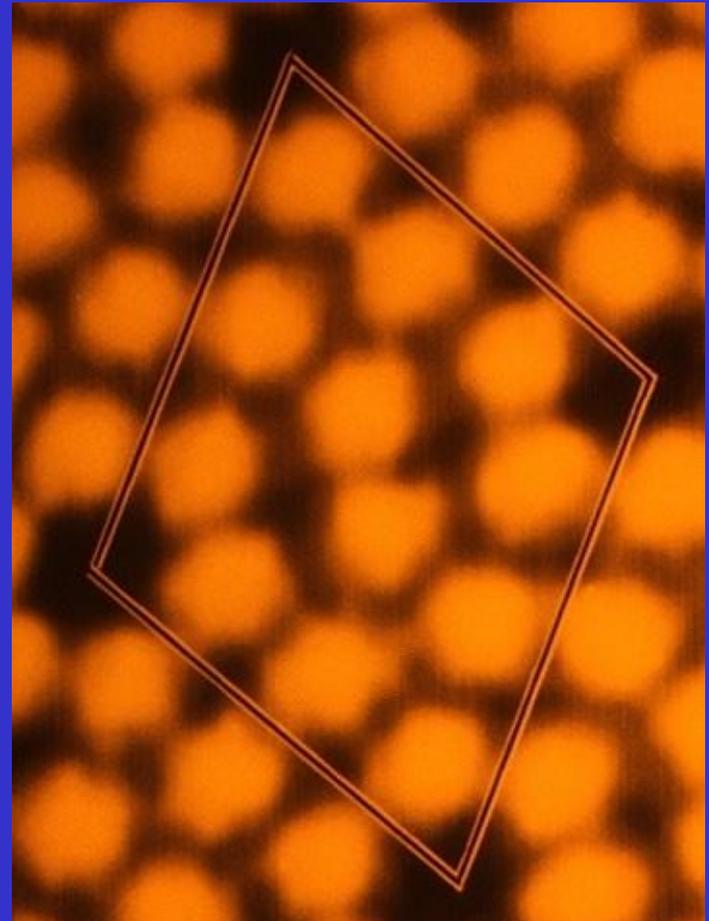
АТОМЫ ЗОЛОТА Au



Расцветченное изображение атомов золота на графитовой подложке получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа

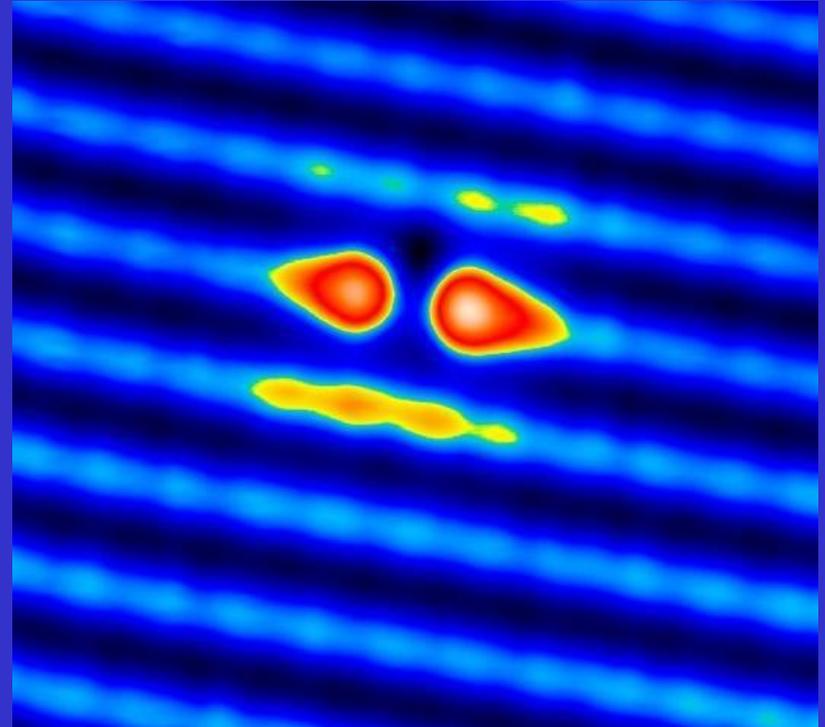
Атомы кремния Si

- Расцветченное изображение атомов кремния получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа
- Показана элементарная ячейка кристалла. Также видны связи между атомами
- Увеличение в 45 000 000 раз до размера в 35 мкм



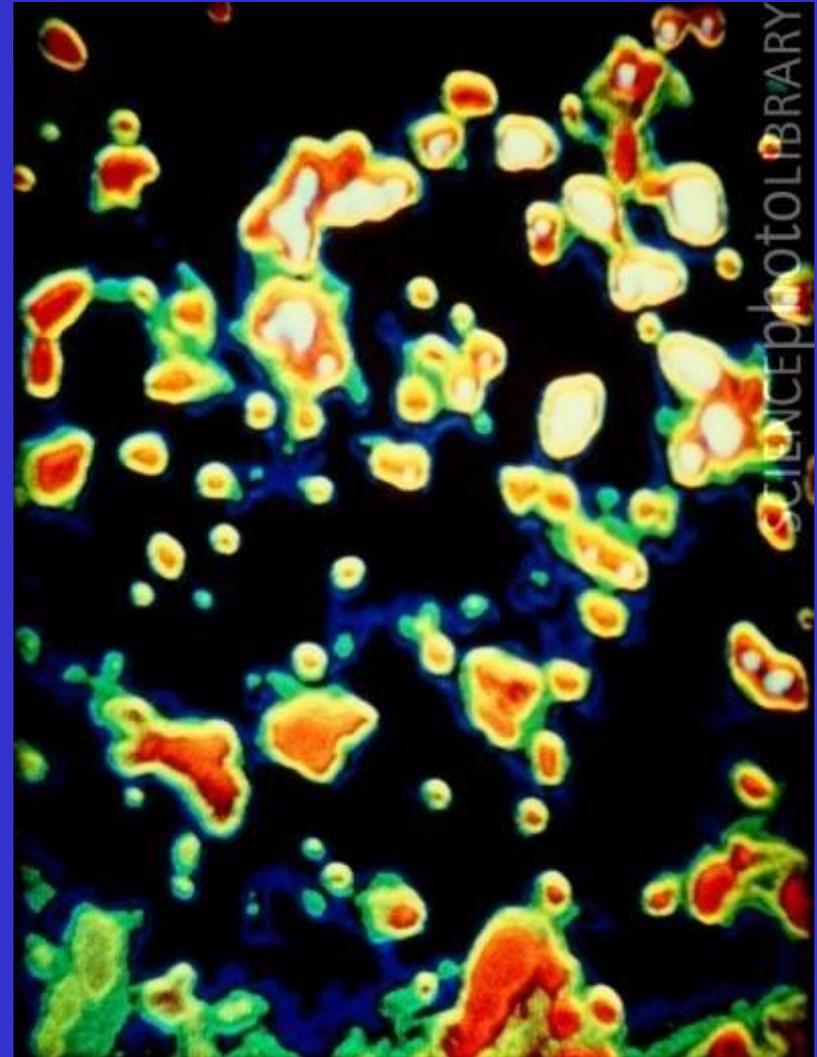
АТОМЫ марганца Mn

- Расцветченное изображение атомов марганца получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа
- Изображение демонстрирует отталкивание двух атомов марганца, внедрённых в полупроводниковый кристалл арсенида галлия GaAs



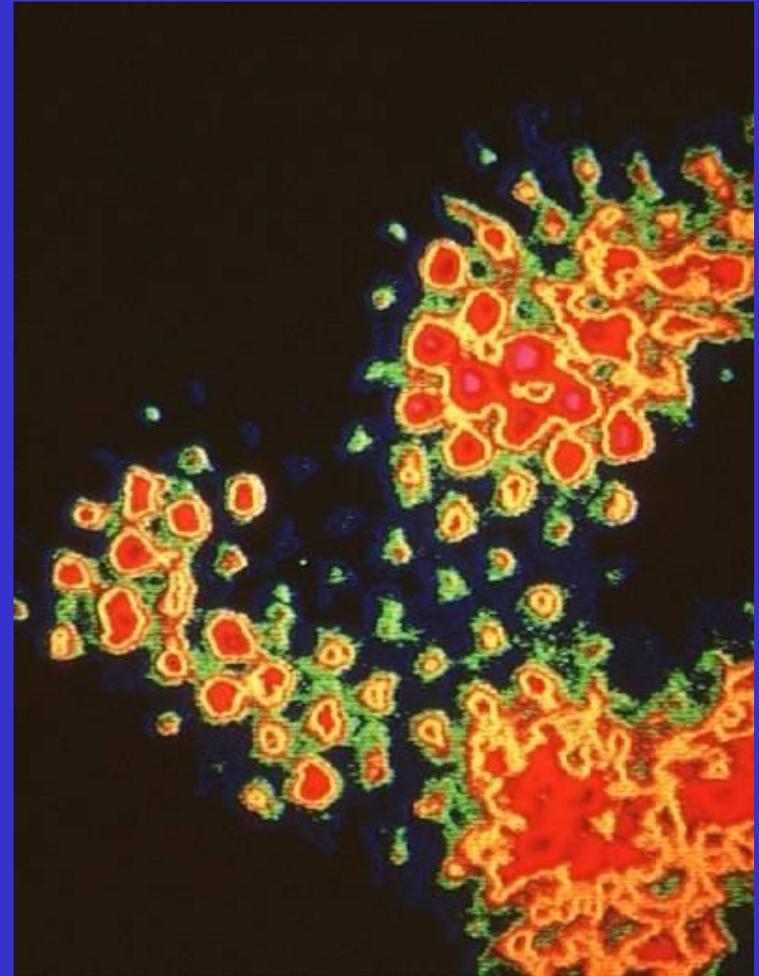
АТОМЫ урана U

- Расцветченное изображение атомов урана получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа
- Маленькие точки правильной формы – отдельные атомы, более крупные образования – кластеры, состоящие из 2–20 атомов
- Размер поля зрения – примерно 100 Å.
Увеличение в 3 500 000 раз до размера в 35 мм



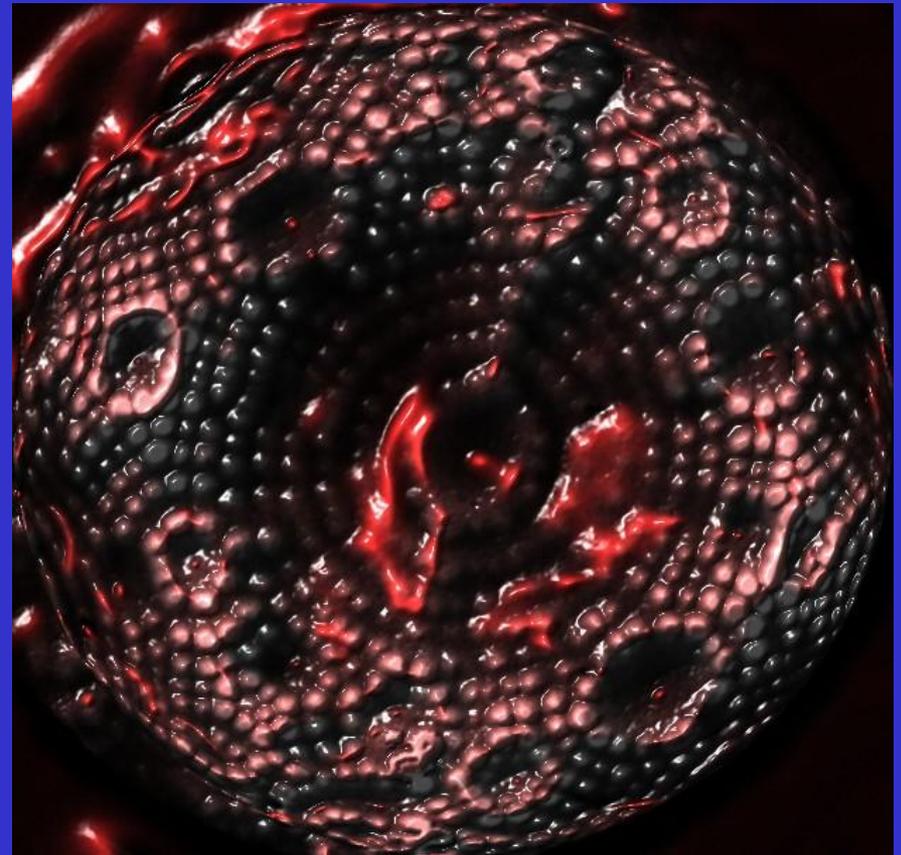
Микрокристаллы уранила UO_2^{2+}

- Расцветченное изображение микрокристаллов уранила получено с помощью просвечивающего электронного микроскопа
- Каждое пятнышко представляет собой отдельный атом урана
- Увеличение в 6 250 000 раз до размера в 35 мм



АТОМЫ вольфрама W

- Расцветченное изображение острия вольфрамовой иглы получено с помощью ионного проектора
- Видны отдельные атомы, а также следы атомов, удалённых с поверхности иглы за время экспозиции изображения (около 1 секунды)



Химический элемент, нуклид, изотопы

- Атомы с определенным числом протонов Z в ядре принадлежат одному и тому же **химическому элементу**. Число Z называется атомным номером химического элемента.
- Совокупность атомов с определенным числом протонов Z и нейтронов N в ядре называется **нуклидом**. Нуклиды обозначают, добавляя к названию элемента значение массового числа A , равного сумме $Z + N$ (например, кислород-16, уран-235), или помещая число A возле символа элемента (^{16}O , ^{235}U).
- Нуклиды одного и того же элемента называются **изотопами**.
- Масса самого легкого атома — атома водорода, состоящего из одного протона и одного электрона, равна $m_{\text{H}} \approx 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг. Массы остальных атомов приблизительно в A раз больше, чем m_{H} .
- В природе встречается 90 химических элементов и более 300 различных нуклидов; 270 из них стабильны, остальные — радиоактивны. Около 1 700 радиоактивных нуклидов получено искусственным путем.

Периодическая система химических элементов

PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

NIST

National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

Group	PERIODIC TABLE																18		
	1 IA															18 VIIIA			
1	H Hydrogen 1.00794 $1s$ 13.5984															He Helium 4.002602 $1s^2$ 24.5874			
2	Li Lithium 6.941 $1s^2 2s$ 5.3917	Be Beryllium 9.012182 $1s^2 2s^2$ 9.3227															Ne Neon 20.1797 $1s^2 2s^2 2p^6$ 21.5645		
3	Na Sodium 22.989770 $[Ne]3s$ 5.1391	Mg Magnesium 24.3050 $[Ne]3s^2$ 7.6462															Ar Argon 39.948 $[Ne]3s^2 3p^6$ 15.7596		
4	K Potassium 39.0983 $[Ar]4s$ 4.3407	Ca Calcium 40.078 $[Ar]4s^2$ 6.1132	Sc Scandium 44.955910 $[Ar]3d^1 4s^2$ 6.5615	Ti Titanium 47.867 $[Ar]3d^2 4s^2$ 6.8281	V Vanadium 50.9415 $[Ar]3d^3 4s^2$ 6.7462	Cr Chromium 51.9961 $[Ar]3d^5 4s^1$ 6.7665	Mn Manganese 54.938049 $[Ar]3d^5 4s^2$ 7.4340	Fe Iron 55.845 $[Ar]3d^6 4s^2$ 7.9024	Co Cobalt 58.933200 $[Ar]3d^7 4s^2$ 7.8810	Ni Nickel 58.6934 $[Ar]3d^8 4s^2$ 7.6398	Cu Copper 63.546 $[Ar]3d^{10} 4s^1$ 7.7264	Zn Zinc 65.409 $[Ar]3d^{10} 4s^2$ 9.3942	Ga Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^1$ 5.9093	Ge Germanium 72.64 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.8994	As Arsenic 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$ 9.7886	Se Selenium 78.96 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^4$ 9.7524	Br Bromine 79.904 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^5$ 11.8138	Kr Krypton 83.798 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^6$ 13.9999	
5	Rb Rubidium 85.4678 $[Kr]5s$ 4.1771	Sr Strontium 87.62 $[Kr]5s^2$ 5.6949	Y Yttrium 88.90585 $[Kr]4d^1 5s^2$ 6.2173	Zr Zirconium 91.224 $[Kr]4d^2 5s^2$ 6.6339	Nb Niobium 92.90638 $[Kr]4d^4 5s^1$ 6.7589	Mo Molybdenum 95.94 $[Kr]4d^5 5s^1$ 7.28	Tc Technetium (98) $[Kr]4d^5 5s^2$ 7.3005	Ru Ruthenium 101.07 $[Kr]4d^6 5s^1$ 7.4589	Rh Rhodium 102.90550 $[Kr]4d^8 5s^1$ 8.3369	Pd Palladium 106.42 $[Kr]4d^{10}$ 8.3369	Ag Silver 107.8682 $[Kr]4d^{10} 5s^1$ 7.5762	Cd Cadmium 112.411 $[Kr]4d^{10} 5s^2$ 8.9938	In Indium 114.818 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^1$ 5.7864	Sn Tin 118.710 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^2$ 7.3439	Sb Antimony 121.760 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^3$ 8.6084	Te Tellurium 127.60 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^4$ 9.0096	I Iodine 126.90447 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^5$ 10.4513	Xe Xenon 131.293 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^6$ 12.1298	
6	Cs Cesium 132.90545 $[Xe]6s$ 3.8939	Ba Barium 137.327 $[Xe]6s^2$ 5.2117	Hf Hafnium 178.49 $[Xe]4f^{14} 5d^2 6s^2$ 6.8251	Ta Tantalum 180.9479 $[Xe]4f^{14} 5d^3 6s^2$ 7.8640	W Tungsten 183.84 $[Xe]4f^{14} 5d^4 6s^2$ 7.8640	Re Rhenium 186.207 $[Xe]4f^{14} 5d^5 6s^2$ 7.8335	Os Osmium 190.23 $[Xe]4f^{14} 5d^6 6s^2$ 8.4382	Ir Iridium 192.222 $[Xe]4f^{14} 5d^7 6s^2$ 8.9670	Pt Platinum 195.078 $[Xe]4f^{14} 5d^9 6s^1$ 8.9588	Au Gold 196.96655 $[Xe]4f^{14} 5d^{10} 6s^1$ 9.2255	Hg Mercury 200.59 $[Xe]4f^{14} 5d^{10} 6s^2$ 10.4375	Tl Thallium 204.3833 $[Hg]6p^1$ 6.1082	Pb Lead 207.2 $[Hg]6p^2$ 7.4167	Bi Bismuth 208.98038 $[Hg]6p^3$ 7.2855	Po Polonium (209) $[Hg]6p^4$ 8.414	At Astatine (210) $[Hg]6p^5$ 8.414	Rn Radon (222) $[Hg]6p^6$ 10.7485		
7	Fr Francium (223) $[Rn]7s$ 4.0727	Ra Radium (226) $[Rn]7s^2$ 5.2784	Rf Rutherfordium (261) $[Rn]5f^{14} 6d^2 7s^2$ 6.0 ?	Db Dubnium (262) $[Rn]5f^{14} 6d^3 7s^2$ 6.0 ?	Sg Seaborgium (266) $[Rn]5f^{14} 6d^4 7s^2$ 6.0 ?	Bh Bohrium (264) $[Rn]5f^{14} 6d^5 7s^2$ 6.0 ?	Hs Hassium (277) $[Rn]5f^{14} 6d^6 7s^2$ 6.0 ?	Mt Meitnerium (268) $[Rn]5f^{14} 6d^7 7s^2$ 6.0 ?	Uun Ununilium (281) $[Rn]5f^{14} 6d^8 7s^2$ 6.0 ?	Uuu Unununium (272) $[Rn]5f^{14} 6d^9 7s^2$ 6.0 ?	Uub Ununbium (285) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2$ 6.0 ?	Uuq Ununquadium (289) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^1$ 6.0 ?	Uuh Ununhexium (292) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^2$ 6.0 ?	Uuq Ununquadium (289) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^1$ 6.0 ?	Uuh Ununhexium (292) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^2$ 6.0 ?	Uuq Ununquadium (289) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^1$ 6.0 ?	Uuh Ununhexium (292) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^2$ 6.0 ?	Uuq Ununquadium (289) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^1$ 6.0 ?	Uuh Ununhexium (292) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2 7p^2$ 6.0 ?
			La Lanthanum 138.9055 $[Xe]5d^1 6s^2$ 5.5769	Ce Cerium 140.116 $[Xe]4f^1 5d^1 6s^2$ 5.5387	Pr Praseodymium 140.90765 $[Xe]4f^3 6s^2$ 5.473	Nd Neodymium 144.24 $[Xe]4f^4 6s^2$ 5.5250	Pm Promethium (145) $[Xe]4f^5 6s^2$ 5.582	Sm Samarium 150.36 $[Xe]4f^6 6s^2$ 5.6437	Eu Europium 151.964 $[Xe]4f^7 6s^2$ 5.6704	Gd Gadolinium 157.25 $[Xe]4f^7 5d^1 6s^2$ 6.1498	Tb Terbium 158.92534 $[Xe]4f^9 6s^2$ 5.8638	Dy Dysprosium 162.500 $[Xe]4f^10 6s^2$ 5.9389	Ho Holmium 164.93032 $[Xe]4f^11 6s^2$ 6.0215	Er Erbium 167.259 $[Xe]4f^12 6s^2$ 6.1077	Tm Thulium 168.93421 $[Xe]4f^13 6s^2$ 6.1843	Yb Ytterbium 173.04 $[Xe]4f^14 6s^2$ 6.2542	Lu Lutetium 174.967 $[Xe]4f^{14} 5d^1 6s^2$ 5.4259		
			Ac Actinium (227) $[Rn]6d^1 7s^2$ 5.17	Th Thorium 232.0381 $[Rn]6d^2 7s^2$ 6.3067	Pa Protactinium 231.03688 $[Rn]5f^2 6d^1 7s^2$ 5.89	U Uranium 238.02891 $[Rn]5f^3 6d^1 7s^2$ 6.1941	Np Neptunium (237) $[Rn]5f^4 6d^1 7s^2$ 6.2657	Pu Plutonium (244) $[Rn]5f^6 7s^2$ 6.0260	Am Americium (243) $[Rn]5f^7 7s^2$ 5.9738	Cm Curium (247) $[Rn]5f^7 6d^1 7s^2$ 5.9914	Bk Berkelium (247) $[Rn]5f^9 7s^2$ 6.1979	Cf Californium (251) $[Rn]5f^{10} 7s^2$ 6.2817	Es Einsteinium (252) $[Rn]5f^{11} 7s^2$ 6.42	Fm Fermium (257) $[Rn]5f^{12} 7s^2$ 6.50	Md Mendelevium (258) $[Rn]5f^{13} 7s^2$ 6.58	No Nobelium (259) $[Rn]5f^{14} 7s^2$ 6.65	Lr Lawrencium (262) $[Rn]5f^{14} 7s^2 7p^1$ 4.9 ?		

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ^{133}Cs

speed of light in vacuum	c	299 792 458 m s ⁻¹	(exact)
Planck constant	h	6.626 1 × 10 ⁻³⁴ J s	($h = h/2\pi$)
elementary charge	e	1.602 2 × 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	m_e	9.109 4 × 10 ⁻³¹ kg	
	$m_e c^2$	0.5110 MeV	
proton mass	m_p	1.672 6 × 10 ⁻²⁷ kg	
fine-structure constant	α	1/137.036	
Rydberg constant	R_∞	10 973 732 m ⁻¹	
	$R_\infty c$	3.289 842 × 10 ¹⁵ Hz	
	$R_\infty hc$	13.6057 eV	
Boltzmann constant	k	1.380 7 × 10 ⁻²³ J K ⁻¹	

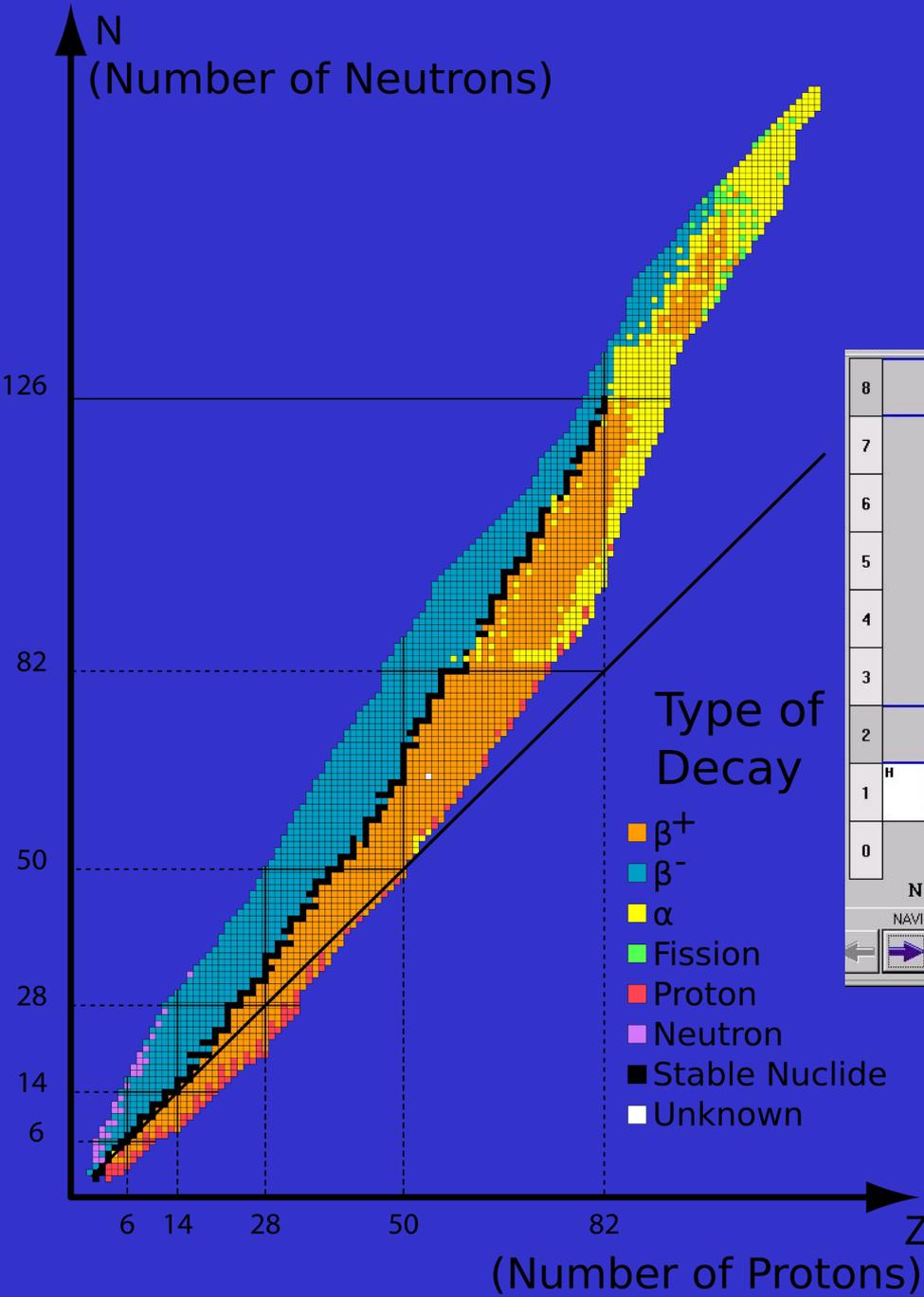
- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Physics Laboratory physics.nist.gov
Standard Reference Data Group www.nist.gov/srd

Atomic Number: 58
Ground-state Level: $1G_4^o$
Symbol: **Ce**
Name: Cerium
Atomic Weight: 140.116
Ground-state Configuration: $[Xe]4f^1 5d^1 6s^2$
Ionization Energy (eV): 5.5387

[†]Based upon ^{12}C . () indicates the mass number of the most stable isotope.

Таблица ИЗОТОПОВ

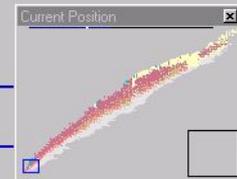


8			O	O12 0.40MeV 0+ 2p	O13 8.58ms (3/2-) EC	O14 70.806s 0+ EC	O15 122.24s 1/2- EC	O16 0+ 5/2+	O17 5/2+ 5/2+	O18 0+ 5/2+	O19 26.91s 5/2+ β^-	O20 13.51s 0+ β^-	O21 3.42s 3/2 β^-	O22 2.25s 0+ β^-	O23 82ms β^-	O24 61ms 0+ β^-	O25 no data	
7		N	N10 no data	N11 7.40KeV 1/2+ p	N12 11.00ms 1+ EC	N13 9.965m 1/2- EC	N14 1+ 1/2-	N15 1/2- β^-	N16 7.13s 2+ β^-	N17 4.173s 1- β^-	N18 624ms 1- β^-	N19 0.304s (1/2-) β^-	N20 100ms β^-	N21 85ms β^-	N22 24ms β^-	N23 no data	N24 no data	
6		C	C8 230KeV 0+ no data	C9 126.5ms (3/2-) EC	C10 19.255s 0+ EC	C11 20.39m 1+ EC	C12 0+ 1/2-	C13 1/2- β^-	C14 5730y 0+ β^-	C15 2.449s 1/2+ β^-	C16 0.747s 0+ β^-	C17 193ms 0+ β^-	C18 95ms 0+ β^-	C19 46ms β^-	C20 14ms 0+ β^-	C21 no data	C22 no data	
5		B	B7 1.4MeV (3/2-) no data	B8 770ms 2+ EC	B9 0.54KeV 3/2- multiple	B10 3+ 3/2-	B11 3/2- 1+	B12 20.20ms 1+ β^-	B13 17.36ms 3/2- β^-	B14 13.8ms 2- β^-	B15 10.5ms 0+ β^-	B16 200 Ps (0-) β^-	B17 5.08ms (3/2-) β^-	B18 no data	B19 no data			
4		Be	Be3 no data	Be6 92KeV 0+ 2p	Be7 53.29d 3/2- EC	Be9 6.8eV 2+ 2 α	Be10 1.51E+6y 0+ β^-	Be11 13.81s 1/2+ β^-	Be12 23.6ms 0+ β^-	Be13 0.9 MeV 1/2 5/2+ n	Be14 4.35ms 0+ β^-							
3		Li	Li4 2- no data	Li6 1.5 MeV 3/2- p	Li7 1+ 3/2-	Li8 838ms 2+ β^-	Li9 178.3ms 3/2- β^-	Li10 1.2MeV n β^-	Li11 8.5ms 3/2- β^-	Li12 no data								
2		He	He3 1/2+ β^-	He4 0+ 1/2+	He5 0.60MeV 3/2- n	He6 806.7ms 0+ β^-	He7 160KeV (3/2-) n	He8 119.0ms 0+ β^-	He9 0.30 MeV (1/2-) n	He10 0.3MeV 0+ β^-								
1	H	H1 1/2+ β^-	H2 1+ 1/2+	H3 12.33y 1/2+ β^-	H4 2- no data	H5 no data	H6 no data											
0		n	1/2+ β^-															

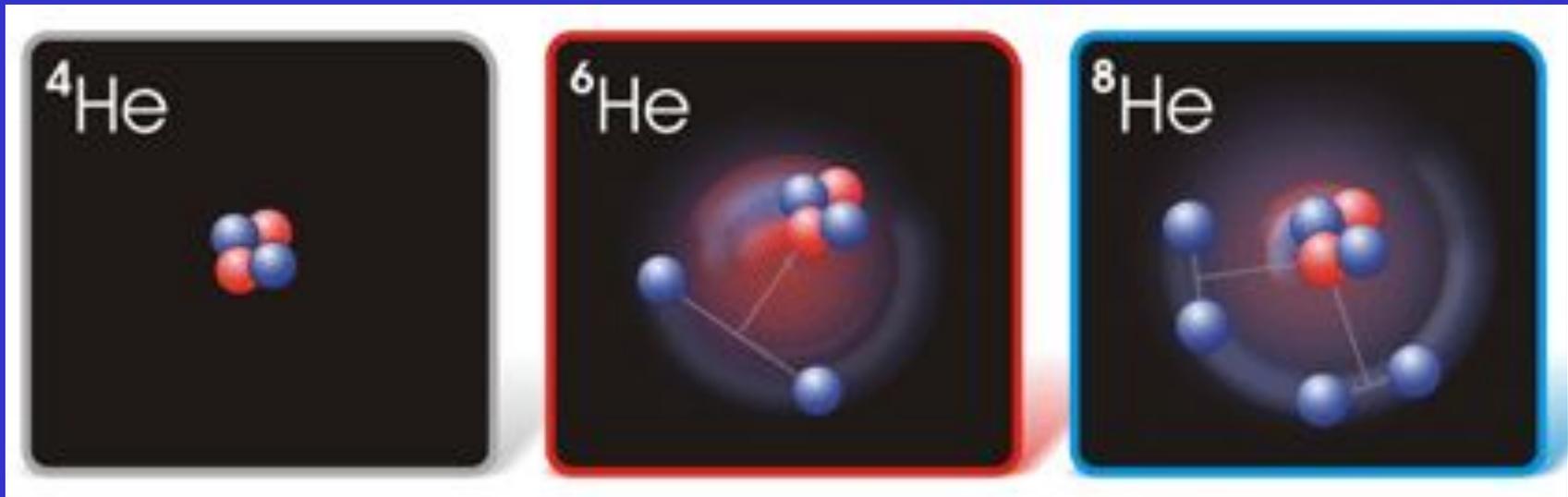
NAVIGATE: ← → ↑ ↓

Primary Decay Modes
■ Stable ■ Electron Capture ■ Neutron Decay ■ Beta Decay
■ Proton Decay ■ Isomer Transfer ■ Other ■ Alpha Decay

Print Table Print Screen Close



Изотопы гелия



- Ядро гелия-4 содержит два нейтрона (голубые шарики) и два протона (красные шарики)
- Ядро гелия-6 состоит из ядра гелия-4, окружённого двухнейтронным «галом»
- В ядре гелия-8 таких пар нейтронов две

Ионы

- Процесс удаления или присоединения электронов к атому называют **ионизацией**
- При числе электронов в оболочке, меньшем Z , получается положительный атомный ион, при большем, чем Z — отрицательный
- Таким образом, **ион** — это электрически заряженный атом (или молекула), который образуется при отрыве или присоединении одного или нескольких электронов к нейтральному атому (или молекуле)

Ионы

- Положительно заряженные ионы называются **катионами**, отрицательно заряженные — **анионами**.
- Ионы обозначаются химическим символом с индексом, который указывает кратность (величину заряда в единицах элементарного заряда) и знак иона: H^- , Na^+ , UO_2^{2+}
- Ионы могут представлять собой как устойчивые образования (как правило, в растворах или кристаллах), так и неустойчивые (в газах при обычных условиях)
- Атомные катионы могут быть получены вплоть до заряда $+(Z - 1)$. Так, на ускорителях ионов получены, например, U^{90+} и U^{91+}
- Атомные анионы с зарядом 2 и более в свободном состоянии не существуют

Ионная ловушка (1959)

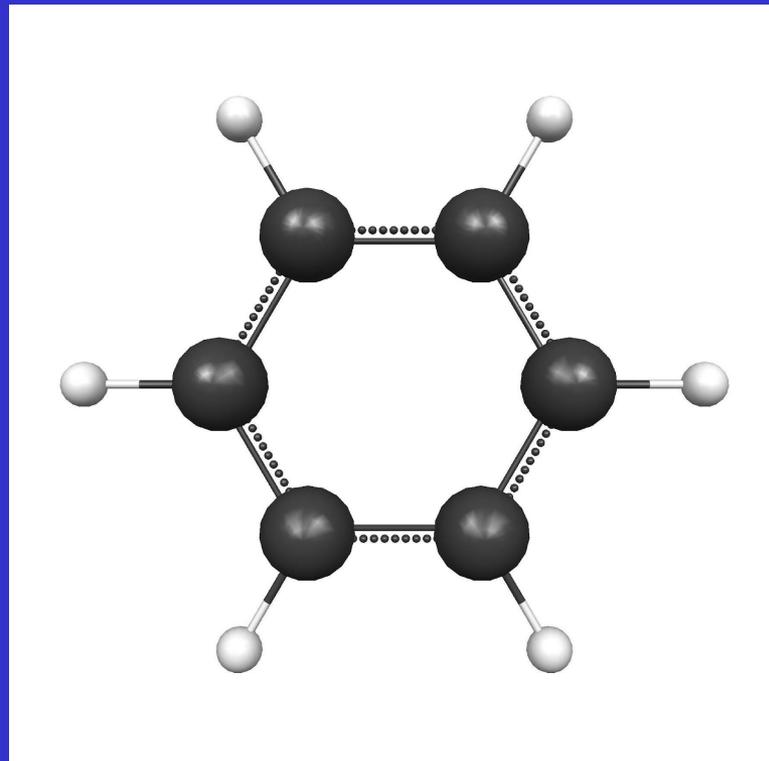
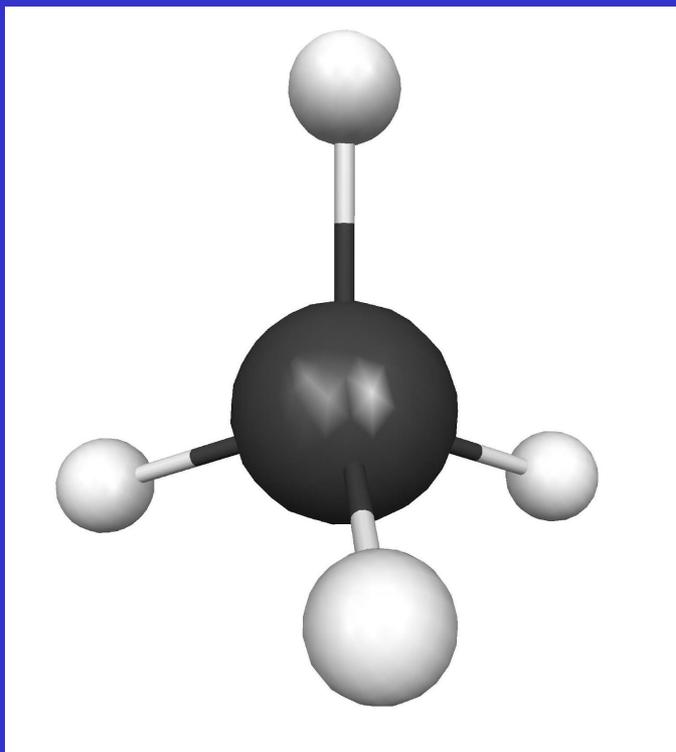
- Ионная ловушка (ловушка Пеннинга), в которой созданы электрическое и магнитное поля специальной конфигурации, позволяет длительное время удерживать одиночные ионы и электроны



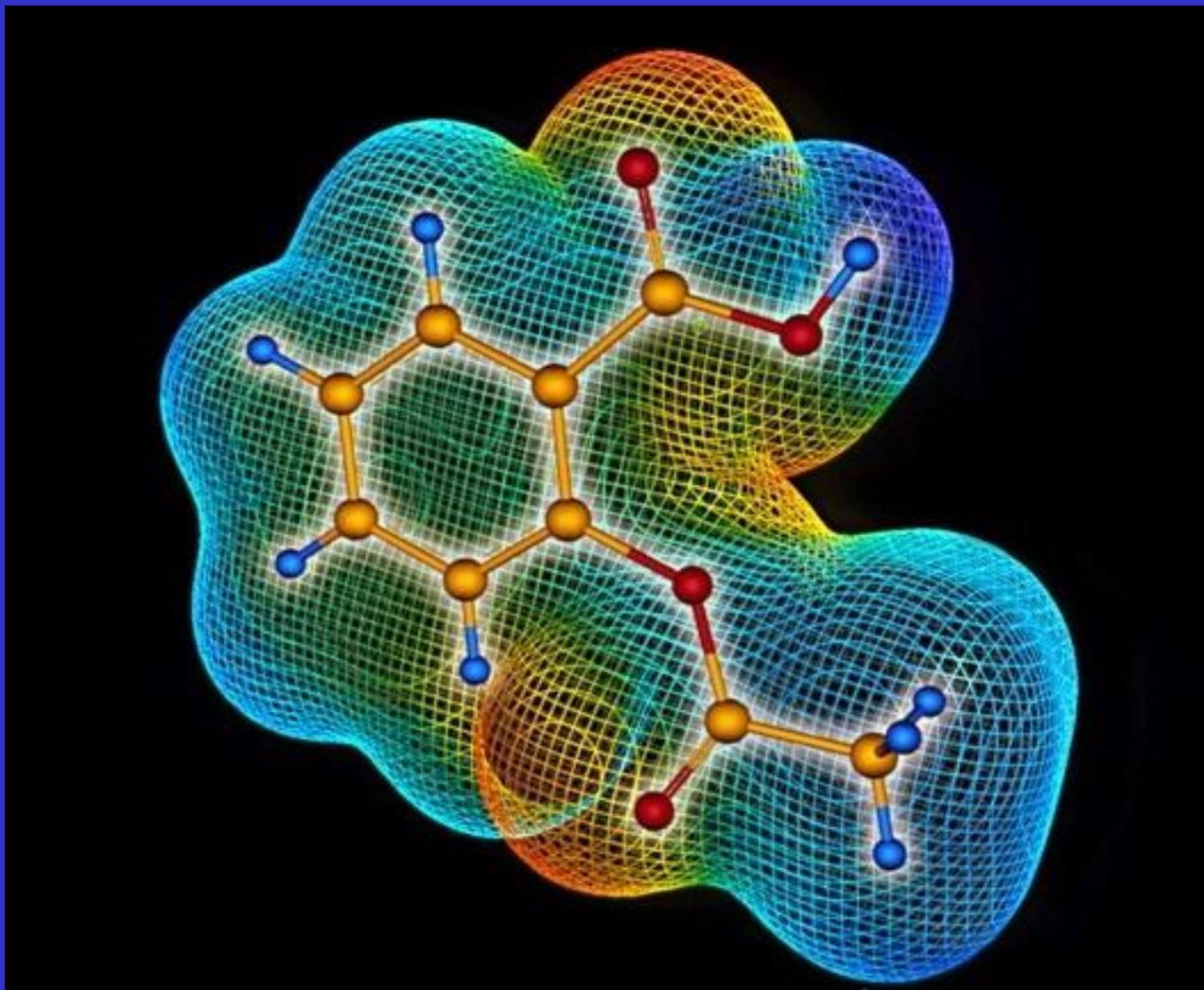
Молекула

- Молекула — это наименьшая устойчивая частица вещества, состоящая более чем из одного атома
- Молекула характеризуется определённым составом атомных ядер, числом электронов и пространственной структурой
- Для обозначения количественного и качественного состава молекул используются химические формулы: O_2 (молекула кислорода), H_2O (молекула воды), CH_4 (молекула метана), C_6H_6 (молекула бензола), C_{60} (молекула фуллерена)

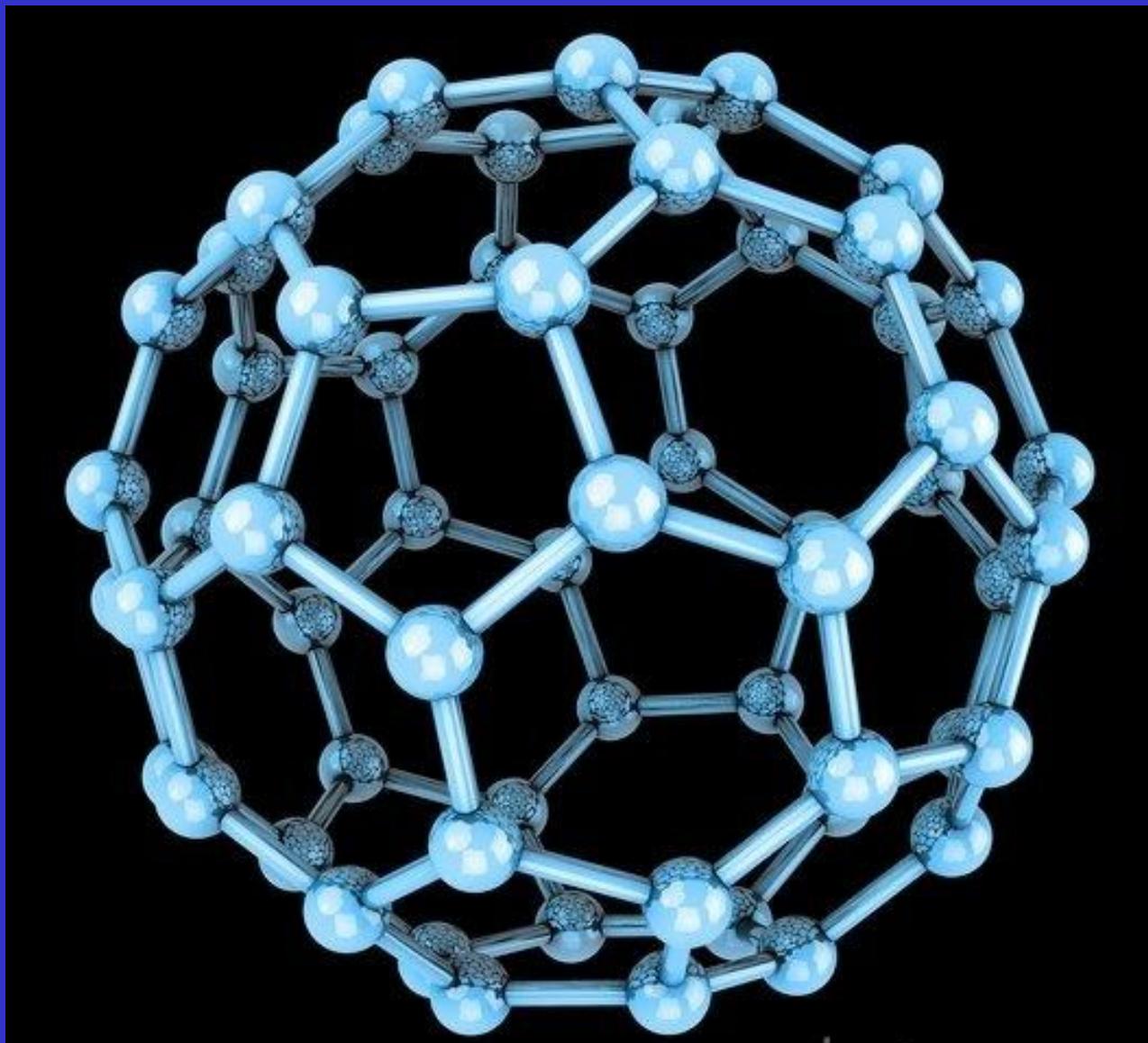
Молекулы метана и бензола



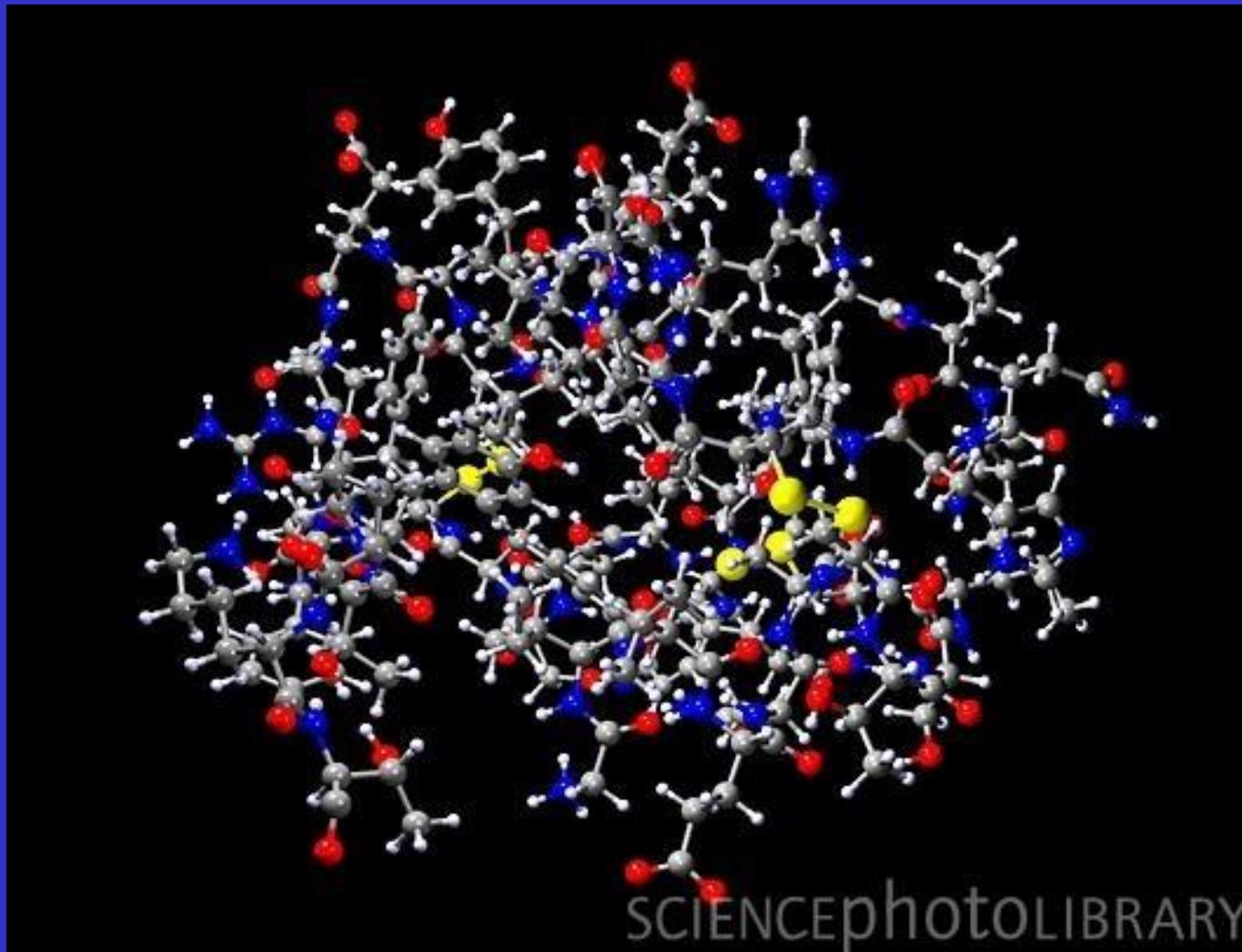
Молекула аспирина



Молекула фуллерена C_{60}



Молекула инсулина



Молекула ДНК

- Расцветченное изображение молекулы ДНК получено при помощи просвечивающего электронного микроскопа
- В камере с высоким вакуумом образец ДНК покрывают тонким слоем платины
- Металлическое покрытие даёт контрастное изображение в электронном микроскопе



Ядерные и оболочечные свойства атома

Ядерные свойства	Оболочечные свойства
<p data-bbox="160 504 938 658">Определяются составом ядра:</p> <p data-bbox="160 705 890 1029">радиоактивность, способность участвовать в ядерных реакциях и т. п.</p>	<p data-bbox="983 504 1746 739">Определяются строением электронной оболочки:</p> <p data-bbox="983 782 1740 1186">химические, физические (электрические, магнитные, оптические и т. д.)</p>

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Энергия

- Единицей энергии в СИ является джоуль (Дж), однако для величин энергии объектов и явлений атомной физики такая единица используется редко
- Более употребительной является внесистемная единица энергии, называемая электрон-вольт (эВ, eV)
- **Электрон-вольт** — это энергия, которую приобретает заряженная частица с элементарным зарядом, проходя ускоряющую разность потенциалов в 1 вольт:
$$1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$
- Для измерения энергий в атомной и ядерной физике используются кратные (кэВ, $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$, МэВ, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$) и дольные (мкэВ, $1 \text{ мкэВ} = 10^{-6} \text{ эВ}$) единицы электрон-вольта, а также некоторые другие: ридберг (Rydberg, Ry), хартри (hartree, Ha, или атомная единица, a. e.)
- **Ридберг** численно равен энергии ионизации атома водорода из основного состояния в приближении бесконечной массы ядра: $1 \text{ Ry} \approx 13.606 \text{ эВ}$
- **Хартри** равен абсолютной величине потенциальной энергии электрона в основном состоянии атома водорода в приближении бесконечной массы ядра: $1 \text{ Ha} = 2 \text{ Ry} \approx 27.211 \text{ эВ}$
- Энергии состояний атомных систем, а также переходов между состояниями могут измеряться и в других единицах

Масса

- Единицей массы в СИ является **килограмм** (кг), однако для измерения масс объектов атомной физики используется внесистемная единица измерения, называемая атомной единицей массы (а. е. м.)
- **Атомная единица массы** равна 1/12 массы несвязанного невозбуждённого атома углерода-12 (^{12}C):

$$1 \text{ а. е. м.} \approx 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

- 1 а. е. м. *приблизительно* равна массе одного протона или нейтрона
- **Относительная атомная масса** — масса атома, выраженная в а. е. м.
- **Постоянная Авогадро** N_A — физическая константа, численно равная количеству атомов в 12 г чистого изотопа углерода-12:

$$N_A \approx 6.022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

- **Моль** (единица количества вещества в СИ) по определению содержит N_A структурных элементов (атомов, молекул, ионов).

Длина

- Единицей длины в СИ является **метр** (м). 1 метр равен расстоянию, которое проходит свет в вакууме за промежуток времени, равный $1/299792458$ секунды.
- За исключением измерений длин волн электромагнитного излучения радиодиапазона, такая единица длины редко применяется в атомной физике, а вместо неё для измерения линейных размеров, а также длин волн используются дольные единицы метра:

сантиметр (см, $1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$),
миллиметр (мм, $1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$),
микрометр (мкм, $\mu\text{м}$, $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$),
нанометр (нм, $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$),
пикометр (пм, $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$) и другие,

а также внесистемные единицы:

ангстрем (Å , $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ нм} = 10^{-10} \text{ м}$),
бор (или боровский радиус) ($1 \text{ бор} \approx 0.529 \text{ Å}$)

Время

- Единицей длительности промежутков времени в СИ является **секунда (с)**
- В настоящее время секунда определяется на основе т. н. атомного эталона времени:
одна секунда (или атомная секунда) равна 9 192 631 770 периодам электромагнитного излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния изотопа ^{133}Cs (цезия-133)
- Длительности быстропротекающих процессов в атомной физике принято измерять в дольных единицах секунды: нано-, пико- или фемтосекундах (нс, пс, фс, $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$)

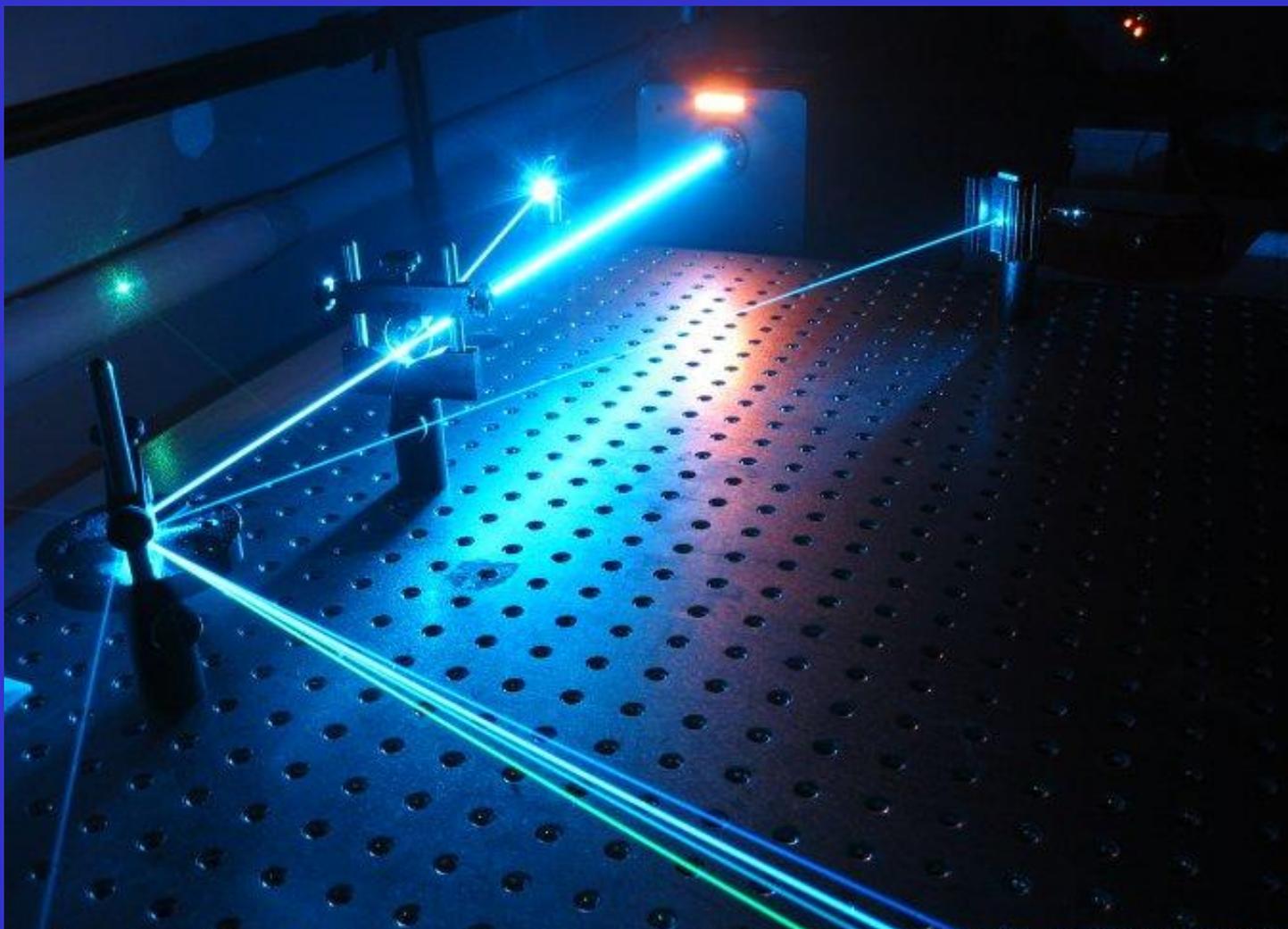
Масштабы физических величин в атомной и ядерной физике

- Для явлений атомной физики характерны размеры от 10^{-12} м (внутренние подболочки тяжелых атомов) до десятых долей нанометра (размеры атомов и небольших молекул), энергии от 10^{-6} эВ (сверхтонкая структура уровней) до 10^5 эВ (энергии связи электронов внутренних подболочек), времена от десятков фемтосекунд (длительности сверхкоротких лазерных импульсов) до тысяч секунд (времена жизни метастабильных состояний атомов)
- Типичные размеры молекул составляют 0.1–1 нм. Межъядерное расстояние у наименьшей молекулы (H_2) равно 0.074 нм
- Макромолекулы ДНК и многих полимеров могут иметь макроскопические размеры. Так, длина развёрнутой спирали ДНК может достигать нескольких сантиметров при ширине примерно 2 нм.

ФОТОН

- **Фотон**, или квант электромагнитного излучения (поля), — безмассовая элементарная частица, не имеющая электрического заряда
- В вакууме фотон движется со скоростью c
- Фотон имеет спин, равный 1
- Проекции спина на направления, перпендикулярные направлению распространению фотона, определяют состояние его поляризации
- Фотон обозначается символом γ

Излучение ионного аргонового лазера



Шкала энергий фотонов (шкала электромагнитного излучения)

