

Атомная физика

Лекция 17

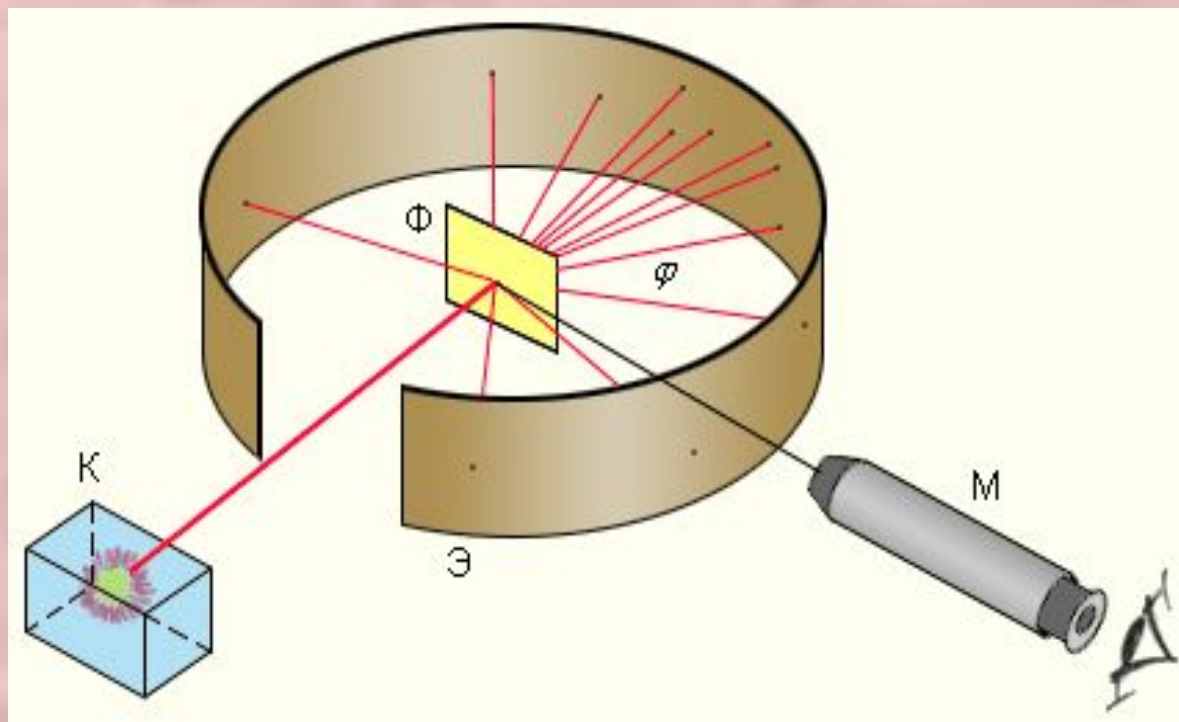
Физика атома и атомного ядра

- В 1833 году при исследовании явления электролиза М. Фарадей установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц – ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Приближенное значение которого оказалось равным $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл.
- На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

- Важным свидетельством сложной структуры атомов явились спектроскопические исследования, которые привели к открытию линейчатых спектров атомов.
- В 1896 году [А. Беккерель](#) В 1896 году А. Беккерель обнаружил явление испускания атомами невидимых проникающих излучений, названное [радиоактивностью](#). В последующие годы явление радиоактивности изучалось многими учеными (М. Склодовская-Кюри, П. Кюри, Э. Резерфорд и др.). Было обнаружено, что атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы (альфа-, бета- и гамма-лучи). Альфа-лучи оказались потоком ионов гелия. Бета-лучи – потоком электронов, а гамма-лучи – потоком квантов жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, на основании всех известных к началу XX века экспериментальных фактов можно было сделать вывод о том, что атомы вещества имеют сложное внутреннее строение. Они представляют собой электронейтральные системы, причем носителями отрицательного заряда атомов являются легкие электроны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.

Опыт Резерфорда. Ядерная модель атома

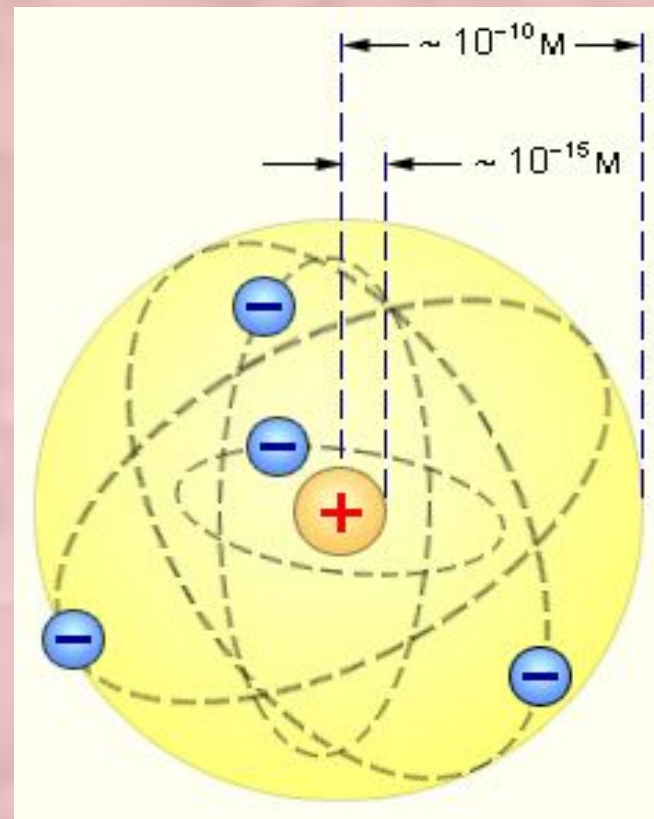
- Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены [Э. Резерфордом](#) Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены Э. Резерфордом и его сотрудниками Э. Марсденом и Х. Гейгером в 1909–1911 годах. Резерфорд предложил применить зондирование атома с помощью α -частиц, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов. Масса α -частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах Резерфорд использовал α -частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика – порядка 10^7 м/с, но она все же значительно меньше скорости света). α -частицы – это полностью ионизированные атомы гелия. Они были открыты Резерфордом в 1899 году при изучении [явления радиоактивности](#). Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию α -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения α -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.



- Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц. К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком, Ф – золотая фольга, М – микроскоп.

- Опыты Резерфорда и его сотрудников привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает 10^{-14} – 10^{-15} м. Это ядро занимает только 10^{-12} часть полного объема атома, но содержит **весь** положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Веществу, составляющему ядро атома, следовало приписать колоссальную плотность порядка $\rho \approx 10^{15}$ г/см³. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.

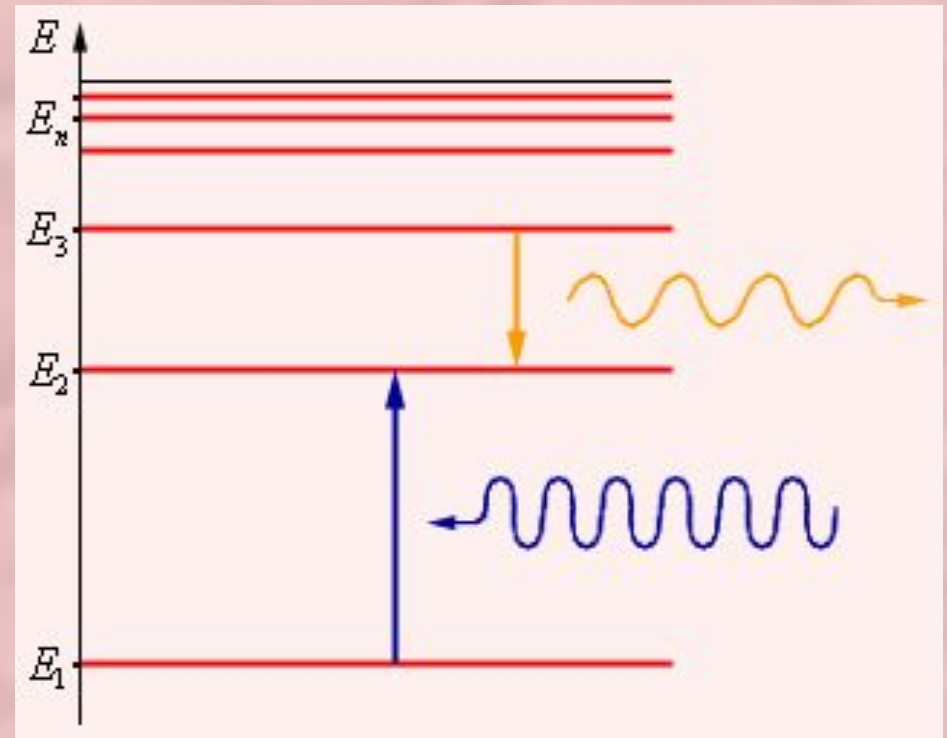
- Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил **планетарную модель атома**. Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, вращаются под действием кулоновских сил со стороны ядра электроны. Находясь в состоянии покоя электроны не могут, так как они упали бы на ядро.



Квантовые постулаты Бора

- ***Первый постулат Бора*** (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых *стационарных* или *квантовых* состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает .

- Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой **энергетических уровней**, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию. Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n < 0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра (ионизация). Величина $|E_1|$ называется **энергией ионизации**. Состояние с энергией E_1 называется **основным состоянием** атома.



- **Второй постулат Бора (правило частот)**
формулируется следующим образом: 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

- $h\nu_{nm} = E_n - E_m$, где h – постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

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

Атом водорода. Линейчатые спектры

- Простейший из атомов, атом водорода явился своеобразным тест объектом для теории Бора. Ко времени создания теории Бора атом водорода был хорошо изучен экспериментально. Он содержит единственный электрон. Ядром атома является **протон** – положительно заряженная частица, заряд которой равен по модулю заряду электрона, а масса в 1836 раз превышает массу электрона. Еще в начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атома водорода в видимой области (так называемый **линейчатый спектр**). Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо изучены количественно ([И. Бальмер](#), 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в видимой части спектра была названа **серией Бальмера**. Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра.

- И. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

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

- Для серии Бальмера $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \dots$. Для ультрафиолетовой серии (серия Лаймана) $m = 1$, $n = 2, 3, 4, \dots$. Постоянная R в этой формуле называется **постоянной Ридберга**. Ее численное значение $R = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц. До Бора механизм возникновения линейчатых спектров и смысл целых чисел, входящих в формулы спектральных линий водорода (и ряда других атомов), оставались непонятными.

- Бор предположил, что момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка. Для круговых орбит правило квантования Бора записывается в виде

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

- Здесь m_e – масса электрона, v – его скорость, r – радиус стационарной круговой орбиты.

- Скорость электрона, вращающегося по круговой орбите некоторого радиуса r в кулоновском поле ядра, как следует из второго закона Ньютона, определяется соотношением:

$$v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r},$$

- где e – элементарный заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная. Скорость электрона v и радиус стационарной орбиты r связаны правилом квантования Бора. Отсюда следует, что радиусы стационарных круговых орбит определяются выражением

$$r_n = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2} n^2.$$

- Самой близкой к ядру орбите соответствует значение $n = 1$. Радиус первой орбиты, который называется **Боровским радиусом**, равен

$$r_1 = a_0 = \frac{\varepsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

- Радиусы последующих орбит возрастают пропорционально n^2 .
- Полная механическая энергия E системы из атомного ядра и электрона, обращающегося по стационарной круговой орбите радиусом r , равна

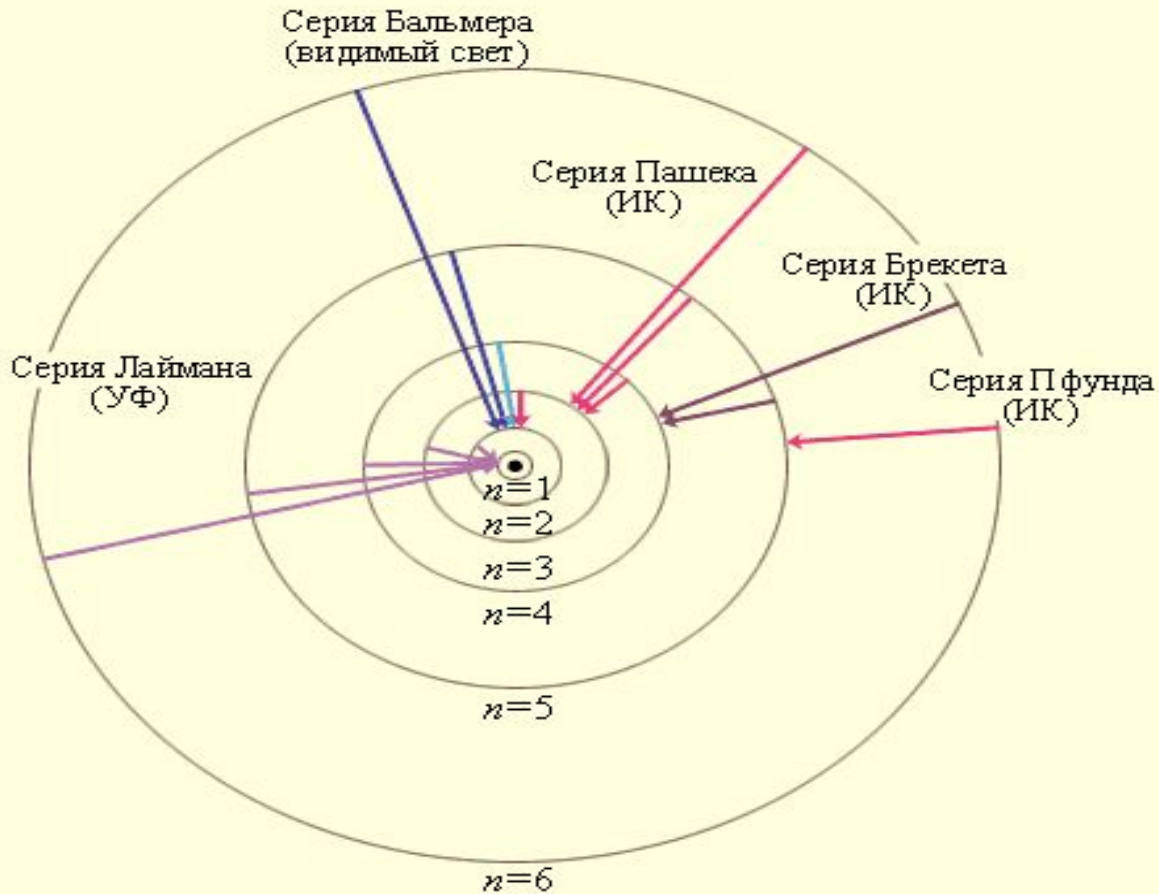
$$E_n = E_k + E_p = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}$$

- Следует отметить, что $E_p < 0$, так как между электроном и ядром действуют силы притяжения. Подставляя в эту формулу выражения для v^2 и m , получим:

$$E_n = - \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

- Целое число $n = 1, 2, 3, \dots$ называется в квантовой физике атома **главным квантовым числом**.
- Согласно второму постулату Бора, при переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией E_n на другую стационарную орбиту с энергией $E_m < E_n$ атом испускает квант света, частота ν_{nm} которого равна $\Delta E_{nm} / h$:

$$\nu_{nm} = \frac{\Delta E_{nm}}{h} = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



- образование спектральных серий в излучении атома водорода при переходе электрона с высоких стационарных орбит на более низкие

- В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн λ , т. е.

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

Подставляя в это соотношение длину волны де Бройля $\lambda = h / p$, где $p = m_e v$ – импульс электрона, получим:

$$n \frac{h}{m_e v} = 2\pi r_n \quad \text{или} \quad m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}.$$

- Таким образом, боровское правило квантования связано с волновыми свойствами электронов.

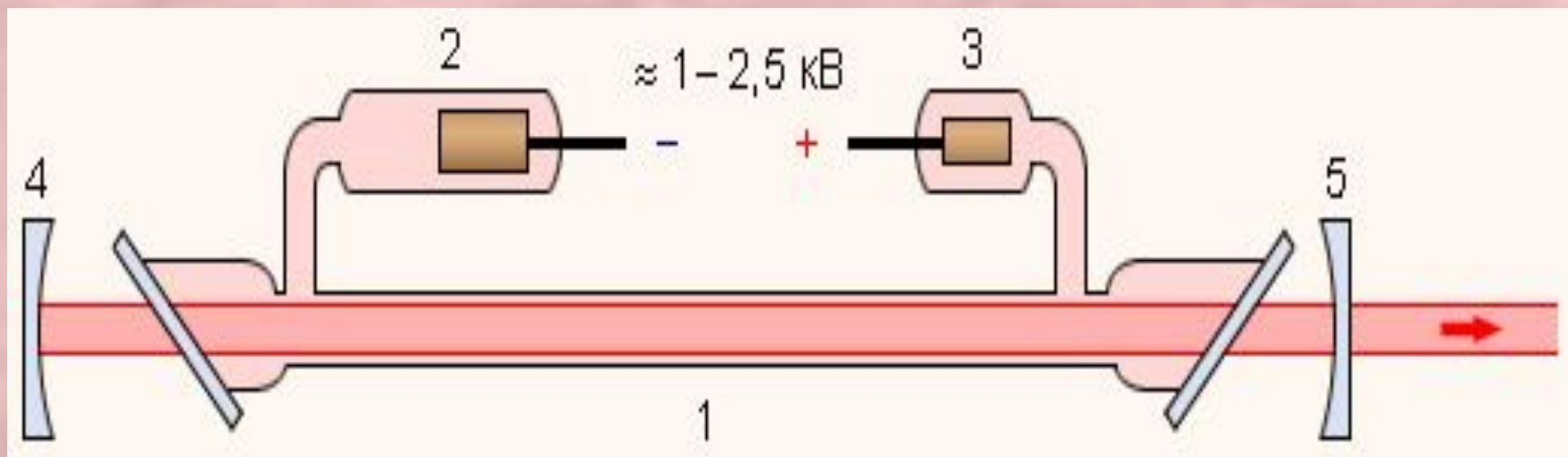
Лазеры

- **Лазеры** или **оптические квантовые генераторы** – это современные когерентные источники излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств.
- Другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.
- Одним из важнейших свойств лазерного излучения является чрезвычайно высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении не лазерных источников. Это и все
- Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до 10^{12} – 10^{13} Вт (в импульсном режиме). Лазеры находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, в оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т. д.

- В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют **вынужденным** или **индуцированным**. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца.
- Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров.

- Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется **активной**. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того, чтобы возникала генерация света, необходимо использовать **обратную связь**. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней. Этот процесс в лазерной физике принято называть **накачкой**.
- Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка. Атомы возбуждаются за счет поглощения света.
- Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694 нм (темно-вишневый свет), мощность излучения может достигать в импульсе 10⁶–10⁹ Вт. Исторически это был первый действующий лазер (американский физик [Т. Майман](#), 1960 г.).

- Одним из самых распространенных лазеров в настоящее время является газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка 10^2 Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10:1. Активным газом, на котором возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет) в непрерывном режиме, является неон. Гелий является буферным газом, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона.
- Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном исполнении. Для этого используется стеклообразное вещество – ситалл, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения. В куске ситалла в форме прямоугольного параллелепипеда просверливается канал, к торцам которого на оптическом контакте приклеиваются лазерные зеркала. Канал заполняется смесью гелия и неона. Катод и анод вводятся через дополнительные боковые каналы. Такая моноблочная конструкция обеспечивает высокую механическую и тепловую стабильность.



- Схема гелий-неонового лазера: 1 – стеклянная кювета со смесью гелия и неона, в которой создается высоковольтный разряд; 2 – катод; 3 – анод; 4 – глухое сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1 %; 5 – сферическое зеркало с пропусканием 1–2 %.

Состав атомных ядер

- В настоящее время твердо установлено, что **атомные ядра различных элементов состоят из двух частиц – протонов атомные ядра различных элементов состоят из двух частиц – протонов и нейтронов.**
- Первая из этих частиц представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон.
- По современным измерениям, положительный заряд протона в точности равен элементарному заряду $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$ Кл, то есть, равен по модулю отрицательному заряду электрона. В настоящее время равенство зарядов протона и электрона проверено с точностью 10^{-22} . Такое совпадение зарядов двух непохожих друг на друга частиц вызывает удивление и остается одной из фундаментальных загадок современной физики. **Масса протона**, по современным измерениям, равна $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$ кг. В ядерной физике массу частицы часто выражают в атомных единицах массы (а. е. м.), равной массы атома углерода с массовым числом 12:
- $1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг. Следовательно, $m_p = 1,007276 \cdot \text{а. е. м.}$ Во многих случаях массу частицы удобно выразить в эквивалентных значениях энергии в соответствии с формулой $E = mc^2$. Так как $1 \text{ эВ} = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ Дж, в энергетических единицах масса протона равна $938,272331 \text{ МэВ}$.

- Нейтрон – это элементарная частица. Ее не следует представлять в виде компактной протон-электронной пары, как первоначально предполагал Резерфорд.
- По современным измерениям, **масса нейтрона** $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008665 а. е. м. В энергетических единицах масса нейтрона равна 939,56563 МэВ. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.
- Сразу же после открытия нейтрона российский ученый [Д. Д. Иваненко](#) и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о **протонно-нейтронном** строении атомных ядер, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями. Протоны и нейтроны принято называть **нуклонами**.
- Для характеристики атомных ядер вводится ряд обозначений. Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом Z и называют **зарядовым числом** или атомным номером (это порядковый номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен Ze , где e – элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом N .
- Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют **массовым числом** A :
- $A = Z + N$.
- Ядра одного и того же химического элемента могут отличаться числом нейтронов. Такие ядра называются **изотопами**.

Энергия связи ядер

- Важнейшую роль в ядерной физике играет понятие энергии связи ядра.
- Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы. Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.
- Энергию связи любого ядра можно определить с помощью точного измерения его массы. В настоящее время физики научились измерять массы частиц – электронов, протонов, нейтронов, ядер и др. – с очень высокой точностью. Эти измерения показывают, что масса любого ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:
 - $M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}}$. Разность масс
 - $\Delta M = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}$. называется дефектом массы.

- По дефекту массы можно определить с помощью формулы Эйнштейна $E = mc^2$ энергию, выделившуюся при образовании данного ядра, т. е. энергию связи ядра $E_{св}$:

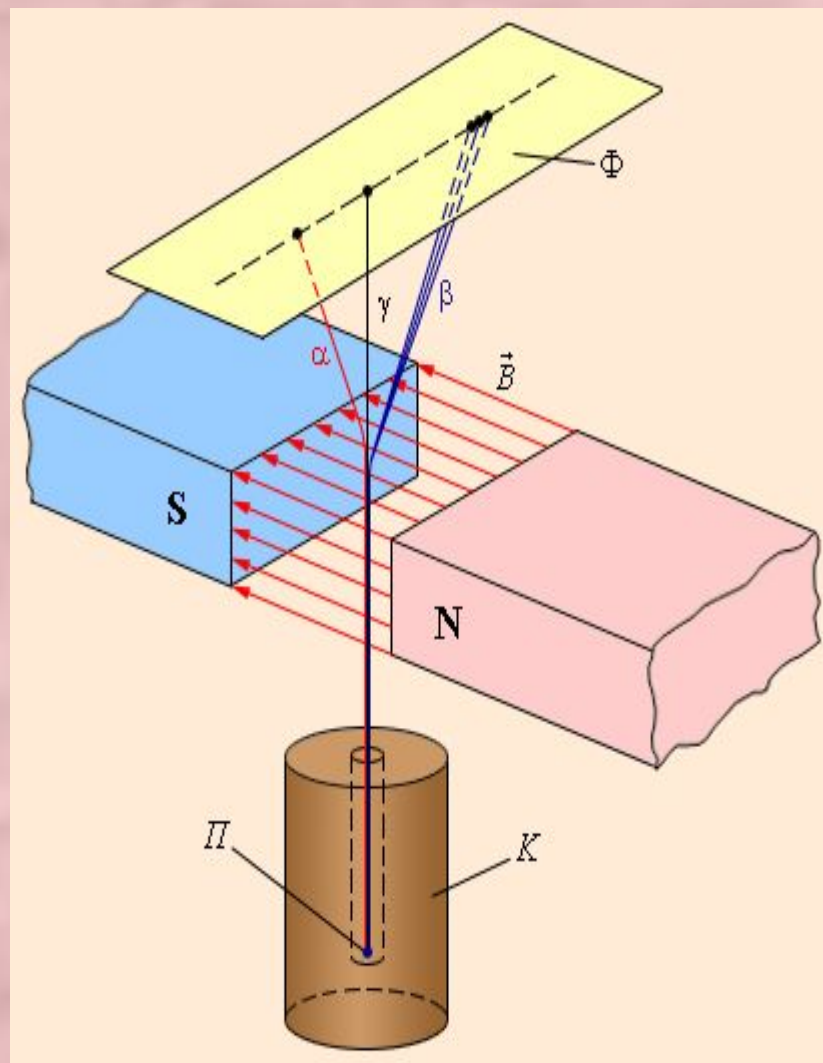
$$E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{я})c^2.$$

Эта энергия выделяется при образовании ядра в виде излучения γ -квантов.

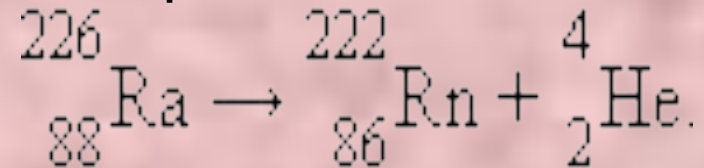
Радиоактивность

- Почти 90 % из известных 2500 атомных ядер нестабильны. Нестабильное ядро самопроизвольно превращается в другие ядра с испусканием частиц. Это свойство ядер называется **радиоактивностью**. У больших ядер нестабильность возникает вследствие конкуренции между притяжением нуклонов ядерными силами и кулоновским отталкиванием протонов. Не существует стабильных ядер с зарядовым числом $Z > 83$ и массовым числом $A > 209$. Но радиоактивными могут оказаться и ядра атомов с существенно меньшими значениями чисел Z и A . Если ядро содержит значительно больше протонов, чем нейтронов, то нестабильность обуславливается избытком энергии кулоновского взаимодействия. Ядра, которые содержали бы большой избыток нейтронов над числом протонов, оказываются нестабильными вследствие того, что масса нейтрона превышает массу протона. Увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии.

- радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные и нейтральные. Эти три вида излучений были названы α -, β - и γ -излучениями. На рис. изображена схема эксперимента, позволяющая обнаружить сложный состав радиоактивного излучения. В магнитном поле α - и β -лучи испытывают отклонения в противоположные стороны, причем β -лучи отклоняются значительно больше. γ -лучи в магнитном поле вообще не отклоняются.

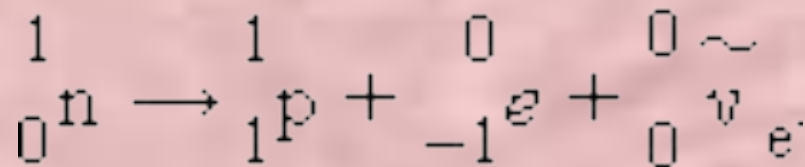


- **Альфа-распад.** Альфа-распадом называется самопроизвольное превращение атомного ядра с числом протонов Z и нейтронов N в другое (дочернее) ядро, содержащее число протонов $Z - 2$ и нейтронов $N - 2$. При этом испускается α -частица – ядро атома гелия. Примером такого процесса может служить α -распад радия:



- Скорость α -частиц, испускаемых при α -распаде ядер радия, измеренная по кривизне траектории в магнитном поле, приблизительно равна $1,5 \cdot 10^7$ м/с, а соответствующая кинетическая энергия около $7,5 \cdot 10^{-13}$ Дж (приблизительно 4,8 МэВ).

- **Бета-распад.** При бета-распаде из ядра вылетает электрон. Внутри ядер электроны существовать не могут, они возникают при β -распаде в результате превращения нейтрона в протон. Этот процесс может происходить не только внутри ядра, но и со свободными нейтронами. Среднее время жизни свободного нейтрона составляет около 15 минут. При распаде нейтрон превращается в протон и электрон. В 1931 году В. Паули высказал предположение, что при распаде нейтрона выделяется еще одна частица с нулевыми значениями массы и заряда, которая уносит с собой часть энергии. Новая частица получила название **нейтрино** (маленький нейтрон).



- **Гамма-распад.** В отличие от α - и β -радиоактивности γ -радиоактивность ядер не связана с изменением внутренней структуры ядра и не сопровождается изменением зарядового или массового чисел. Как при α -, так и при β -распаде дочернее ядро может оказаться в некотором возбужденном состоянии и иметь избыток энергии. Переход ядра из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием одного или нескольких γ -квантов, энергия которых может достигать нескольких МэВ.
- **Закон радиоактивного распада.** В любом образце радиоактивного вещества содержится огромное число радиоактивных атомов. Так как радиоактивный распад имеет случайный характер и не зависит от внешних условий, то закон убывания количества $N(t)$ не распавшихся к данному моменту времени t ядер может служить важной статистической характеристикой процесса радиоактивного распада.
- Пусть за малый промежуток времени Δt количество не распавшихся ядер $N(t)$ изменилось на $\Delta N < 0$. Так как вероятность распада каждого ядра неизменна во времени, что число распадов будет пропорционально количеству ядер $N(t)$ и промежутку времени Δt :
- $\Delta N = -\lambda N(t)\Delta t$.



- Закон радиоактивного распада
- Величина T называется **периодом полураспада**. За время T распадается половина первоначального количества радиоактивных ядер.

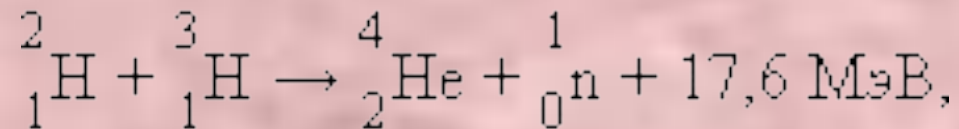
Ядерные реакции

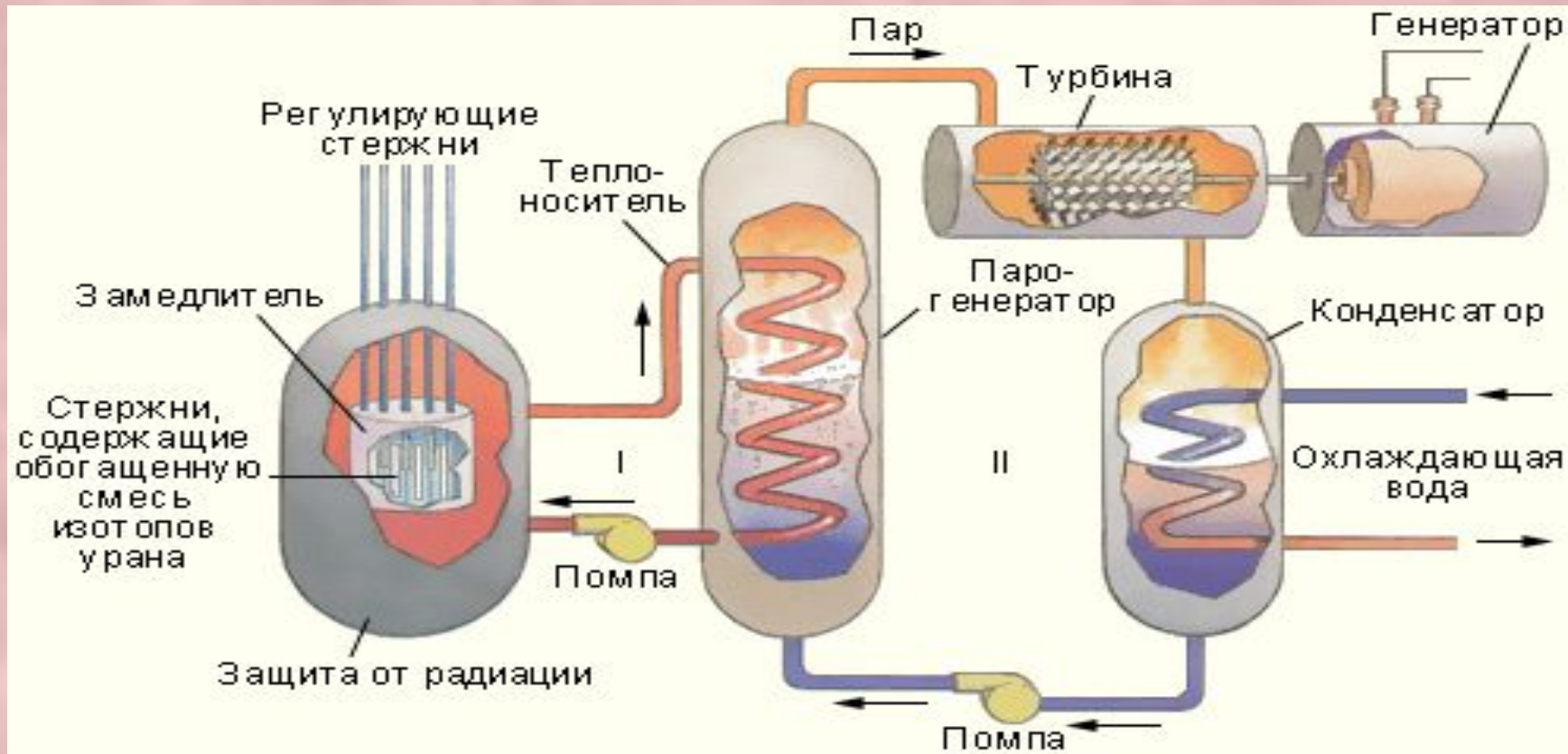
- **Ядерная реакция** – это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов.
- В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях.
- Ядерные реакции сопровождаются энергетическими превращениями. **Энергетическим выходом** ядерной реакции называется величина

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 = \Delta M c^2.$$

где M_A и M_B – массы исходных продуктов, M_C и M_D – массы конечных продуктов реакции. Величина ΔM называется дефектом масс. Ядерные реакции могут протекать с выделением ($Q > 0$) или с поглощением энергии ($Q < 0$). Во втором случае первоначальная кинетическая энергия исходных продуктов должна превышать величину $|Q|$, которая называется **порогом реакции**.

- Возможны два принципиально различных способа освобождения ядерной энергии.
- 1. **Деление тяжелых ядер.** В отличие от радиоактивного распада ядер, сопровождающегося испусканием α - или β -частиц, реакции деления – это процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс.
- 2. **Термоядерные реакции.** Вторым путем освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза.
- Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления ядер. Так, например, в реакции слияния ядер дейтерия и трития





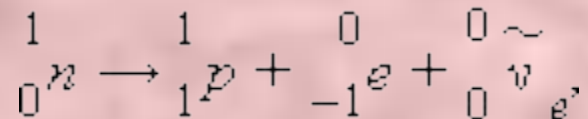
- Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется **ядерным** (или **атомным**) **реактором**.

Элементарные частицы

- Главная задача физики элементарных частиц – это исследование природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.
- В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть элементарными. Подавляющее большинство этих частиц являются нестабильными. Все остальные частицы через определенные промежутки времени испытывают самопроизвольные превращения в другие частицы. Нестабильные элементарные частицы сильно отличаются друг от друга по временам жизни. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин.

- Элементарные частицы объединяются в три группы: **фотоны**, **лептоны** и **адроны**.
- К группе **фотонов** относится единственная частица – фотон, которая является носителем электромагнитного взаимодействия.
- Следующая группа состоит из легких частиц **лептонов**. В эту группу входят два сорта нейтрино (электронное и мюонное), электрон и μ -мезон. Третью большую группу составляют тяжелые частицы, называемые **адронами**. Эта группа делится на две подгруппы. Более легкие частицы составляют подгруппу **мезонов**. Наиболее легкие из них – положительно и отрицательно заряженные, а также нейтральные π -мезоны с массами порядка 250 электронных масс (табл.). Пионы являются квантами ядерного поля, подобно тому, как фотоны являются квантами электромагнитного поля. В эту подгруппу входят также четыре K -мезона и один η^0 -мезон. Все мезоны имеют спин, равный нулю.
- Вторая подгруппа – **барионы** – включает более тяжелые частицы. Она является наиболее обширной. Самыми легкими из барионов являются нуклоны – протоны и нейтроны. За ними следуют так называемые гипероны. Заканчивает таблицу омега-минус-гиперон, открытый в 1964 г.

- **Фундаментальные взаимодействия.**
- **Сильное (или ядерное) взаимодействие** – это наиболее интенсивное из всех видов взаимодействий. Оно обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов. В сильном взаимодействии могут принимать участие только тяжелые частицы – адроны (мезоны и барионы). Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка и менее 10–15 м. Поэтому его называют короткодействующим.
- **Электромагнитное взаимодействие.** В этом виде взаимодействия могут принимать участие любые электрически заряженные частицы, а так же фотоны – кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие ответственно, в частности, за существование атомов и молекул. Оно определяет многие свойства веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях. Кулоновское отталкивание протонов приводит к неустойчивости ядер с большими массовыми числами. Электромагнитное взаимодействие обуславливает процессы поглощения и излучения фотонов атомами и молекулами вещества и многие другие процессы физики микро- и макромира.
- **Слабое взаимодействие** – наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире. В нем могут принимать участие любые элементарные частицы, кроме фотонов. Слабое взаимодействие ответственно за протекание процессов с участием нейтрино или антинейтрино, например, β -распад нейтрона



а также безнейтринные процессы распада частиц с большим временем жизни ($\tau \geq 10^{-10}$ с).

- **Гравитационное взаимодействие** присуще всем без исключения частицам, однако, из-за малости масс элементарных частиц силы гравитационного взаимодействия между ними пренебрежимо малы и в процессах микромира их роль несущественна. Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезды, планеты и т. п.) с их огромными массами.