

АТОМ ВОДОРОДА В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ.

Рассмотрим систему (водородоподобный ион), состоящую из неподвижного ядра с зарядом Ze (e - модуль элементарного заряда) и движущегося вокруг него электрона.

Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром:

$$U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Уравнение Шредингера для стационарных состояний в атоме:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \cdot (E - U) \cdot \psi = 0$$

Решение уравнения Шредингера приводит к следующим результатам:

1. Собственные значения пси-функции, удовлетворяющие стандартным условиям, зависят от трех параметров: n , l , m :

$$\Psi_{n,l,m}$$

2. При $E < 0$, когда электрон «связан» в атоме, значения его энергии квантованы:

$$E = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

n - главное квантовое число.

3. Момент импульса электрона в атоме квантуется:

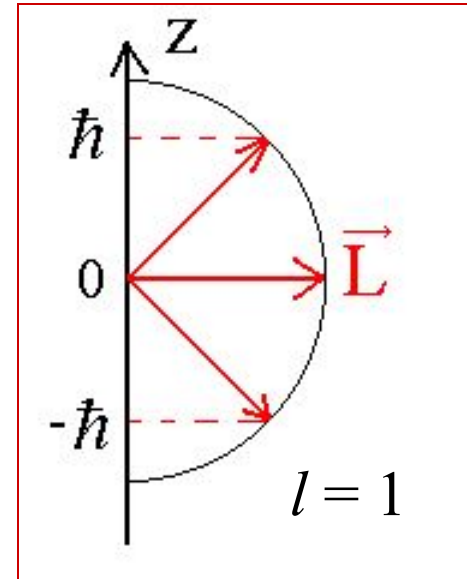
$$L = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar \quad l = 0, 1, 2 \dots (n-1)$$

l - орбитальное (азимутальное) квантовое число.

В квантовой механике доказывается, что возможны лишь такие ориентации момента импульса электрона в атоме, при которых проекция момента импульса на направление z внешнего магнитного поля принимает значения, кратные \hbar :

$$L_z = m \cdot \hbar \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \pm l$$

m - магнитное квантовое число.



Учитывая характер движения электрона в атоме, в современных моделях атома используют понятие электронного облака. Плотность этого облака не одинакова в каждой точке, она изменяется в зависимости от расстояния до ядра и максимальна там, где вероятность нахождения электрона (квадрат модуля волновой функции) принимает наибольшее значение.

Таким образом, классическое понятие траектории для электрона в атоме неприменимо. Форма, размеры и ориентация в пространстве электронного облака определяются квантовыми числами.

Главное квантовое число (n) определяет среднее расстояние электрона от ядра, т.е. Размеры электронного облака. Для атома водорода главное квантовое число характеризует энергию электрона.

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Орбитальное квантовое число (l) определяет момент импульса электрона и характеризует форму электронного облака.

$$l = 0, 1, 2, \dots (n-1)$$

Магнитное квантовое число (m) определяет проекцию момента импульса и характеризует положение электронного облака в пространстве.

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l.$$

Состояния электрона в атоме с заданными квантовыми числами **n** и **l** обозначаются следующим образом:

$l = 0 \rightarrow$ s состояние;

$l = 1 \rightarrow$ p состояние;

$l = 2 \rightarrow$ d состояние;

f, g, h состояния.

Значение **n** указывается перед обозначением числа **l**:

$n = 1, l = 0 \rightarrow$ 1s состояние;

$n = 2, l = 0, 1 \rightarrow$ 2s, 2p состояния;

$n = 3, l = 0, 1, 2 \rightarrow$ 3s, 3p, 3d состояния;

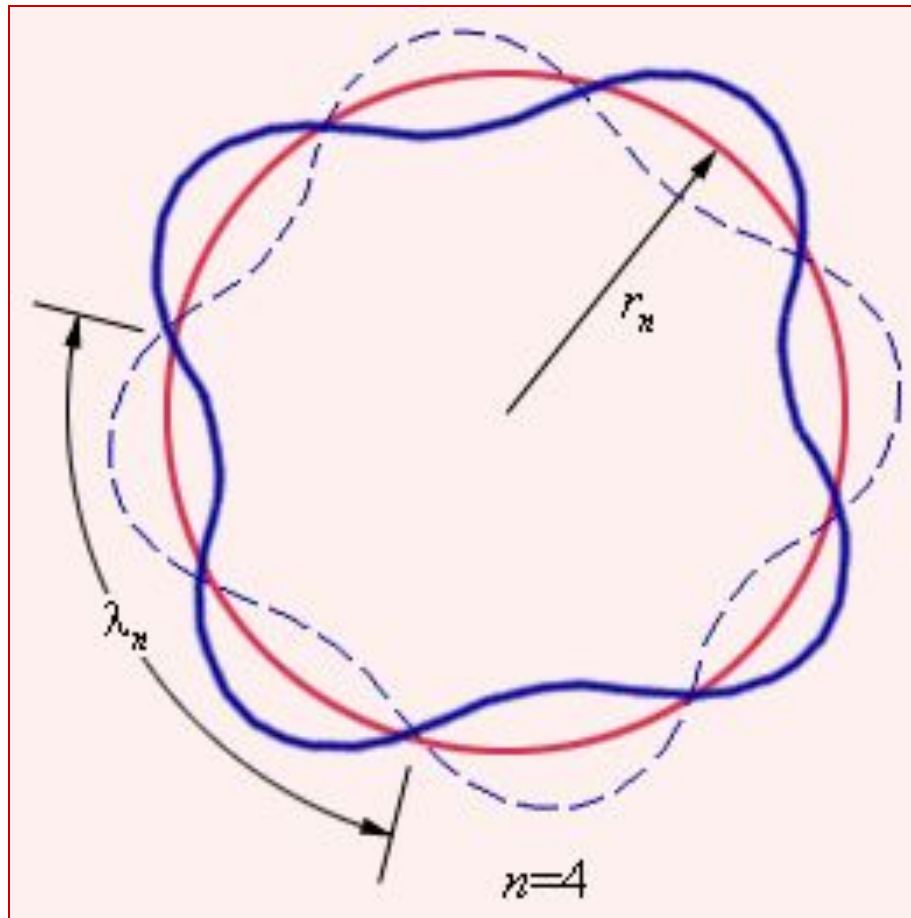
Каждому собственному значению энергии E_n (кроме $n = 1$) соответствует несколько собственных функций $\psi_{n,l,m}$, отличающихся значением квантовых чисел l и m . Состояния с одинаковой энергией называются вырожденными, а число таких состояний - кратностью вырождения энергетического уровня.

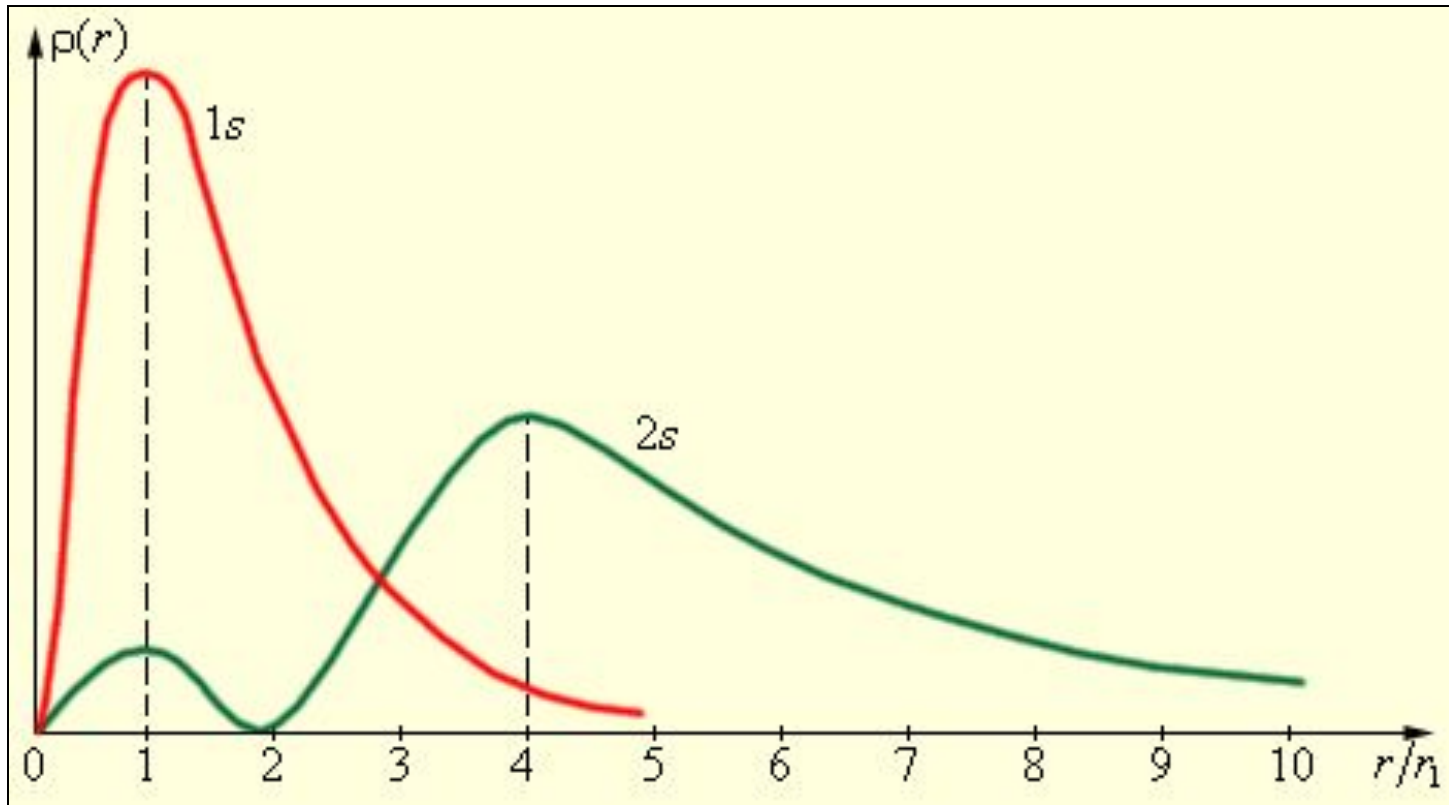
В квантовой механике доказывается правило отбора: при испускании или поглощении фотона атомом, орбитальное квантовое число электрона изменяется на единицу: $\Delta l = \pm 1$.

Серия Лаймана: $np \rightarrow 1s$ ($n = 2, 3, 4, \dots$)

Серия Бальмера: $nS \rightarrow 2p$ и $nd \rightarrow 2p$ ($n = 3, 4, \dots$)

Иллюстрация идеи
де Бройля
возникновения
стоячих волн на
стационарной орбите
для случая $n = 4$.

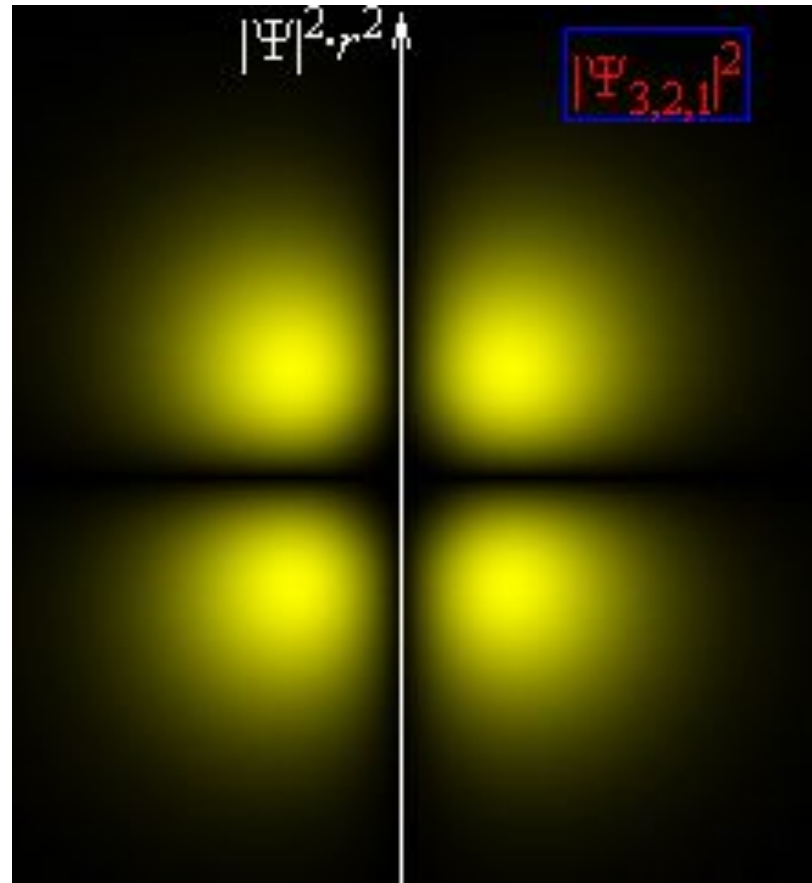




Распределение вероятности обнаружения электрона в атоме водорода в состояниях $1s$ и $2s$.

$r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м – радиус первой боровской орбиты.

Модель. Атом водорода:
 $n=3, m=2, l=1$



СПИН ЭЛЕКТРОНА.

Опытным путем было установлено, что наблюдается пространственное квантование атомов с одним валентным электроном, находящимся в s-состоянии. В этом состоянии момент импульса $L = 0$.

Это квантование относится к спину (собственному моменту импульса) электрона и подтверждает наличие двух возможных вариантов ориентации спина электрона во внешнем магнитном поле.

Наличие спинового (собственного) момента импульса не связано с движением электрона - это внутренне свойство электрона такое же как заряд или масса.

Собственный момент импульса электрона:

$$L_s = \sqrt{S(S+1)} \cdot \hbar$$

$S = 1/2$ - спиновое квантовое число

$$L_s = \sqrt{S(S+1)} \cdot \hbar = \sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1)} \cdot \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

Проекция спина на направление магнитного поля принимает квантованные значения: $L_{s,z} = m_s \cdot \hbar$

$$m_s = \pm S = \pm \frac{1}{2} \quad - \quad \text{магнитное спиновое число.}$$

Помимо собственного момента импульса, электрон обладает собственным магнитным моментом, который также принимает квантованные значения:

$$P_{m,S} = -\frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_e} \cdot 2 \cdot \sqrt{S(S+1)} = -\mu_B \cdot 2 \cdot \sqrt{S(S+1)} = -\mu_B \cdot \sqrt{3}$$

$$\mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_e} \quad - \text{ магнетон Бора}$$

Проекция собственного магнитного момента электрона на направление магнитного поля может принимать следующие значения:

$$P_{m,S_z} = \pm \mu_B$$

Состояние каждого электрона в атоме характеризуется 4 квантовыми числами:

Главное квантовое число (n):	$n = 1, 2, 3, \dots$
Орбитальное квантовое число (l):	$l = 0, 1, 2, \dots (n-1)$
Магнитное квантовое число (m):	$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$
Спиновое квантовое число (m_s):	$m_s = +1/2, -1/2$

ПРИНЦИП ПАУЛИ.

В атоме (или в любой другой квантовомеханической системе) не может быть двух электронов, обладающих одинаковым набором квантовых чисел n, l, m, m_s .

То есть, в одном состоянии в атоме не могут находиться одновременно 2 электрона.

Совокупность электронов, имеющих одинаковые значения n образует оболочку (слой). Оболочки делятся на подоболочки, отличающиеся значением l . В соответствии с значением n оболочкам (слоям) дают обозначения:
 $n = 1$ (K), $n = 2$ (L), $n = 3$ (M), $n = 4$ (N) ...

Оболочка	n	<i>l</i>	m	m_s	Подоболочка
K	1	0 (s)	0	↑↓	K (1s)
L	2	0 (s)	0	↑↓	L ₁ (2s)
		1 (p)	-1	↑↓	L ₂ (2p)
			0	↑↓	
M	3	1 (p)	+1	↑↓	M ₂ (3p)
			0	↑↓	
			-1	↑↓	
		2 (d)	-2	↑↓	M ₃ (3d)
			-1	↑↓	
			0	↑↓	
+1	↑↓				
+2	↑↓				

Для полностью заполненной подоболочки характерно равенство нулю суммарного орбитального и суммарного спинового моментов. Момент импульса такой подоболочки равен нулю.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА (1869 г.)

Систематика заполнения электронных состояний в атомах и периодичность изменения свойств химических элементов позволяют расположить все химические элементы в периодическую систему.

Современная теория периодической системы основывается на следующих положениях:

- 1.** Порядковый номер Z химического элемента равен общему числу электронов в атоме данного элемента.

2. Состояние электрона в атоме определяется набором четырех квантовых чисел: n , l , m , m_s . Распределение электронов в атомах по энергетическим состояниям должно удовлетворять принципу минимума потенциальной энергии: с возрастанием числа электронов каждый следующий электрон должен занять состояние с наименьшим из возможных значений энергии.

3. Заполнение электронами энергетических состояний в атоме должно происходить в соответствии с принципом Паули.

Порядок заполнения электронами в атомах энергетических состояний следующий:

По мере увеличения Z , сначала заполняется оболочка с меньшим значением n и лишь затем заполняется следующая оболочка. Внутри данной оболочки вначале заполняются состояния с $l = 0$, а затем состояния с б'ольшими l вплоть до $l = n-1$. Это правило выполняется для легких атомов. Нарушения данного порядка начинаются с калия ($Z = 19$) - у него вместо заполнения $3d$ подоболочки заполняется $4s$.

Это объясняется следующим:

Взаимодействие электронов в атоме приводит при достаточно больших главных квантовых числах к тому, что состояния с б'ольшим n и меньшим l могут быть энергетически более выгодными, чем состояния с меньшим n , но с б'ольшим l .

В результате имеются химические элементы с недостроенными предыдущими оболочками, у которых достраиваются последующие.

Электроны атома, которые в оболочке с наибольшим значением n входят в состав s и p подоболочек, называются валентными.

Этими электронами определяются многие свойства атомов.

Периодическая система элементов Д.И. Менделеева

ПЕРИ ОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ												
	A I B	A II B	A III B	A IV B	A V B	A VI B	A VII B	A	VIII	B			
1								H ВОДОРОД	He ГЕЛИЙ	U УРАН 92			
2	Li 3 ЛИТИЙ	Be 4 БЕРИЛЛИЙ	B 5 БОР	C 6 УГЛЕРОД	N 7 АЗОТ	O 8 КИСЛОРОД	F 9 ФТОР	Ne 10 НЕОН					
3	Na 11 НАТРИЙ	Mg 12 МАГНИЙ	Al 13 АЛЮМИНИЙ	Si 14 КРЕМНИЙ	P 15 ФОСФОР	S 16 СЕРА	Cl 17 ХЛОР	Ar 18 АРГОН					
4	K 19 КАЛИЙ	Ca 20 КАЛЬЦИЙ	21 Sc СКАНДИЙ	22 Ti ТИТАН	23 V ВАНАДИЙ	24 Cr ХРОМ	25 Mn МАРГАНЕЦ	26 Fe ЖЕЛЕЗО	27 Co КОБАЛЬТ	28 Ni НИКЕЛЬ			
	29 Cu МЕДЬ	30 Zn ЦИНК	31 Ga ГАЛЛИЙ	32 Ge ГЕРМАНИЙ	33 As МЫШЬЯК	34 Se СЕЛЕН	35 Br БРОМ	36 Kr КРИПТОН					
5	Rb 37 РУБИДИЙ	Sr 38 СТРОНЦИЙ	39 Y ИТРИЙ	40 Zr ЦИРКОНИЙ	41 Nb НИОБИЙ	42 Mo МОЛИБДЕН	43 Tc ТЕХНЕЦИЙ	44 Ru РУТЕНИЙ	45 Rh РОДИЙ	46 Pd ПАЛЛАДИЙ			
	47 Ag СЕРЕБРО	48 Cd КАДМИЙ	49 In ИНДИЙ	50 Sn ОЛОВО	51 Sb СУРЬМА	52 Te ТЕЛЛУР	53 I ИОД	54 Xe КСЕНОН					
6	Cs 55 ЦЕЗИЙ	Ba 56 БАРИЙ	57 La* ЛАНТАН	72 Hf ГАФНИЙ	73 Ta ТАНТАЛ	74 W ВОЛЬФРАМ	75 Re РЕНИЙ	76 Os ОСМИЙ	77 Ir ИРИДИЙ	78 Pt ПЛАТИНА			
	79 Au ЗОЛОТО	80 Hg РУТУТЬ	81 Tl ТАЛЛИЙ	82 Pb СВИНЕЦ	83 Bi ВИСМУТ	84 Po ПОЛОНИЙ	85 At АСТАТ	86 Rn РАДОН					
7	Fr 87 ФРАНЦИЙ	Ra 88 РАДИЙ	89 Ac* АКТИНИЙ	104 Rf РЕЗЕРФОРДИЙ	105 Db ДУБНИЙ	106 Sg СИБОРГИЙ	107 Bh БОРИЙ	108 Hs ХАССИЙ	109 Mt МЕЙТНЕРИЙ	110			
* ЛАНТАНОИДЫ													
Ce 58 ЦЕРИЙ	Pr 59 ПРАЗЕОДИМ	Nd 60 НЕОДИМ	Pm 61 ПРОМЕТИЙ	Sm 62 САМАРИЙ	Eu 63 ЕВРОПИЙ	Gd 64 ГАДОЛИНИЙ	Tb 65 ТЕРБИЙ	Dy 66 ДИСПРОЗИЙ	Ho 67 ГОЛЬМИЙ	Er 68 ЭРБИЙ	Tm 69 ТУЛИЙ	Yb 70 ИТТЕРБИЙ	Lu 71 ЛЮТЕЦИЙ
* АКТИНОИДЫ													
Th 90 ТОРИЙ	Pa 91 ПРОАКТИНИЙ	U 92 УРАН	Np 93 НЕПТУНИЙ	Pu 94 ПЛУТОНИЙ	Am 95 АМЕРИЦИЙ	Cm 96 КУРНИЙ	Bk 97 БЕРКЛИЙ	Cf 98 КАЛИФОРНИЙ	Es 99 ЭЙНШТЕЙНИЙ	Fm 100 ФЕРМИЙ	Md 101 МЕНДЕЛЕВИЙ	No 102 (НОБЕЛИЙ)	Lr 103 (ЛОУРЕНСИЙ)
■ - неметаллы			■ - металлы, образующие амфотерные оксиды и гидроксиды				■ - металлы, образующие основные оксиды и основания						

атомный номер

25

Mn

атомная
масса

54,9380

$3d^5 4s^2$

заполнение
электронами
верхнего уровня

марганец

Излучение и поглощение света

Предположим, что электрон находится в водородоподобной системе. Волновая функция имеет вид

$$\Psi_n(x, y, z, t) = \psi_n(x, y, z) e^{-\frac{iW_n t}{\hbar}}$$

Вероятность нахождения электрона в элементе объема dV внутри атома

$$|\psi_n(x, y, z)|^2 dV$$

В квантовом состоянии, характеризуемым квантовым числом n , вероятность местоположения не меняется с течением времени. Электрон с классической точки зрения не совершает колебаний и не излучает энергию.

$$W_n = \text{const}$$

Таким образом, первый постулат Бора является следствием решения уравнения Шредингера

Излучение, происходящее в отсутствии внешних причин, изменяющих энергию атома, называется **самопроизвольным или спонтанным излучением.**

Теория излучения Эйнштейна

W_n - энергия электрона в атоме в начальный момент времени

W_m - энергия электрона в атоме после излучения

A_{nm} - вероятность того, что в течении 1 с произойдет спонтанный переход атома из состояния n в состояние m .

Данная величина называется **Коэффициентом Эйнштейна для спонтанного излучения.**

$$-dN_n = A_{nm} N_n dt$$

Знак минус $-dN$ указывает на убывание числа электронов на уровне n .

$$N_n = N_{n0} e^{-A_{nm}t}$$

Каждый переход сопровождается излучением

$$W_n - W_m = \hbar \omega$$

$$dW = \hbar \omega_{nm} |dN_n| = \hbar \omega_{nm} A_{nm} N_n dt$$

Интенсивность излучения, т.е. Энергия испускаемая в единицу времени

$$I = \frac{dW}{dt} = \hbar \omega_{nm} A_{nm} N_{n0} e^{-A_{nm}t} = I_0 e^{-A_{nm}t}$$

где

$$I_0 = \hbar \omega_{nm} A_{nm} N_{n0}$$

Назовем средней продолжительностью жизни атома в возбужденном состоянии время τ , в течении которого число атомов N_{n0} уменьшается в e раз.

$$N_n = \frac{N_{n0}}{e}$$

$$\frac{N_{n0}}{e} = N_{n0} e^{-A_{nm}t}$$

$$A_{nm} \tau = 1 \Rightarrow \tau_n = \frac{1}{A_{nm}}$$

Коэффициент Эйнштейна имеет определенный физический смысл, это величина обратная среднему времени жизни атома в возбужденном состоянии

$$I = I_0 e^{\frac{-A_{nm}}{\tau_n}}$$

Экспериментальное подтверждение этого закона осуществлено Вином. Измерения интенсивности движущегося пучка в высоком вакууме.

Для линии водорода 6562\AA :

$$\tau_n = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ н}$$

Для линии ртути 2537\AA :

$$\tau_n = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ н}$$

Из принципа неопределенности энергия в возбужденном состоянии определяется с погрешностью

$$\Delta W_n \geq \frac{\hbar}{\tau_n}$$

$\Delta W_n = \check{A}_n$ Естественная ширина энергетического уровня

$$\Delta \nu_{nm} = \frac{\Delta W_n}{2\pi\hbar} \geq \frac{1}{2\pi\tau_n} \Rightarrow \Delta \lambda \approx 10^{-4} \text{ \AA}$$

Дополнительные причины уширения линий

Ударное уширение

Доплеровское уширение

Если атом находится в пространстве, где имеется электромагнитное поле, то между атомом и полем происходит взаимодействие, определяемое законами сохранения энергии и импульса. В присутствии поля должно происходить **вынужденное излучение атома.**

Лазеры - это генераторы и усилители когерентного излучения в оптическом диапазоне, действие которых основано на индуцированном (вызванном полем световой волны) излучении квантовых систем - атомов, ионов, молекул, находящихся в состояниях, существенно отличных от термодинамического равновесия

Лазеры, как и мазеры, генераторы и усилители СВЧ диапазона, называют еще квантовыми генераторами (усилителями), поскольку поведение участвующих в их работе частиц описывается законами квантовой механики. Принципиальным отличием лазеров от всех других источников света (тепловых, газоразрядных и др.), представляющих собой по сути дела источники оптического шума, является высокая степень когерентности лазерного излучения.

С созданием лазеров в оптическом диапазоне появились источники излучения, аналогичные привычным в радиодиапазоне генераторам когерентных сигналов, способные успешно использоваться для целей связи и передачи информации, а по многим своим свойствам - направленности излучения, полосе передаваемых частот, низкому уровню шумов, концентрации энергии во времени и т.д. - превосходящие классические устройства радиодиапазона.

Первая попытка экспериментально обнаружить индуцированное излучение относится, очевидно, к 1928 году, когда Ланденбург, изучая отрицательную дисперсию света, сформулировал условия обнаружения индуцированного излучения как преобладание его над поглощением (условие инверсии), отметив, что для этого необходимо специальное избирательное возбуждение квантовой системы.

В 1939 году советский физик В.А. Фабрикант, изучавший отрицательное поглощение в газах, указал на возможность усиления света за счет индуцированного излучения как на способ обнаружения этого излучения.

То, что первые квантовые приборы появились в радиодиапазоне (СВЧ), связано с тем, что классическая радиофизика не могла решить традиционными для нее методами ряд очень важных с практической точки зрения проблем, таких, как освоение более коротких волн, создание в коротковолновом диапазоне высокостабильных, малошумящих и достаточно мощных приборов. Это настоятельно заставляло искать другой подход к решению этих проблем и привело к созданию в СВЧ-диапазоне принципиально новых приборов - квантовых усилителей и генераторов

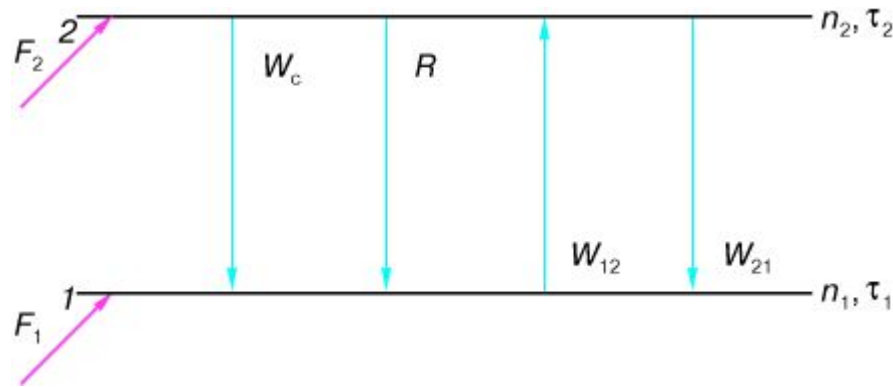
Первый квантовый генератор, работающий на переходе молекулы аммиака с длиной волны 1,25 см, был реализован в 1954 году [Н.Г. Басовым](#) и А.М. Прохоровым в [Физическом институте](#) им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) и группой под руководством Ч. Таунса в Колумбийском университете (США). Первые квантовые усилители СВЧ-диапазона были созданы в 1956 году в ФИАН под руководством А.М. Прохорова и в фирме "Белл телефон" (США)

Квантовые парамагнитные усилители с чрезвычайно низким уровнем собственных шумов позволили повысить на два - три порядка чувствительность приемных устройств СВЧ-диапазона, что обеспечило громадный успех в [радиоастрономии](#), трансконтинентальной связи через космос и вообще в приеме слабых сигналов.

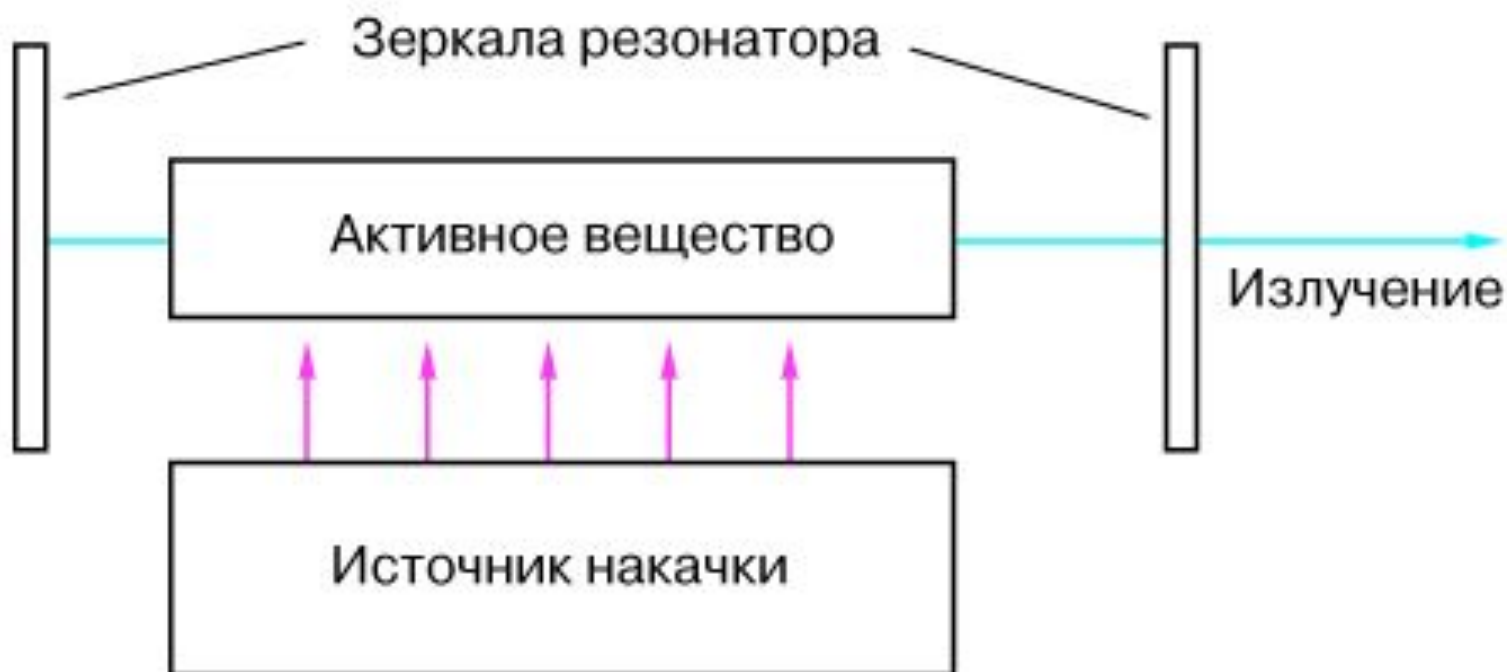
В становлении и развитии квантовой радиофизики, создании мазеров и лазеров большую роль сыграли работы отечественных ученых. Международным признанием этой роли явилось присуждение в 1964 году Н.Г. Басову и А.М. Прохорову вместе с Ч. Таунсом [Нобелевской премии](#) по физике за "основополагающие работы в области квантовой радиофизики, которые привели к созданию генераторов и усилителей в радио и оптическом диапазоне длин волн (мазеров и лазеров)".

ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРА

Возможные переходы в двухуровневой системе. Вероятности: W_c - спонтанного излучения, R - безизлучательной релаксации, W_{12} - поглощения, W_{21} - индуцированного излучения. n_2 и n_1 - плотности населенностей,



- времена жизни уровней. F_2 и F_1 - скорости накачки (число частиц, поставляемых в единицу времени и в единицу объема) на уровни 2 и 1.



Среда, для которой выполняется условие $n_2 > n_1$, называется средой с инвертированной населенностью, и условие инверсии $n_2 > n_1$ является необходимым условием для усиления волны средой и работы лазера.

Ясно, что при термодинамическом равновесии инверсия существовать не может, поскольку, согласно закону Больцмана,

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

и на верхнем уровне частиц меньше, чем на нижнем. Поэтому для получения инверсии среду нужно увести от состояния равновесия. Инверсия населенностей в лазерах достигается в результате совместного действия процессов заселения (накачки) соответствующих уровней и их дезактивации (очистки).

$$F_2\tau_2 > F_1\tau_1$$

- за счет поглощения света (оптическая накачка). Подбирая источник света с соответствующим спектром, можно обеспечить высокую селективность накачки. Наиболее успешно этот вид накачки используется в твердотельных (на кристаллах и стеклах) лазерах и в лазерах на красителях.

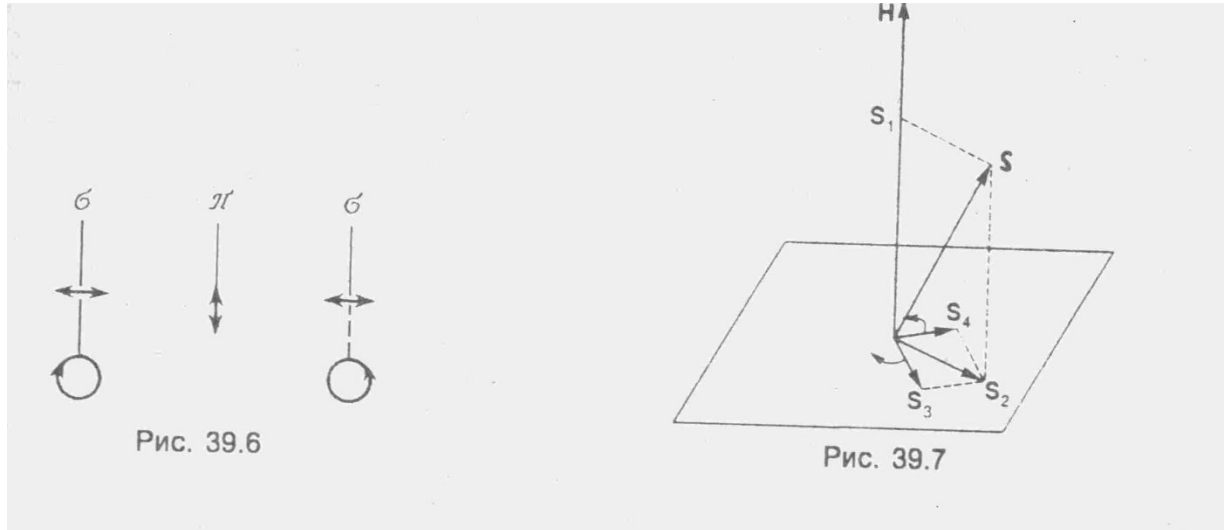
- в неупругих столкновениях атомов и молекул со свободными электронами, при которых часть энергии электрона идет на возбуждение атома или молекулы. Свободные электроны могут создаваться или в газовом разряде, или вводиться в газ в виде пучка, сформированного в ускорителе.

- за счет неупругих столкновений атомов рабочего вещества с возбужденными атомами или ионами вспомогательного газа с передачей энергии возбуждения от них рабочему веществу. В некоторых типах столкновений передача энергии носит резонансный характер и достигается высокая степень селективности заселения уровней.
- в процессе специально подобранных химических реакций (химическая накачка); при этом возбуждаются колебательные уровни молекул, причем возбуждение может быть селективным.
- за счет нагрева (тепловая накачка). Этот метод используется для накачки колебательных уровней в молекулах, инверсия на переходах между которыми осуществляется за счет различных времен релаксации для верхнего и нижнего лазерных уровней при быстром адиабатическом расширении газа. На этом принципе основана работа газодинамических лазеров.

Эффект Зеемана

Спектральные линии источника расщепляются на несколько компонент в магнитном поле

В простейшем случае эффект Зеемана заключается в том, что при помещении источника света в достаточно сильное магнитное поле спектральная линия с частотой ν_0 на три или две компоненты



При наблюдении излучения, распространяющегося перпендикулярно \mathbf{H} , линия разделяется на три (все компоненты линейно поляризованы).

$$\begin{cases} \nu_0 \rightarrow \nu_{-1} [\sigma] \\ \nu_0 \rightarrow \nu_0 [\pi] \\ \nu_0 \rightarrow \nu_{-1} [\sigma] \end{cases}$$

При наблюдении излучения, распространяющегося вдоль \mathbf{H} , линия разделяется на две (все компоненты линейно поляризованы).

$$\begin{cases} \nu_0 \rightarrow \nu_{-1} [\sigma] \\ \nu_0 \rightarrow \nu_{-1} [\sigma] \end{cases}$$

$$\Delta\nu_0 = \frac{\mu_0 e \hbar}{4\pi m_e} = \frac{\mu_0 \mu_A \hbar}{h}$$

$$\mu_A = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad \text{Магнетон Бора}$$

Нормальный эффект Зеемана относительно легко наблюдается наблюдается в спектрах Щелочно-земельных элементах Zn, Cd, Hg

В слабом магнитном поле наблюдается аномальный или сложный эффект Зеемана. В этом случае происходит расщепление спектральных линий на множество компонент, которые относятся по своей поляризованности либо к пи-компонентам либо к сигма-компонентом. Аномальный эффект Зеемана получил свое истолкование после обнаружения спина электрона.

При увеличении напряженности магнитного поля взаимодействие между орбитальными и спиновыми моментами становится все менее существенным по сравнению с взаимодействием каждого из них порознь с внешним полем. Расщепление спектральных линий при этом растет и постепенно начинают сливаться компоненты мультиплетов соседних спектральных линий. В сильном магнитном поле из всех компонент мультиплетов остаются три линии (для поперечного) или две линии (для продольного) нормального эффекта Зеемана.

Переход от аномального к нормальному эффекту Зеемана при увеличении напряженности внешних магнитных полей называется **эффектом Пашена — Бака**.

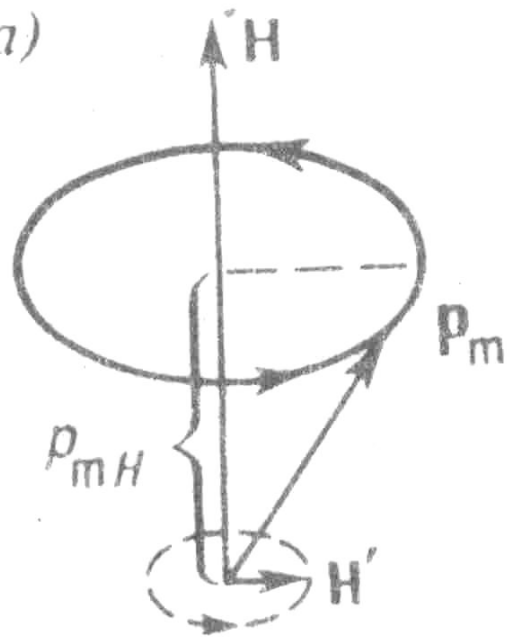
Понятие о явлениях магнитного резонанса

1. С расщеплением энергетических уровней в магнитном поле, обусловленным наличием у электронов, а также у ядерных частиц магнитных моментов, связано явление магнитного резонанса, играющего большую роль в современных методах исследования строения и свойств вещества. |

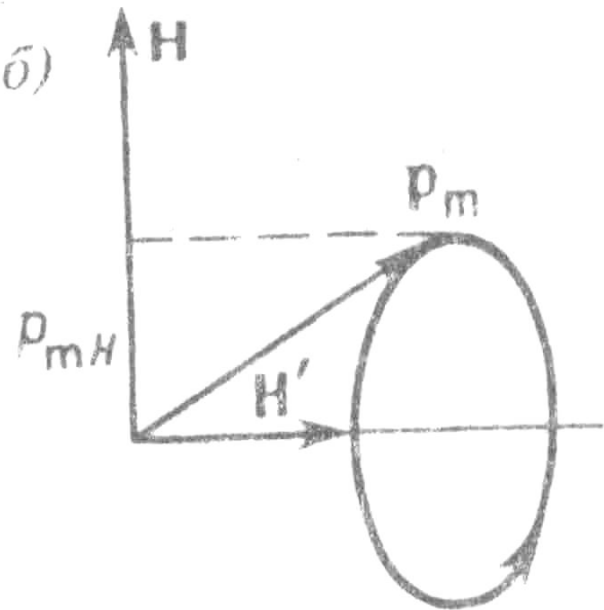
Магнитным резонансом называется избирательное поглощение энергии переменного электромагнитного поля веществом, находящимся в постоянном магнитном поле. Это явление связано с вынужденными переходами между подуровнями *одного и того же* зеемановского мультиплета, возникающего в результате действия постоянного магнитного пол. Опыт и теоретические расчеты показывают, что спонтанные переходы между такими подуровнями не происходят, так как они очень маловероятны. Эти переходы соответствовали бы дл¹ практически достижимых напряженностей магнитного поля излучению с частотами, лежащими в радиодиапазоне. Например, расщеплению, связанному с электронным магнитным моментом, соответствует излучение в области сантиметровых волн. Однако кроме спонтанных переходя возможны вынужденные переходы между подуровнями зеемановского расщепления вызванные наложением на вещество дополнительного *переменного магнитного поля* с частотой совпадающей с частотой перехода между данными двумя подуровнями. Эти вынужденные переходы обуславливают явление магнитного резонанса.

Магнитный резонанс, связанный с наличием у электронов магнитных моментов, называется электронным магнитным резонансом.

a)



б)



Магнитный резонанс может быть использован для определения частоты прецессии. По известной частоте можно определить магнитные моменты электронов.

Существует два различных метода наблюдения магнитного резонанса: *измерение воздействия переменного радиочастотного магнитного поля на молекулярный или атомный пучок (метод И. Раби)*

Измерение поглощения веществом электромагнитных волн соответствующей частоты.

В первом методе пучок частиц, обладающих магнитным моментом, отклоняется в *постоянном неоднородном* магнитном поле и приемник фиксирует число частиц, испытавших в постоянном магнитном поле некоторое определенное отклонение. Если этот пучок одновременно подвергнуть действию переменного радиочастотного магнитного поля, направленного перпендикулярно направлению постоянного магнитного поля, то оно вызовет переходы между подуровнями зеемановского расщепления. Когда частота ν переменного поля не совпадает с частотой переходов (другими словами, с частотой ν_n прецессии вокруг постоянного поля), в приемник попадает то же число частиц, что и в отсутствие переменного поля. При совпадении частоты переменного поля с частотой переходов (с частотой прецессии) все частицы, для которых проекция магнитного момента на направление H постоянного поля изменилась, будут иначе отклоняться в неоднородном поле и не попадут в приемник.

Вторым методом изучения магнитного резонанса, практически более удобным, является исследование резонансного поглощения электромагнитных волн веществом, помещенным в постоянное однородное магнитное поле. Если частота переменного магнитного поля совпадает с частотами, соответствующими переходам между подуровнями зеемановского расщепления, то происходит интенсивное поглощение радиоволн веществом. Благодаря высокой чувствительности современных радиотехнических методов можно наблюдать поглощение волн, частоты которых соответствуют переходам между ближайшими подуровнями. Изучение поглощения в радиочастотной области в принципе не отличается от изучения поглощения волн в области оптических частот. Вся экспериментальная методика исследования магнитного резонанса методом резонансного поглощения более проста, чем в методе молекулярных пучков. Вместе с тем точность этого метода также очень высока.

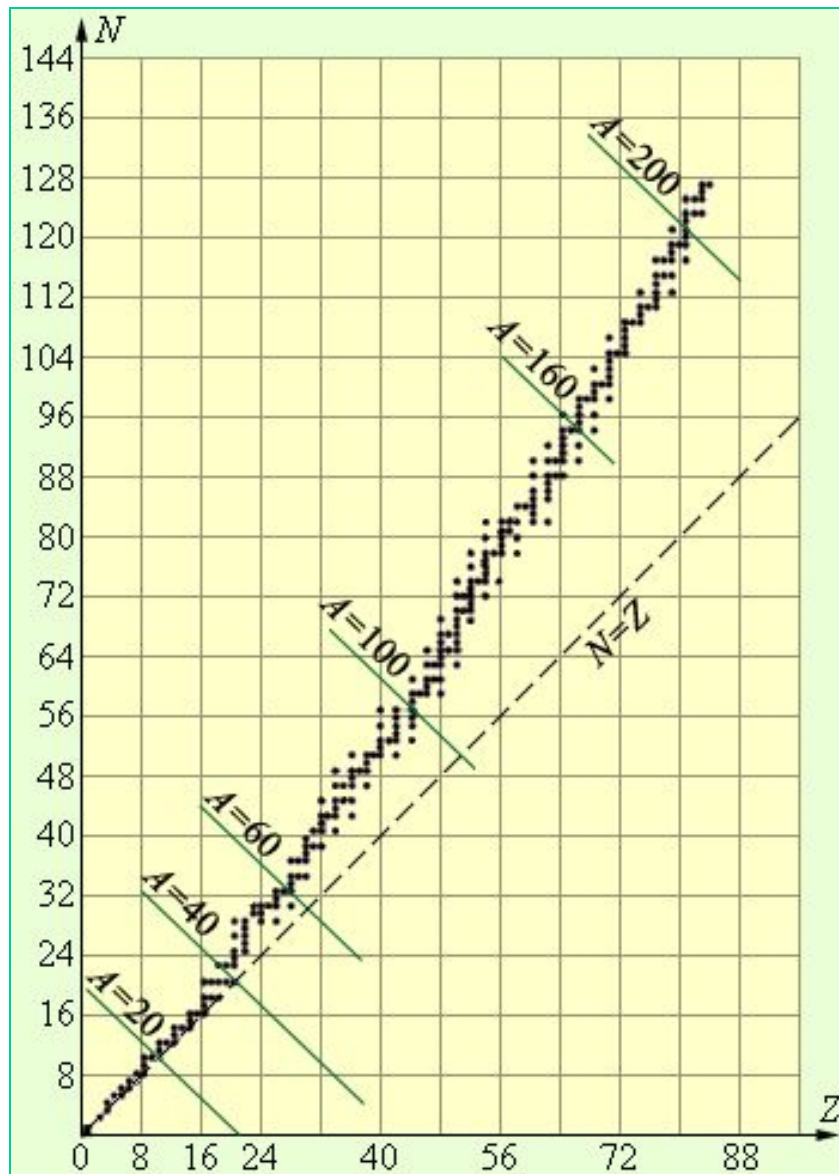
ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ.

Количество протонов Z , входящих в состав ядра, определяет его заряд и называется **зарядовым числом** ядра.

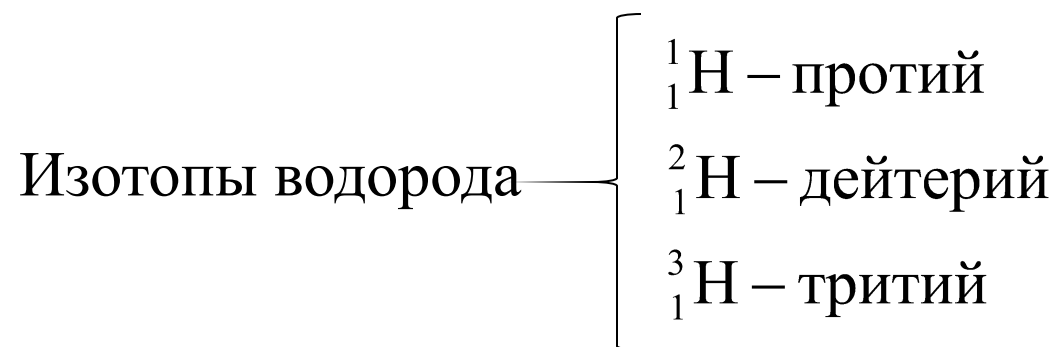
Число нуклонов A в ядре называется **массовым числом** ядра. При превращениях ядер зарядовое и массовое числа сохраняются.

Для обозначения ядер применяют символ ${}^A_Z X$, где под X подразумевается химический символ элемента. Вверху ставится массовое число, внизу - атомный номер (зарядовое число).

Числа протонов и
нейтронов в
стабильных ядрах



Ядра с одинаковым Z , но разным A называются **ИЗОТОПЫ**:



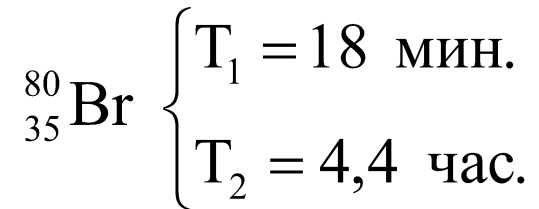
Ядра с одинаковым A называются **ИЗОБАРЫ**:



Ядра с одинаковым числом нейтронов называются **ИЗОТОНЫ**:



Ядра с одинаковыми Z и A , отличающиеся периодом полураспада, называются **ИЗОМЕРЫ**:



Спин нуклона равен $1/2$. Спины нуклонов складываются в спин ядра. Квантовое число спина ядра полуцелое при нечетном числе нуклонов и целое или равно нулю при четном числе нуклонов. Спины ядер не превышают нескольких единиц, т.к. спины большинства нуклонов взаимно компенсируют друг друга, т.е. располагаются антипараллельно.

Масса ядра $m_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом. Энергия связи $E_{\text{св}}$ равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом. Согласно закону взаимосвязи массы и энергии энергия связи нуклонов в ядре:

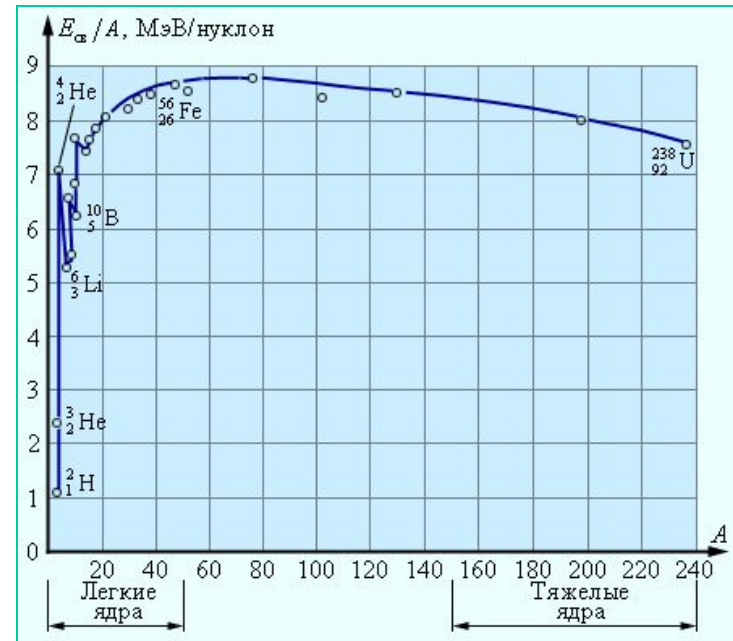
$$E_{\text{св.}} = c^2 ((Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) - m_{\text{я}}) = \Delta m \cdot c^2$$

Дефект масс:
$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{\text{я}}$$

Удельная энергия связи ядер



Такая зависимость
удельной энергии связи от
 A делает возможным два
процесса:



1. Деление тяжелых ядер на более легкие.
2. Слияние (синтез) легких ядер в одно ядро
(термоядерная реакция)

Оба процесса сопровождаются выделением большого количества энергии.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ.

Взаимодействие нуклонов в ядре носит характер притяжения. Ядерное взаимодействие называют сильным взаимодействием. Его описывают с помощью поля ядерных сил. Свойства ядерных сил:

1. Ядерные силы - короткодействующие (радиус действия $\sim 10^{-15}$ м).
2. Зарядовая независимость ядерных сил.
3. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов.
4. Ядерные силы не являются центральными.
5. Ядерные силы обладают свойством насыщения: каждый нуклон взаимодействует с ограниченным числом нуклонов.

По современным представлениям сильное взаимодействие обусловлено тем, что нуклоны обмениваются виртуальными частицами - мезонами:

$$\pi \text{ мезоны : } \begin{cases} \pi^+ & \text{— положительный} \\ \pi^- & \text{— отрицательный} \\ \pi^0 & \text{— нейтральный} \end{cases}$$

Нуклон в ядре в результате процессов распада оказывается окруженным некоторым количеством π -мезонов, образующих поле ядерных сил.

РАДИОАКТИВНОСТЬ.

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц. К числу радиоактивных процессов относятся:

- 1) α -распад,
- 2) β -распад,
- 3) γ -излучение ядер,
- 4) спонтанное деление тяжелых ядер,
- 5) протонная радиоактивность.

Естественная радиоактивность открыта в 1896 г. Беккерелем. Были обнаружены три компоненты радиоактивного излучения: α , β , γ - компоненты:
 α - поток ядер гелия (α - частиц);
 β - поток электронов;
 γ - излучение с длиной волны порядка 1 \AA и менее.

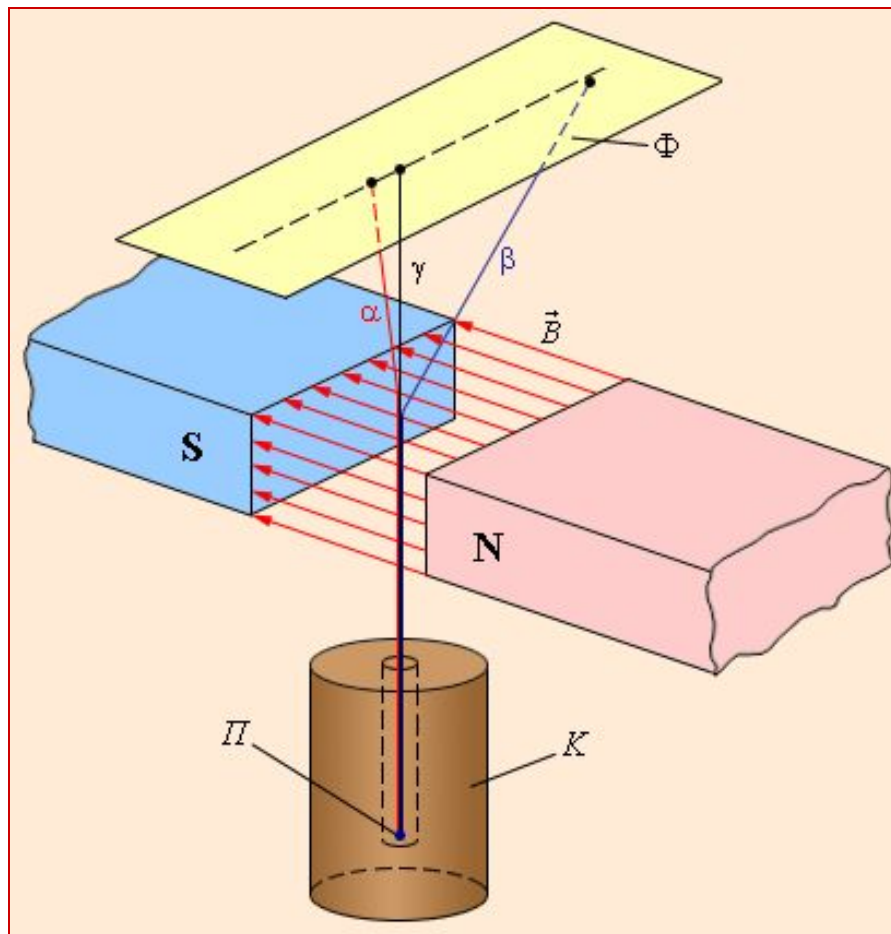


Схема опыта по обнаружению α -, β - и γ -излучений.
 K – свинцовый контейнер, Π – радиоактивный препарат, Φ – фотопластинка.

Закон радиоактивного превращения выражается формулой:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 - количество ядер в начальный момент времени ($t = 0$);

N - количество нераспавшихся ядер в момент времени t ;

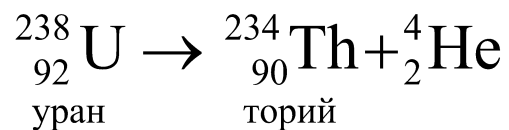
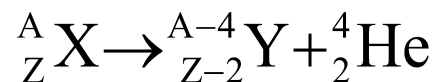
λ - постоянная радиоактивного распада.

Время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, называется период полураспада:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T} \rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \rightarrow \ln 2 = \lambda T \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



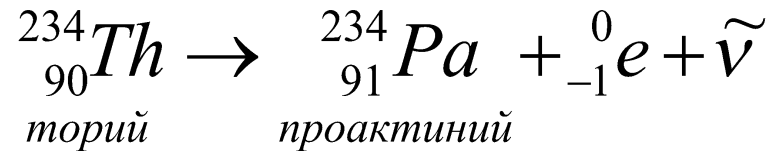
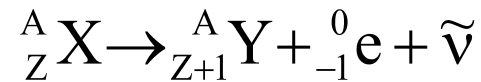
1. α -распад:



Атомный номер дочернего ядра Y на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у исходного (материнского) ядра X.

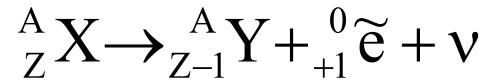
2. β-распад:

2.1. Электронный распад:



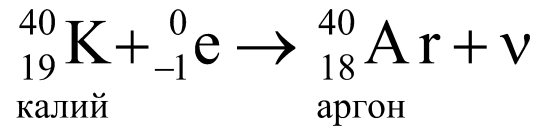
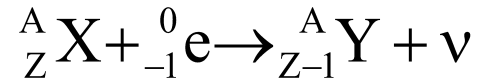
Дочернее ядро имеет атомный номер, на единицу больший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы. Наряду с электроном испускается также антинейтрино.

2.2. Позитронный распад:



Дочернее ядро имеет атомный номер, на единицу меньший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы. Также испускаются позитрон (антиэлектрон) и нейтрино.

2.3. Электронный захват:



Дочернее ядро имеет атомный номер, на единицу меньший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы. Также поглощается электрон и испускается нейтрино.

3. Спонтанное деление тяжелых ядер: например, ядро урана делится на две примерно равные части.

4. Протонная радиоактивность: ядро испускает 1 или 2 протона.

Схема распада радиоактивной серии. Указаны периоды полураспада.

