

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The metal spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight drop shadow.

# **Физика колебаний и волн. Квантовая физика.**

# Лекция № 14

## Основные положения квантовой механики (продол.).

1. Квантовые числа. Главное квантовое число.
2. Орбитальное квантовое число.
3. Магнитное квантовое число.
4. Кварки.

# Квантовые числа

В квантовой механике доказывається, что уравнению Шредингера удовлетворяют *собственные функции*  $\Psi_{nlm}$ , определяемые *тремя квантовыми числами*:

- *главным  $n$* ,
- *орбитальным  $l$* ,
- *магнитным  $m$* .

Как уже сказано *главное квантовое число  $n$* , *определяет энергетические уровни электрона* в атоме и может принимать любые целочисленные значения начиная с единицы ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

**Главное квантовое число  $n$**   
**характеризует расстояние электрона от ядра**  
**– радиус орбиты.**

---

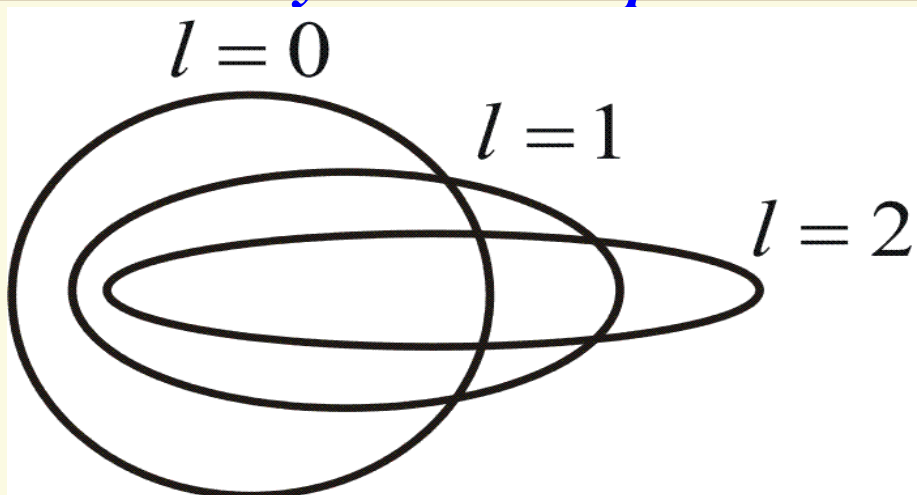
В атомной физике состояния электрона, соответствующие главному квантовому числу  $n$ , ( $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) принято обозначать буквами  $K, L, M, N, \dots$

$n$	1	2	3	4
	$K$	$L$	$M$	$N$

## Орбитальное квантовое число

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

характеризует эллиптичность орбиты электрона и  
определяет момент импульса электрона  $L$



Состояния, соответствующие орбитальному числу  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ , также обозначаются буквами

$s, p, d, f, \dots$

*sharp*, *principal*,  
*diffuse*,  
*fundamental*

	0	1	2	3
$l$	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>

*Условия, накладываемые на изменения квантовых чисел при переходах системы из одного состояния в другое, называются правилами отбора.*

---

1) изменение орбитального квантового числа  $\Delta l$  удовлетворяет условию:

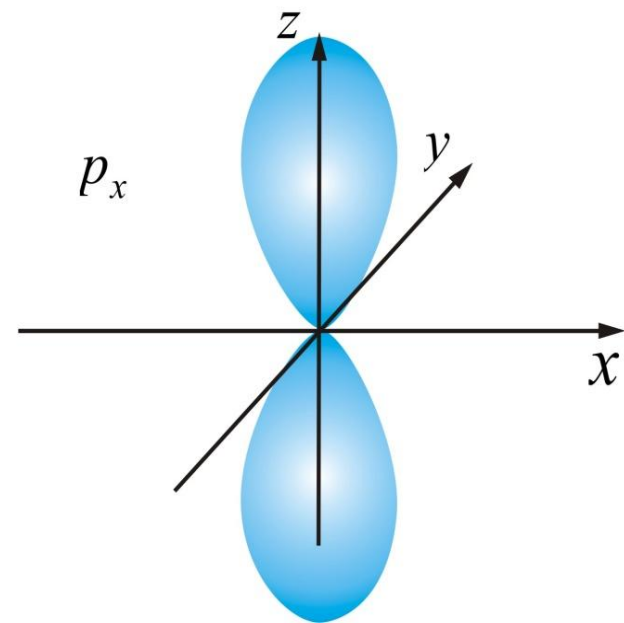
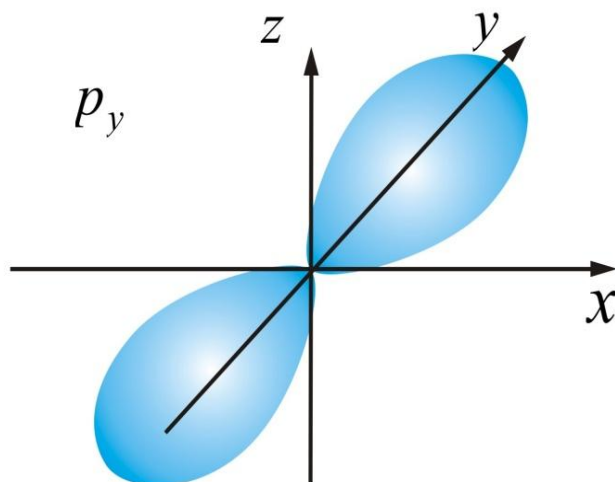
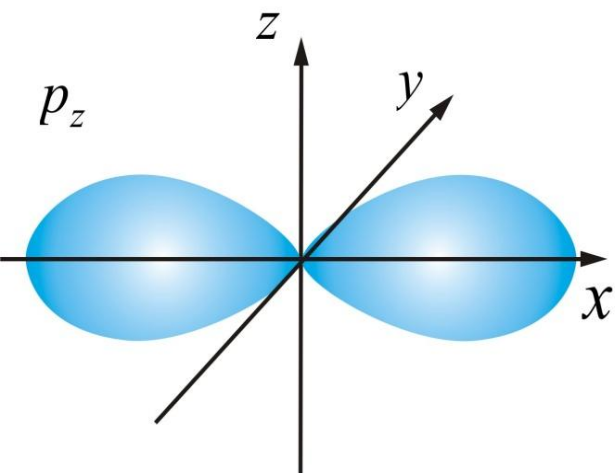
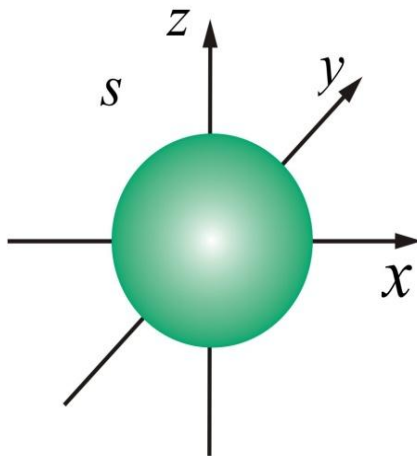
$$\Delta l = \pm 1$$

2) изменение магнитного квантового числа  $m$  удовлетворяет условию:

$$\Delta m = \pm 1$$

Квадрат модуля функции  $|\Psi|^2$  характеризует вероятность найти электрон в заданной точке. **Область пространства, в которой высока вероятность обнаружить электрон (не менее 0,95), называют орбиталью.**

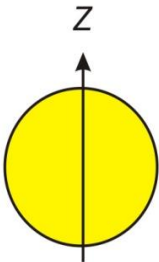
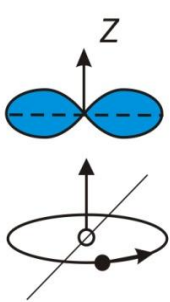
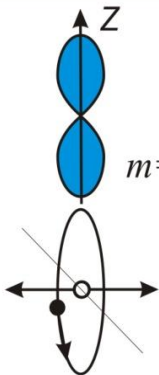
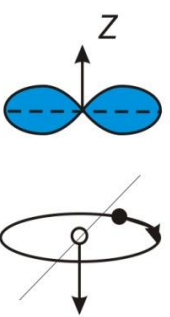
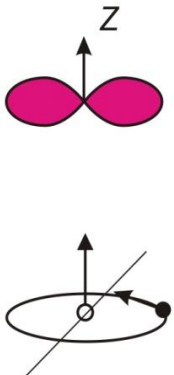
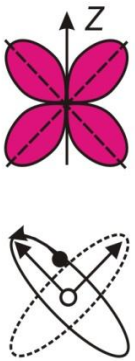
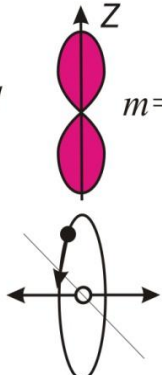
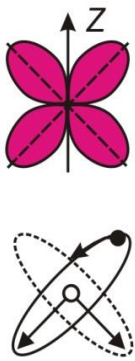
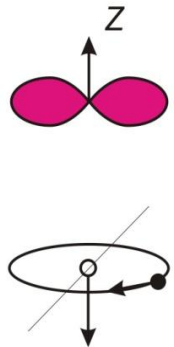
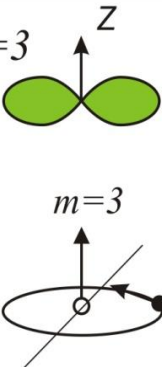
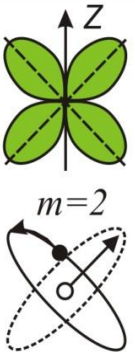
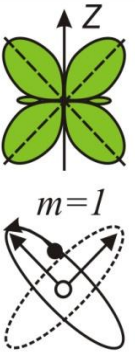
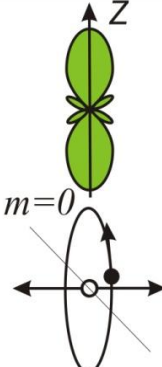
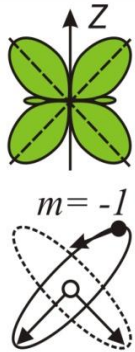
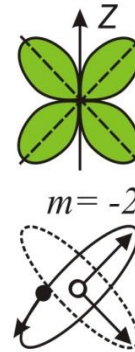
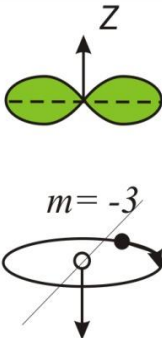
$l$	0	1
	$s$	$p$





**Орбитали часто называют подоболочками оболочек, поскольку они характеризуют формы разных**

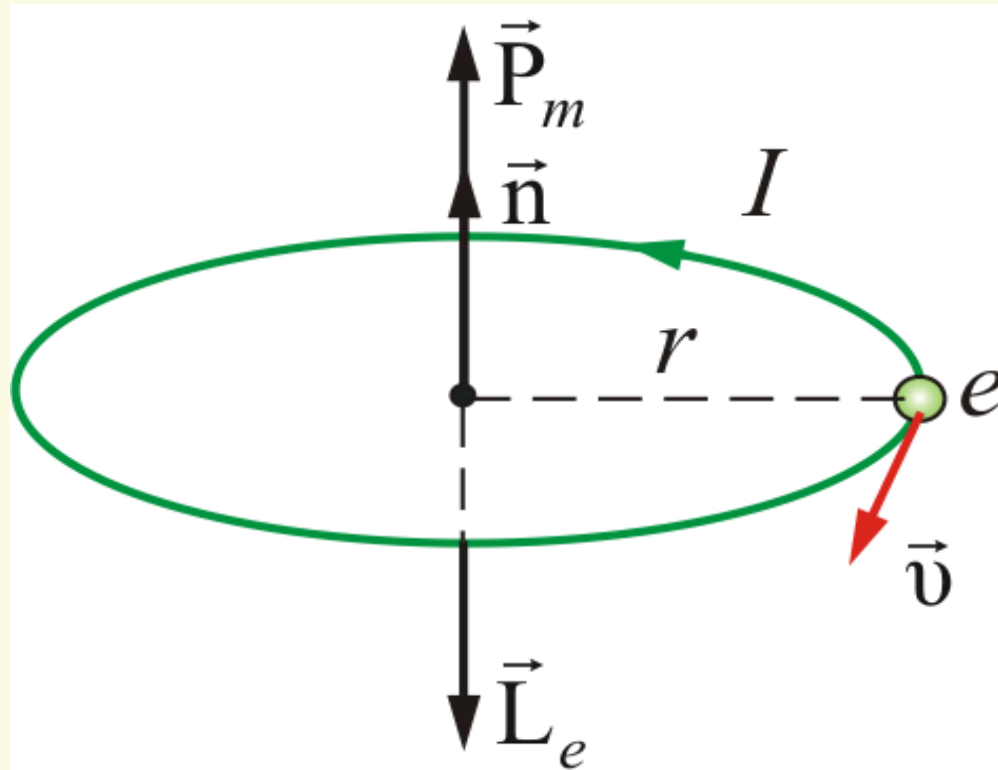
орбит, на которых можно обнаружить электроны, находящиеся в одной оболочке (при заданном квантовом числе  $n$  ).

s-электроны	$l=0$  $M=0$	p-электроны	$l=1$  $m=1$  $m=0$  $m=-1$
d-электроны	$l=2$  $m=2$  $m=1$  $m=0$  $m=-1$  $m=-2$		
f-электроны	$l=3$  $m=3$  $m=2$  $m=1$  $m=0$  $m=-1$  $m=-2$  $m=-3$		



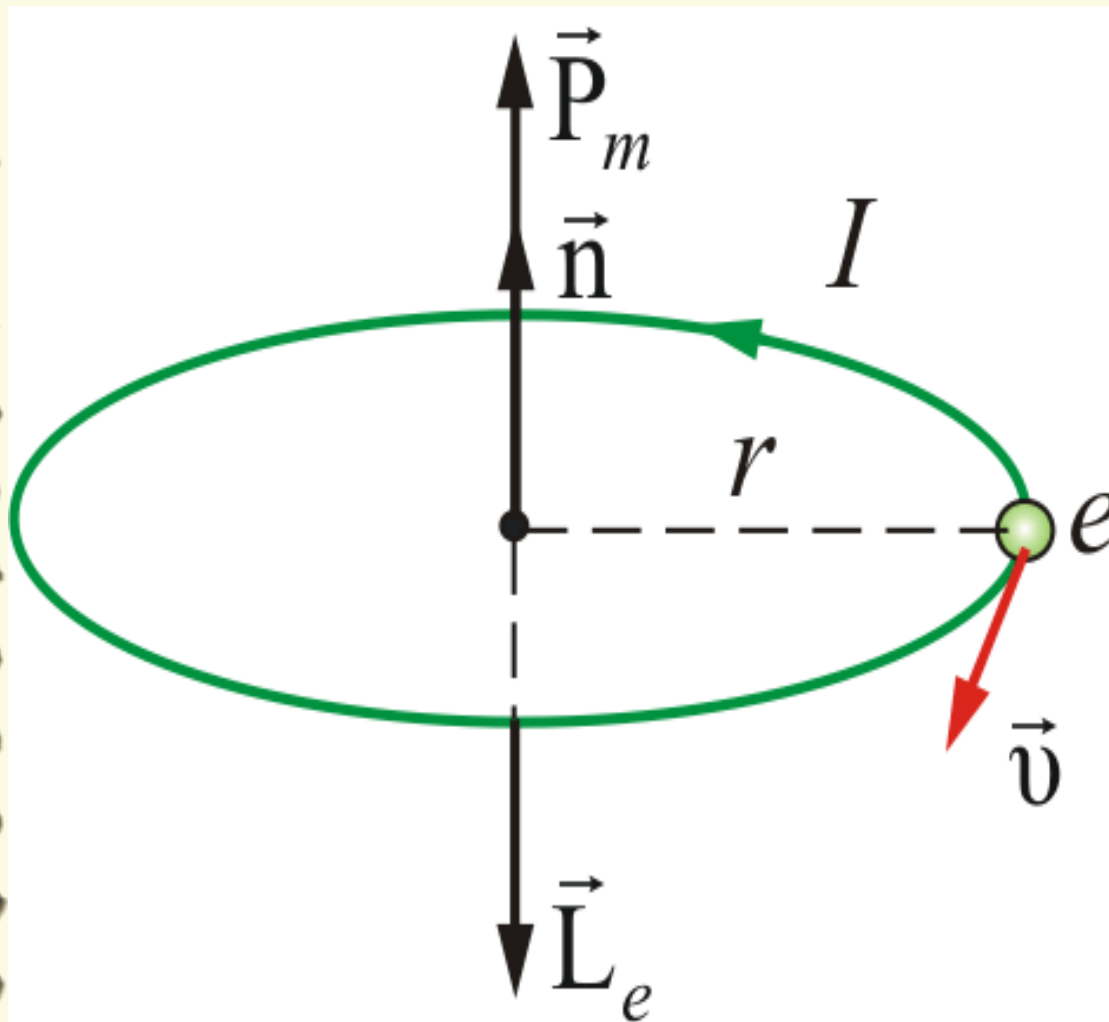
# Магнитное квантовое число

Из курса электричество магнетизма мы знаем, что орбитальный момент импульса электрона  $\vec{L}$  и пропорциональный ему магнитный момент  $\vec{P}_m$  ориентированы перпендикулярно плоскости орбиты электрона и противоположно направлены.



Между  $\vec{L}$  и  $\vec{P}_m$   
существует связь:

$$\vec{P}_m = -g\vec{L} = -\frac{|e|}{2m}\vec{L}$$



$$g = \frac{|e|}{2m}$$

*-Орбитальное  
гиромагнитное  
отношение.*

Такая связь  
векторов  
сохраняется и в  
теории Бора.

*В квантовой механике* строго доказывается (это следует из решения уравнения Шредингера), что *проекция ( $L_z$ )* вектора  $\vec{L}$  на направление внешнего поля ( $z$ ) *может принимать лишь целочисленные значения кратные  $\hbar$ :*

$$L_z = m\hbar$$

*$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$  – магнитное квантовое число.*

*$l$  – орбитальное квантовое число,*

Таким образом, *орбитальный момент импульса электрона*  $\vec{L}$  может принимать  $(2l + 1)$  ориентаций в пространстве.

В 1925 г. студенты Геттингенского университета *Гаудсмит* и *Уленбек* предложили существование собственного механического момента импульса у электрона  $S$  (спина) и, соответственно, *собственного магнитного момента электрона  $m_S$* .

Авторы дали такое толкование *спина: электрон – вращающийся волчок.*

*Спин, как заряд и масса есть свойство электрона.*

*П.Дирак* впоследствии показал, что *существование спина вытекает из решения релятивистского волнового уравнения Шредингера.*

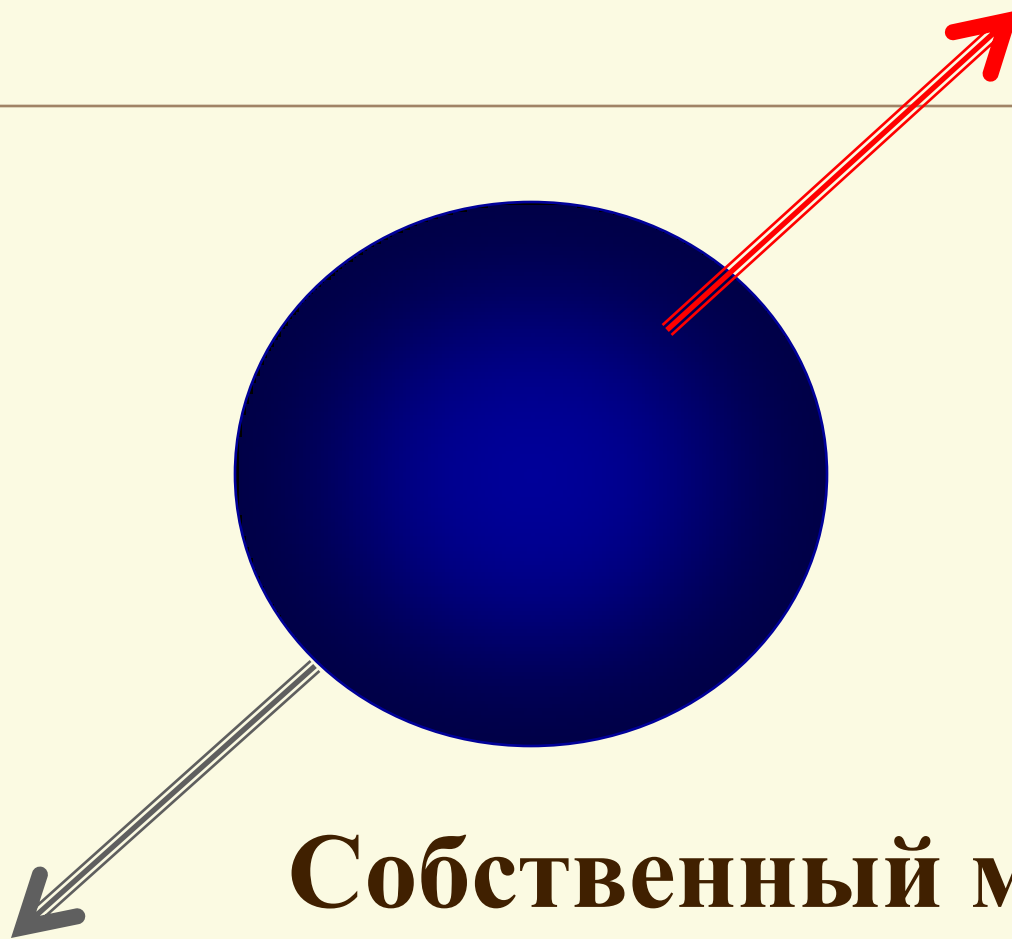
Из общих выводов квантовой механики следует, что *спин:*

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

*Спиновое квантовое число  $S$  имеет только одно значение  $S = 1/2$  ( для электрона).*

# Спин электрона $S$

---



**Собственный магнит-  
ный момент электрона**

**Частицы с полуцелым спином  $S = 1/2$**

(например, **электроны, протоны, нейтроны**)

описываются антисимметричными волновыми

функциями и подчиняются *статистике Ферми-Дирака*; эти частицы называются **фермионами**.

**Частицы с нулевым или целочисленным**

**спином** (например,  **$\pi$ -мезоны, фотоны**)

описываются симметричными волновыми

функциями и подчиняются *статистике Бозе*

— *Эйнштейна*; эти частицы называются **бозонами**.

**Принцип Паули:** в системе одинаковых фермионов любые два из них не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии.

Главное квантовое число $n$	1	2	3	4	5
Символ оболочки	K	L	M	N	O
Максимальное число электронов в оболочке	2	8	18	32	50
Орбитальное квантовое число $l$	0	0 1	0 1 2	0 1 2 3	0 1 2 3 4
Символ подоболочки	1 s	2 s 2 p	3 s 3 p 3 d	4 s 4 p 4 d 4 f	5 s 5 p 5 d 5 f 5 g
Максимальное число электронов в подоболочке	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14 18



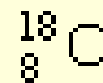
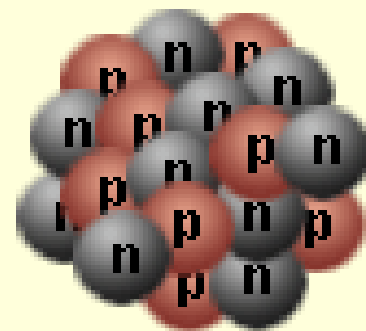
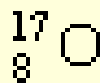
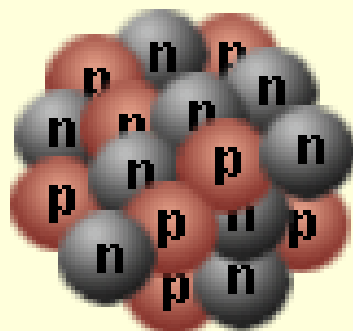
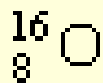
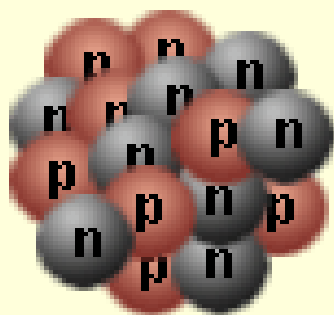
**В состав атомного ядра входят элементарные частицы: протоны и нейтроны (нуклоны).**

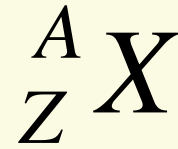
Протон имеет положительный заряд

$$e^+ = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

и массу покоя

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e.$$





Заряд ядра равен  $Z \cdot e$ ,

где  $e$  — заряд протона,  $Z$  — **зарядовое число**,  
равное **порядковому номеру** химического  
элемента в периодической системе элементов  
Менделеева, т.е. числу протонов в ядре.

В настоящее время известны ядра с

$$Z = 1 \quad \text{до} \quad Z = 107 - 118$$

$A = Z + N$  называется **массовым числом**.

Ядра с одинаковым  $Z$ , но различными  $A$   
называются **изотопами**.

Ядра, которые при одинаковом  $A$  имеют  
разные  $Z$  называются **изобарами**.

# Кварки

**Кварки, лептоны, калибровочные бозоны.**

На современном уровне знания фундаментальными частицами вещества считаются кварки и лептоны.

Они имеют **полуцелый спин (фермионны)**.

Кроме кварков и лептонов существуют частицы с целым значением спина.

Эти частицы получили название **калибровочных бозонов** они *переносят взаимодействие между кварками и лептонами*.. Лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях, имеют спин  $1/2$  и лептонные заряды  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .

# Кварки

Характеристика	Тип кварка					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд $Q$	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число $B$	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Спин $J$	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность $P$	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин $I$	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина $I_3$	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность $s$	0	0	-1	0	0	0
<i>Charm</i> (очарование) $c$	0	0	0	+1	0	0
<i>Bottomness</i> ( <i>beauty</i> ) $b$	0	0	0	0	-1	0
<i>Topness</i> ( <i>truth</i> ) $t$	0	0	0	0	0	+1
Масса в составе адрона, ГэВ	0,33	0,33	0,51	1,8	5	180
Масса «свободного» кварка, ГэВ	0,007	0,005	0,15	1,3	4,1–4,4	174

# Семейство кварков:

Верхний

$U$



Нижний

$D$



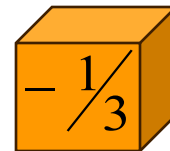
Странный

$S$



Прекрасный

$B$



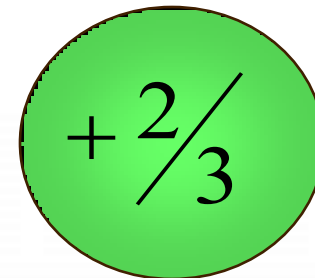
Очарованный

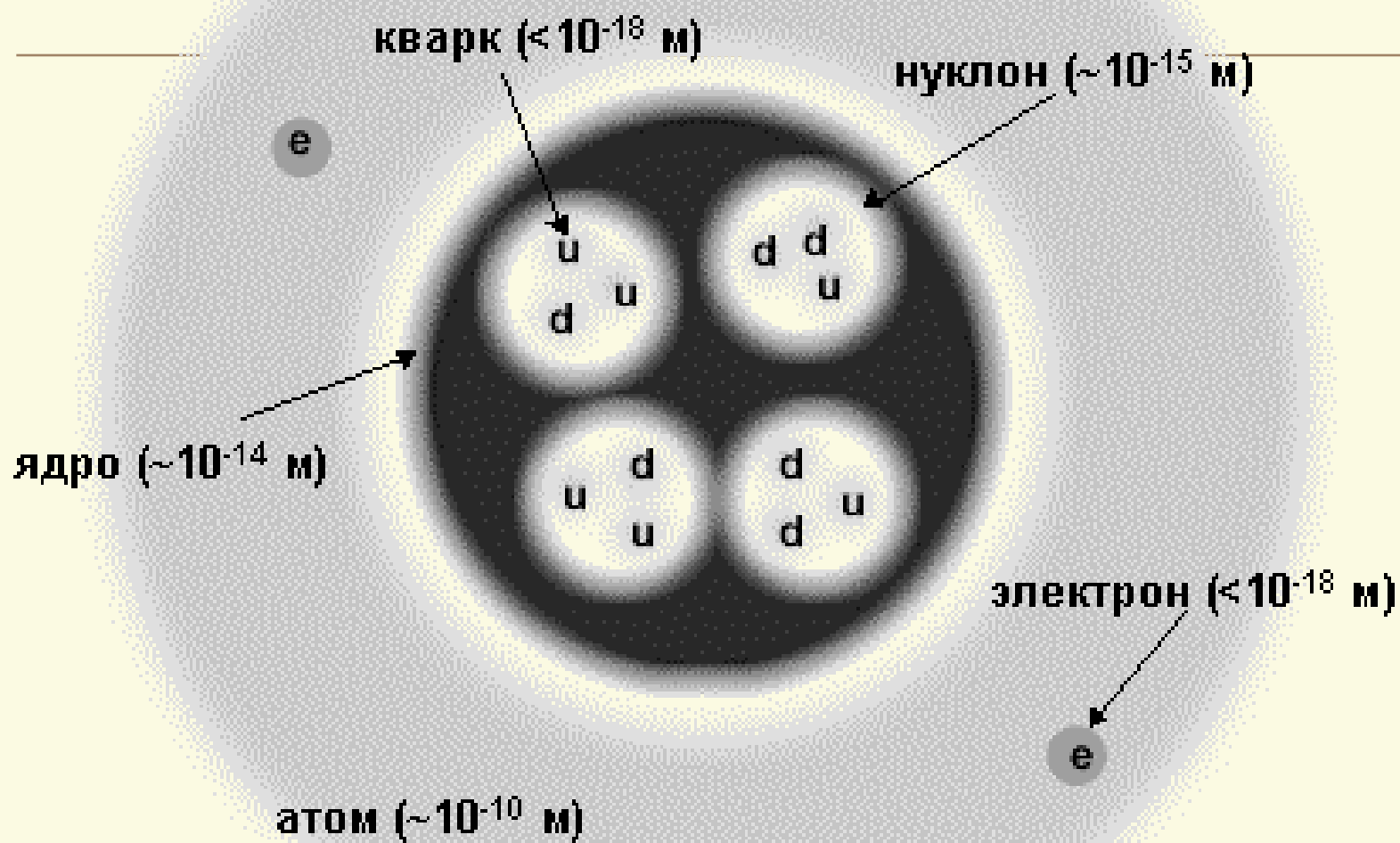
$C$



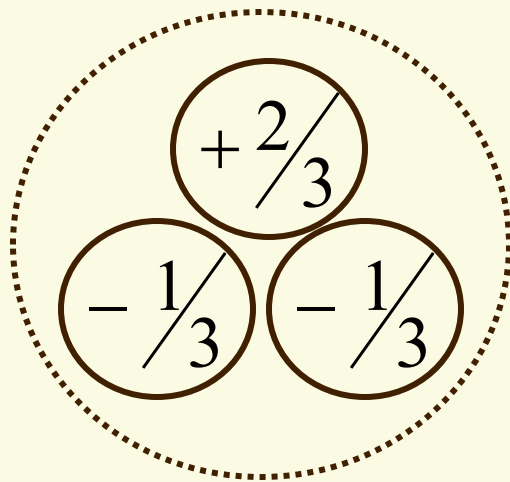
Высший

$T$





# Непривычное свойство - дробные заряды



u

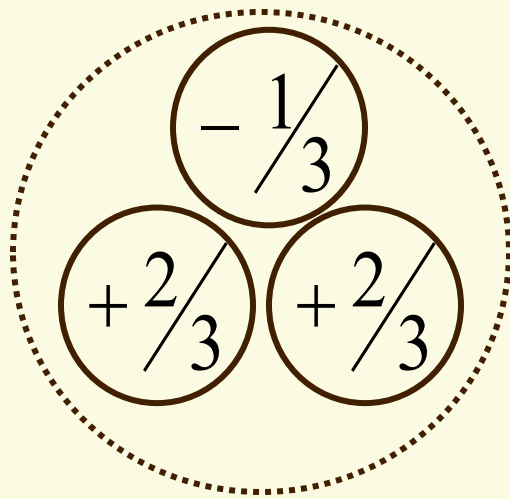
d d



**Заряд составной частицы  
равен сумме зарядов  
кварков**



# Непривычное свойство - дробные заряды

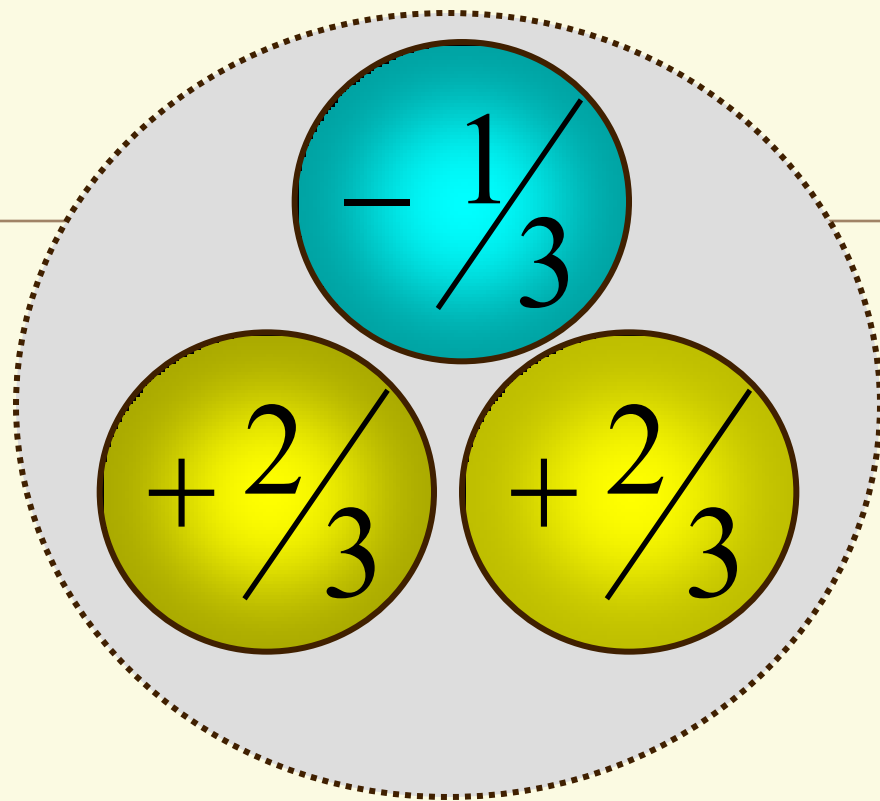


d

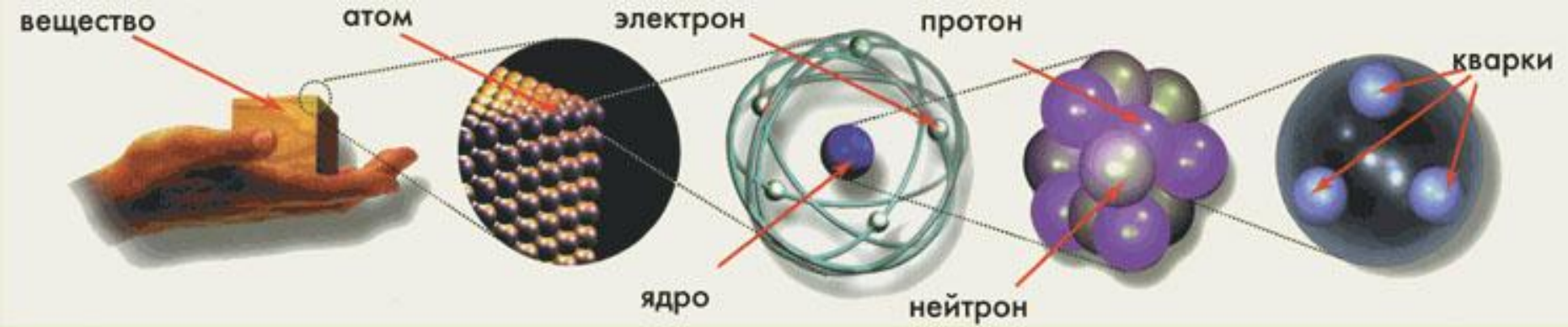
u u



**Заряд составной частицы  
равен сумме зарядов  
кварков**



Точечные заряды  
оказались дробными !



Различают *три уровня микромира*:

1. *Молекулярно-атомный*

$$E = 1 - 10 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м}$$

2. *Ядерный*

$$E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$$

3. *Мельчайшие частицы*

$$E < 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r < 10^{-15} \text{ м}$$

Тип взаимодейс твий	Механизм обмена	Интенс ивность , $\alpha$	Радиус действи я $r$ , м	Характе рное время жизни, $\tau$ , с
Сильное	глюонами	$\approx 1$	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромаг нитное	фотонами	$\approx 1/137$	$\infty$	$\approx 10^{-18}$
Слабое	промежут очные бозоны	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
Гравитацио нное	гравитон ы	$\approx 10^{-38}$	$\infty$	?

вещество

атом

электрон

протон

кварки

ядро

нейтрон

Фундаментальные фермионы

## ЛЕПТОНЫ

Электрический заряд

-1

0

Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.

первое поколение

Электрон  
переносит электрический ток  
 $m = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$



Электронное нейтрино  
играет фундаментальную роль при горении солнца, каждую секунду сквозь вас пролетают миллиарды этих частиц



второе поколение

Мюон  
аналог электрона, время жизни – 2 микросекунды  
 $m = 106 \text{ МэВ}/c^2$



Мюонное нейтрино  
образуется при рождении и распаде мюонов  
 $m < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$



третье поколение

Тау  
аналог электрона, время жизни –  $3 \times 10^{-13}$   
 $m = 1777 \text{ МэВ}/c^2$



Тау нейтрино  
образуется при рождении и распаде тау лептонов, открыто в 1975 г.  
 $m < 20 \text{ МэВ}/c^2$



## КВАРКИ

+2/3

-1/3

первое поколение

u-кварк  
входит в состав протонов и нейтронов  
 $m = 3 \text{ МэВ}/c^2$



d-кварк  
входит в состав протонов и нейтронов  
 $m = 6 \text{ МэВ}/c^2$



второе поколение

s-кварк (очарованный)  
открыт в 1974 г.  
 $m = 1300 \text{ МэВ}/c^2$



z-кварк (странный)  
открыт в 1964 г.  
 $m = 100 \text{ МэВ}/c^2$



третье поколение

t-кварк  
открыт в 1995 г.  
 $m = 175000 \text{ МэВ}/c^2$



b-кварк (прекрасный)  
открыт в 1977 г.  
 $m = 4300 \text{ МэВ}/c^2$



Кванты фундаментальных полей

Глюоны  
кванты сильных взаимодействий



кварки и глюоны

Фотоны  
кванты электромагнитных полей



Все заряженные частицы

Взаимодействуют:

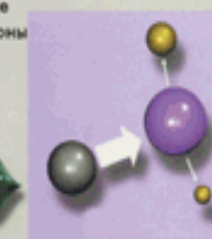
Объекты: протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны

атомы, молекулы

Процессы: деление и синтез атомных ядер

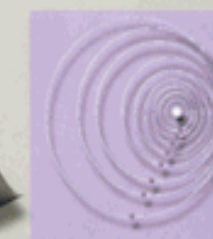
электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны

Промежуточные векторные бозоны  
кванты слабых взаимодействий



кварки, лептоны, промежуточные бозоны

Гравитоны  
кванты гравитации



все частицы

солнечная система, галактики, черные дыры

бета-распад ядер, распад нейтрона и мюона

притяжение тел



# Фундаментальные фермионы

Электрический  
заряд

Частицы  
окружающего  
мира принадлежат  
этой группе

Эти частицы  
существовали в  
первый момент  
после “Большого  
взрыва”.

Теперь их можно  
обнаружить  
в космосе и на  
ускорителях  
частиц

## ЛЕПТОНЫ

-1

0

Электрон

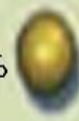
переносит электрический ток

$$M = 0,511 \text{ МэВ}/c^2$$



Электронное нейтрино

играет фундаментальную роли при  
горении Солнца. Каждую секунду сквозь  
нас пролетают миллиарды этих частиц



Мюон

аналог электрона

Время жизни - 2 микросекунды

$$M = 106 \text{ МэВ}/c^2$$



Мюонное нейтрино

образуется при рождении и распаде  
мюонов

$$M < 0,2 \text{ МэВ}/c^2$$



Тау

аналог электрона

Время жизни - доли пикосекунды

$$M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$$



Тау нейтрино

образуется при рождении и распаде  
тау лептонов  
Открыто в 1975 г.

$$M < 20 \text{ МэВ}/c^2$$



Фундаментальные  
фермионы

Электрический  
заряд

Частицы  
окружающего  
мира принадлежат  
этой группе

Эти частицы  
существовали в  
первый момент  
после “Большого  
взрыва”.

Теперь их можно  
обнаружить  
в космосе и на  
ускорителях  
частиц

# КВАРКИ

+2/3

-1/3

u-кварк (up - вверх)

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 3 \text{ МэВ}/c^2$$



d-кварк (down - вниз)

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 6 \text{ МэВ}/c^2$$



c-кварк (charmed - очарованный)

открыт в 1974 г.

$$M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$$



s-кварк (strange - странный)

открыт в 1964 г.

$$M = 100 \text{ МэВ}/c^2$$



t-кварк (top - верхний)

открыт в 1995 г.

$$M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$$



b-кварк (beauty - прелестный  
bottom - нижний)

открыт в 1977 г.

$$M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$$





Кванты  
фундаментальных  
полей

Глюоны  
сильное  
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки и глюоны

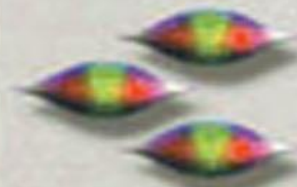
Объекты

протон, нейтрон, атомные  
ядра, мезоны

Процессы

деление и синтез атомных ядер

Фотоны  
электромагнитное  
взаимодействие



все заряженные частицы

атомы, молекулы

электричество, магнетизм,  
распространение света, радиоволны

Кванты  
фундаментальных  
полей

Промежуточные  
векторные бозоны  
слабое  
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки, лептоны  
промежуточные бозоны

Объекты

бета-распад ядер, распад нейтронов  
и мюонов

Гравитоны  
гравитация



все частицы

Солнечная Система,  
галактики, черные дыры

притяжение тел

# Элементарные частицы

Вещество — Бозон Хиггса — Переносчики взаимодействий

Кварки  
Лептоны  
Электроны

Фотоны  $W^+$  - и  $Z^0$ -бозоны Глюоны Гравитоны (?)

Адроны  
Мезоны Барионы  
Нуклоны  
Атомы  
Молекулы

Электромагнетизм Слабое Сильное Гравитация  
Квантовая электродинамика Квантовая хромодинамика Квантовая гравитация (?)  
Электрослабая теория  
Теория Великого объединения (?)  
Теория всего (?)

Составные частицы

Взаимодействия и теории

ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!

