



РОССИЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. А. И. ГЕРЦЕНА

1797

ХИМИЯ

Е. И. Исаева,
В. В. Горбунова

ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ АТОМА И ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

УДК 541.2
ББК 24.1
И85

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
РГПУ им. А. И. Герцена*

**Посвящается 120-летию кафедры неорганической химии и 60-летию
факультета химии РГПУ им. А. И. Герцена**

Рецензенты:

Л. П. Ардашева, кандидат химических наук,
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД;

Е. С. Остроглядов, кандидат химических наук,
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена

И85 **Исаева Е. И.** Электронное строение атома и периодический закон :
учебное пособие / Е. И. Исаева, В. В. Горбунова. — Санкт-Петербург :
Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2023. — 146 с.

ISBN 978-5-8064-3382-5

Учебное пособие предназначено для обучающихся бакалавриата факультета химии РГПУ им. А. И. Герцена по направлениям 04.03.01 — Химия (профиль «Химия»), 44.03.01 — Педагогическое образование (профиль «Химическое образование»). Пособие содержит краткое теоретическое введение к каждой из глав, варианты индивидуальных заданий для самостоятельной работы студентов, а также контрольные вопросы для работы на практических занятиях по разделу электронное строение атомов и периодический закон.

УДК 541.2
ББК 24.1

ISBN 978-5-8064-3382-5

© РГПУ им. А. И. Герцена, 2023
© С. В. Лебединский, обложка, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Предмет и место химии в системе естественнонаучных дисциплин. Формы существования материи и их основные характеристики. Закон сохранения материи	5
Глава 2. Стехиометрические законы. Атомно-молекулярное учение	14
Глава 3. Доквантовые модели строения вещества. Основные характеристики атома. Открытие электрона, определение его массы и размеров.....	20
Глава 4. Свойства электромагнитного излучения и его взаимодействие с веществом. Модель строения атома Бора	27
Глава 5. Волны материи. Уравнение де Бройля. Принцип неопределенности Гейзенберга. Вероятностная модель строения атома водорода. Волновое уравнение Э. Шредингера.....	39
Глава 6. Радиальная и угловая составляющие волновой функции, функция радиального распределения электронной плотности. Квантовые числа и их физический смысл	50
Глава 7. Многоэлектронные атомы — приближенные методы нахождения волновой функции	61
Глава 8. Принципы и правила заполнения электронами атомных орбиталей в многоэлектронном атоме	68
Глава 9. Электронные конфигурации атомов, электронная и электронно-графическая формулы	72
Глава 10. Электронное строение атомов и периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева. Периодический закон, периодическая системы и периодические таблицы.....	74
Глава 11. Классификация химических элементов в зависимости от положения в периодической системе	87
Глава 12. Периодическое изменение атомных характеристик элементов	93
12.1. Периодичность изменения радиусов в периодической системе.....	93
12.2 Периодичность изменения энергии ионизации и энергии сродства к электрону в периодической системе	101

12.3. Относительная электроотрицательность. Характерные степени окисления и координационные числа химических элементов в соединениях	112
12.4. Горизонтальные, вертикальные и диагональные аналогии в периодической системе.....	121
Контрольные вопросы.....	125
Индивидуальные задания	133
Список литературы	144

ГЛАВА 1. Предмет и место химии в системе естественнонаучных дисциплин. Формы существования материи и их основные характеристики. Закон сохранения материи

Химия — наука о веществах, изучающая процессы превращения веществ, которые сопровождаются изменением состава и структуры, а также взаимные переходы между этими процессами и другими формами движения материи.

В общей системе наук химия относится к естественнонаучным дисциплинам, изучающим объекты и процессы материального мира. Главным объектом химии как науки являются вещества и их превращения.

Известны две формы существования *материи* как объективной реальности — *вещество и поле*.

Вещество — материальный объект, имеющий собственную массу покоя.

Масса — мера инертности материи.

В отличие от вещества *поле* — материальная среда, в которой осуществляется взаимодействие частиц. Поле, как форма существования материи, характеризуется и проявляется в виде различных форм энергии.

Энергия (E) — мера движения и взаимодействия всех видов материи, способность материи к совершению работы. Существование в природе разнообразных полей определяет и различные виды энергии (механическая, электрическая, тепловая и др.). Все виды энергии эквивалентны (Дж. Джоуль, 1847 г., эквивалентность механической и тепловой энергии) и могут быть измерены своим механическим эквивалентом — количеством энергии в джоулях (Дж), соответствующим работе силы в один ньютон при перемещении тела в один метр.

Механическая энергия подразделяется на два типа — *потенциальную* и *кинетическую*. Потенциальная энергия связана с гравитационным полем и определяется положением тела или системы тел по отношению к другим телам, а также внутренним строением тела.

Кинетическая энергия — энергия движения, которая определяется движением материальных тел или системы тел по отношению к другим системам.

Исторически в химии наряду с джоулем (Дж) используются и другие единицы измерения энергии. Например, тепловую энергию можно измерять в калориях. Одна калория — это количество энергии, необходимое для нагревания 1 г воды на один градус от 19,5 °С до 20,5 °С (1 кал = 4,184 Дж).

Следует отличать понятия «температура» и «тепловая энергия».

Тепловая энергия — это мера *полной* кинетической энергии молекул вещества.

Температура — мера *средней* кинетической энергии молекул, которая определяется по условной температурной шкале.

Существует несколько температурных шкал, наиболее распространенные из которых абсолютная шкала Кельвина, шкала Цельсия и шкала Фаренгейта (табл. 1).

Таблица 1

Температурные шкалы и взаимосвязь между ними

Шкала (обозначение)	Абсолютный нуль	Замерзание воды	Кипение воды
Шкала Кельвина (Т, К)	0	273,15	373,15
Шкала Цельсия (t, °С)	-273,15	0	100
Шкала Фаренгейта (t, °F)	-459,7	32	212

$$T, K = t, ^\circ C + 273,15 \quad (1)$$

$$t, ^\circ C = 5/9(t, ^\circ F - 32) \quad (2)$$

$$t, ^\circ F = 9/5 t, ^\circ C + 32 \quad (3)$$

Единицей *электрической формы энергии* является электронвольт (эВ). Один электронвольт соответствует кинетической энергии электрона, ускоренного из состояния покоя под действием электрического поля с разностью потенциалов в один вольт (1 эВ = 1,6 · 10⁻¹⁹ Дж).

Также наряду с тепловой и электрической энергией, в химии часто встречается *энергия электромагнитного излучения* — энергия электромагнитного поля, распространяющегося со скоростью света и характеризующегося длиной волны (λ , нм) или частотой ($\nu = c/\lambda$, сек⁻¹ или Гц = сек⁻¹):

$$E = h \cdot c/\lambda = h\nu \quad (4)$$

где: h — постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж/с.

Так как все виды энергии эквивалентны, то для количественной характеристики любых физико-химических процессов Международным Союзом по Теоретической и Прикладной Химии (IUPAC) рекомендовано использовать единую механическую единицу энергии — джоуль, или кратные ей единицы на основе приставок (табл. 2):

Таблица 2

Приставки для обозначения кратных единиц в системе СИ

Приставка	Символ	Кратность	Приставка	Символ	Кратность
Тера	Т	10^{12}	Санتي	с	10^{-2}
Гига	Г	10^9	Милли	м	10^{-3}
Мега	М	10^6	Микро	мк	10^{-6}
Кило	К	10^3	Нано	н	10^{-9}
Гиго	г	10^2	Пико	п	10^{-12}
Деци	д	10^{-1}	Фемто	ф	10^{-15}

Одним из фундаментальных законов естествознания является *закон сохранения материи* — *материя не образуется и не исчезает, а только переходит в различные формы и виды существования.*

Следствия из закона сохранения материи:

1. Закон сохранения массы. Масса реагентов, вступивших в химическую реакцию, соответствует массе веществ, образующихся в результате реакции.

2. Закон сохранения энергии. Энергия не образуется и не исчезает, а только переходит из одного вида в другой.

Взаимосвязь между массой тела и его энергией, показанная А. Эйнштейном, выражается формулой:

$$E = mc^2 \quad (5)$$

где E — энергия; m — масса; c — коэффициент пропорциональности, равный скорости света в вакууме.

Ввиду чрезвычайно большого численного значения c^2 — квадрата скорости света — даже крайне малые изменения массы должны привести к огромным изменениям энергии. При сообщении телу энергии в 1 Дж его масса увеличивается на $1,11 \cdot 10^{-14}$ г (что не обнаруживается современными измерительными приборами).

Масса и энергия — взаимосвязанные свойства материи. Энергия движущегося тела увеличивается при увеличении скорости его движения, и одновременно увеличивается масса движущегося тела. Взаимозависимость массы тела m и его скорости v выражается соотношением:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (6)$$

где c — скорость света в вакууме, а m_0 — масса покоя. Масса покоя численно равна массе тела, когда его скорость v равна нулю. Масса покоящегося тела минимальна, она безгранично возрастает при приближении скорости тела к скорости света; при этом одновременно возрастает и его энергия. При скоростях движения тела, близких к скорости света, зависимость энергии тела E от его скорости и описывается уже не формулой:

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}, \quad (7)$$

а соотношением:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (8)$$

из которого следует, что при скорости, стремящейся к скорости света, энергия тела стремится к бесконечности. Если же масса покоя тела равна нулю, то его

скорость может достигнуть скорости света. Так, фотоны и нейтрино, имеющие нулевые массы покоя, движутся со скоростью света. Скорость света — максимальная скорость передачи в пространстве любых взаимодействий (в том числе и сигналов при передаче информации). Масса всегда связана с энергией и наоборот. Поэтому, строго говоря, закон сохранения массы и закон сохранения энергии являются единым законом неуничтожимости материи и движения.

При протекании химических процессов формируются системы, имеющие более прочные связи между составными частями (элементами) по сравнению со связями элементов системы с окружающей средой или с элементами других систем.

В XVIII веке вследствие накопления и систематизации знаний о материальном мире произошло условное разделение естествознания на отдельные дисциплины: физику, химию, биологию, геологию и другие. В основе такой систематизации знаний о материальном мире лежит **принцип дискретности материи** — любой сложный материальный объект состоит из определенного набора более простых (элементарных) структурных единиц, взаимодействие между которыми, соответствующее различным формам движения материи, и приводит к их объединению.

Химия — естественнонаучная дисциплина, изучающая вещества и процессы их превращения, сопровождающихся изменением состава и структуры. Данное определение науки химии предполагает необходимость идентификации как химических структурных элементов вещества, так и специфического взаимодействия между ними (химической связи), приводящего к их объединению и образованию всего многообразия химических соединений (к настоящему времени химиками получено более восьми миллионов химических соединений, большинство из которых не встречаются в природе).

Структурная организация вещества (схема 1) в качестве элементарных «физических» единиц материи определяет «элементарные» частицы, важнейшими из которых являются — **нуклоны** (протоны (p^+) и нейтроны (n^0))

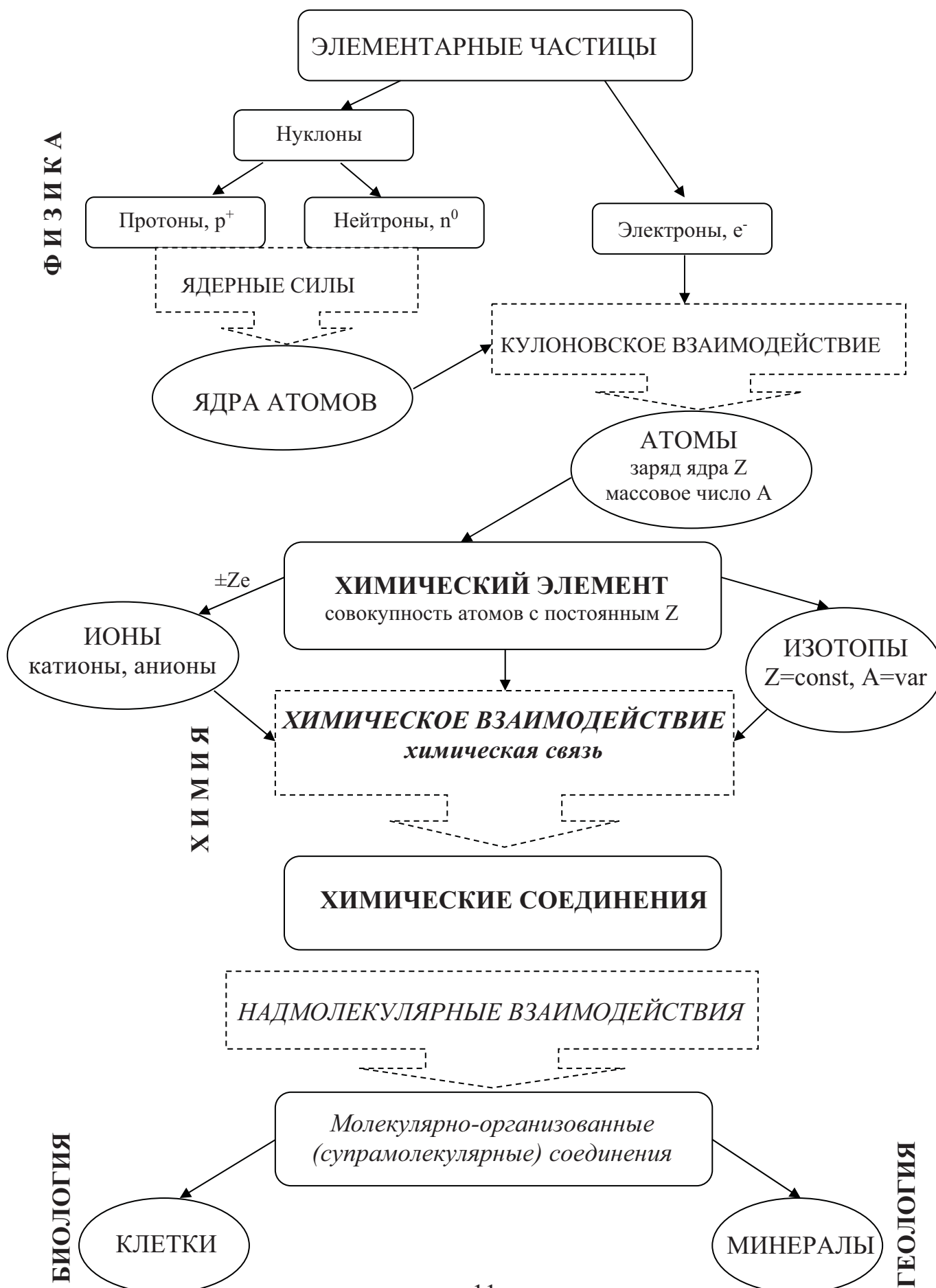
и *электроны* (e^-). Ядерное и последующее электростатическое (кулоновское) «физическое» взаимодействие между этими «физическими» элементами вещества приводит к образованию электронейтральных атомов, основными характеристиками которых являются их *заряд ядра* (Z) и *массовое число* (A). Заряд ядра характеризует количество протонов в ядре атома и равное ему число электронов в атоме. Массовое число определяет общее число нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре атома.

Совокупность *атомов с постоянным зарядом ядра* (равным числу электронов) определяет формирование новых — «химических» структурных элементов вещества — *химических элементов* и их производных (изотопов и ионов химических элементов), взаимодействие между которыми приводит к образованию химических соединений (химическая связь).

Химические элементы обозначаются особым символом, который соответствует начальным буквам латинского названия элементов, и характеризуются своим номером в периодической системе Д. И. Менделеева, определяемым величиной их заряда ядра.

Изотопами химического элемента называется совокупность атомов с постоянным зарядом ядра, но разным массовым числом. Для 109 химических элементов известно более 280 стабильных и 2000 радиоактивных изотопов. Массовое число изотопов химических элементов указывается в верхнем левом индексе символа химического элемента: ^{14}C , ^{12}C , ^{35}Cl , ^{37}Cl и т. д.

Структурная организация вещества и условное деление естественных наук



Для изотопов водорода — ^1H , ^2H , ^3H применяют также специальные названия и соответствующие им символы без указания массового числа: ^1H — протий (H), ^2H — дейтерий (D), ^3H — тритий (T).

Ионы химических элементов — электрoзаряженные частицы атомов химических элементов, образующиеся в результате присоединения (анионы) или удаления (катионы) от них электронов. Для обозначения ионов химических элементов используют их символы с указанием в верхнем правом индексе заряда иона:



Одним из важнейших понятий, определяющих место химии в системе естественно-научных дисциплин, является определение природы химического взаимодействия (химической связи) между химическими структурными элементами вещества, приводящего к образованию всего многообразия химических соединений.

Химическая связь — взаимодействие между химическими структурными элементами вещества, сопровождающееся изменением в их электронном строении и выделением энергии, приводящее к образованию химических соединений.

Химическое соединение — совокупность атомов и ионов химических элементов, объединенных химическим взаимодействием.

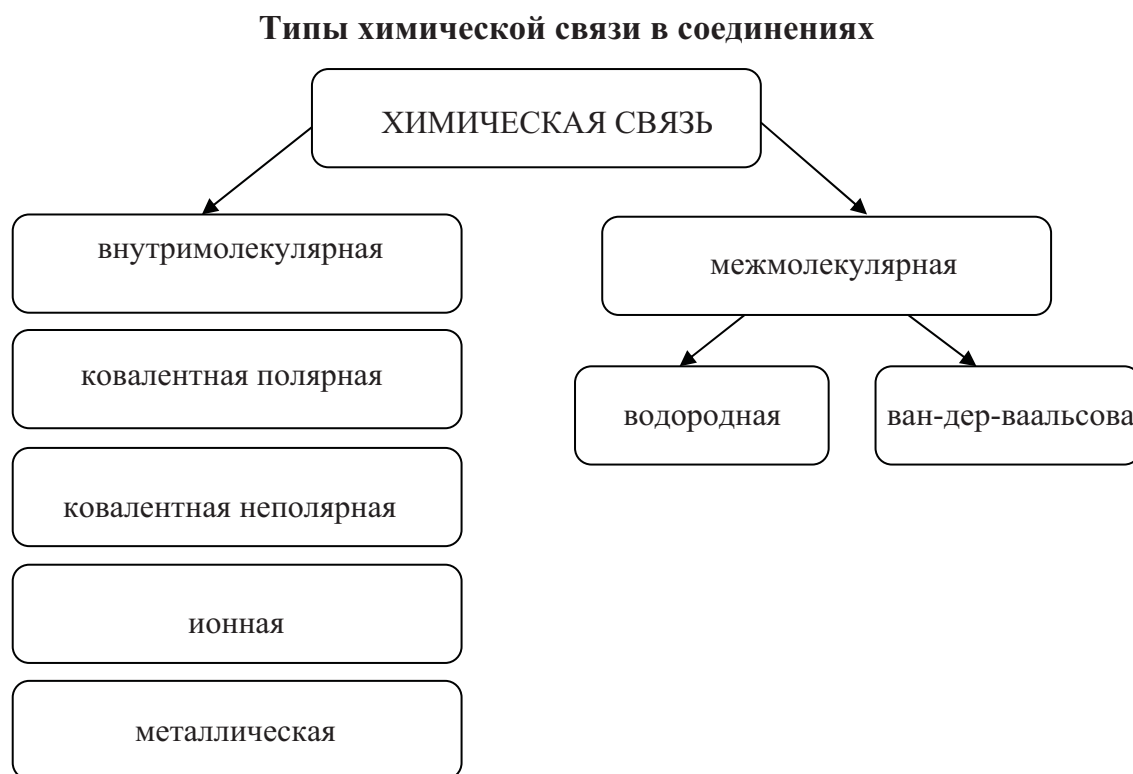
Межмолекулярные взаимодействия обуславливают образование молекулярно-организованных (супрамолекулярных) систем, которые являются структурными единицами биологии и геологии.

В рамках общей схемы, показывающей взаимосвязь естественнонаучных дисциплин, **химия**, базируясь на физических закономерностях о строении атома с одной стороны, и, давая основу для **биологии и геологии** с другой стороны, занимает **центральное место**.

Таким образом, именно электронное строение атомов и ионов химических элементов и характер его изменения при образовании различных химических соединений в результате их взаимодействия является как основным критерием

химических процессов, так и важнейшей задачей теоретической химии. Различный характер изменения электронного строения атомов и ионов химических элементов приводит к химическим соединениям с разным типом химической связи и различного состава (схема 2).

Схема 2



Глава 2. Стехиометрические законы. Атомно-молекулярное учение

Вопрос о структурной организации вещества имеет многовековую историю. Еще древнегреческие философы более 2000 лет назад считали, что окружающий человека мир построен из некоторых основных «начал». Понятие *атом* (неделимый) в качестве элементарной частицы материи был введен Демокритом. Затем в I веке до н. э. атомистические представления были развиты римским философом Лукрецием. Однако в течение последующих 18 веков эти представления не получали своего развития. Возврат к ним произошел в начале XIX века в результате накопления количественных экспериментальных данных о превращениях различных веществ и установления стехиометрических законов.

1. **Закон сохранения материи и движения** (энергии) М. В. Ломоносова, А. Л. Лавуазье (1748 г.).
2. **Закон эквивалентов** И. Б. Рихтера (1793 г.). Элементы химически взаимодействуют между собой в строго определенных количествах, сохраняясь в виде неизменных пропорциональных числах при переходе от одного сложного тела к другому.
3. **Закон постоянства состава** Ж. Л. Пруста (1794 г.). Состав чистого вещества не зависит от способа его получения.
4. **Закон парциальных давлений** Дж. Дальтона (1802 г.). Общее давление смеси газов, не вступающих друг с другом в химическое взаимодействие, равно сумме парциальных давлений составных частей (парциальным давлением газа в газовой смеси называется давление, которое производил бы этот газ, занимающий при тех же условиях объем всей газовой смеси).
5. **Закон кратных отношений** Дж. Дальтона (1804 г.). На одну и ту же массу одного из элементов, образующих между собой несколько соединений, приходится такие массы других элементов, которые относятся между собой как небольшие целые числа.

6. **Закон объемных отношений** Гей-Люссака (1805 г.). Объемы реагирующих газов относятся друг к другу и к объемам газообразных продуктов, как небольшие целые числа.

7. **Закон Авогадро** (1811 г.). В равных объемах различных газов при одинаковой температуре и давлении содержится одинаковое число молекул.

В 1808 году Дж. Дальтон обобщил стехиометрические законы в виде **атомистической теории**, основные положения которой заключаются в следующем:

- каждый элемент (простое вещество, которое не может быть разложено на другие вещества и не может быть превращен в другие простые вещества) состоит из чрезвычайно малых частиц, называемых атомами;
- все атомы одного элемента — одинаковы;
- атомы различных элементов обладают разными свойствами (в том числе имеют разную массу);
- атомы одного элемента не превращаются в атомы другого элемента в результате химических превращений;
- атомы не создаются и не разрушаются в химических реакциях;
- совокупность одинаковых атомов образует простое вещество;
- атомы разных элементов взаимодействуют друг с другом в целочисленных отношениях с образованием «сложных атомов» (так Дж. Дальтон называл молекулы);
- количество атомов разных элементов, взаимодействующих друг с другом относятся между собой как простые целые числа;
- в данном химическом соединении относительные количества атомов разных сортов и сорта этих атомов всегда постоянны.

Одним из важнейших результатов теории Дальтона, сыгравшем неопределимую роль в дальнейшем развитии химии является его **учение о массе атома**, как об индивидуальной количественной характеристике атома. Учитывая, что абсолютные массы атомов чрезвычайно малы, Дальтон предложил определять отношение массы элементов как отношение массы атома