

# Глава 1. Введение в прикладную физику. Иерархическая структура материального мира

## 1.1 Современная физика – основа научного мировоззрения на строение и движение материального мира

Наиболее фундаментальной частью знаний, их ядром является мировоззрение, то есть количественное представление о том, как устроен окружающий нас мир, каковы его структура, устойчивые (долгоживущие, стационарные) состояния и как происходит движение. Под движением в физике понимают изменение состояний во времени – эволюцию. Знание структуры и законов движения природы и общества и есть мировоззрение. Иметь научное мировоззрение чрезвычайно важно для человека. Во-первых, наиболее общие законы едины для природы и общества. Во-вторых, они объективны и в значительной мере не зависят от воли людей.

Почему мы считаем, что из всех разделов современной науки о природе – естествознания именно физика является основой научного мировоззрения на структуру, устойчивость и движение (эволюцию) материального мира? Так сложилось исторически разделение предметов исследования различных наук. Окружающий нас материальный мир имеет **иерархическую** структуру подобно вооруженным силам всех стран: из простых объектов складываются более сложные, из них – еще более сложные и т.д.

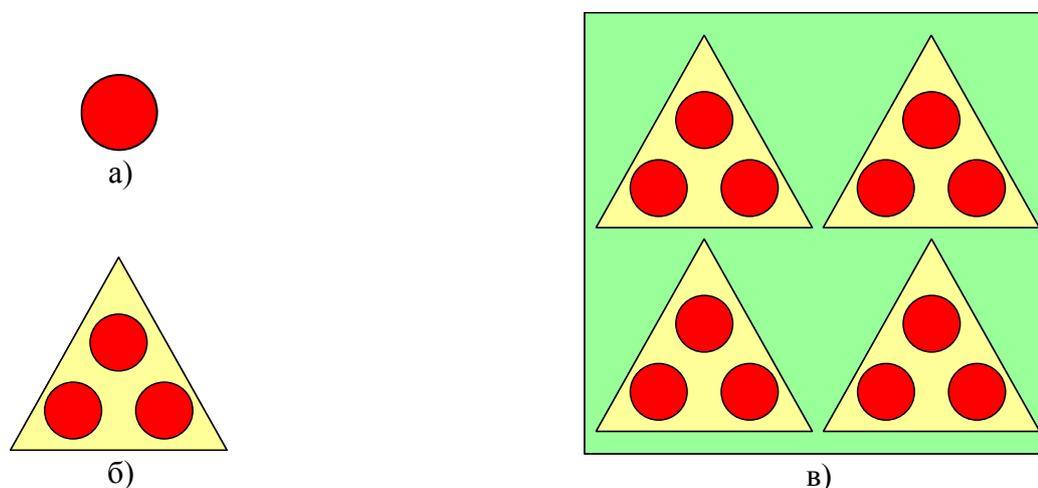


Рис. 1 Пример иерархической структуры: а) базовый элемент; б) из базовых элементов строятся более сложные объекты; в) более сложные объекты образуют еще более сложный объект

У каждого раздела естествознания имеется наименьший, базовый элемент. Из этих элементов строятся более сложные объекты.

Ниже в таблице 1.1 названы основные разделы естествознания и их базовые элементы.

Таблица 1.1

**Основные разделы естествознания и их базовые элементы**

Раздел естествознания	Базовый элемент
1 Медицина	Клетка
2 Зоология	Клетка

Раздел естествознания	Базовый элемент
3 Ботаника	Клетка
4 Молекулярная биология	Большие биологические молекулы, включая ДНК и РНК
5 Химия	Молекулы, включая одноатомные
6 Физика	Атомы, ядра, элементарные частицы, фундаментальные частицы вещества и квантованных полей

Таково разделение труда внутри естествознания. Двигаясь вглубь строения материи, медицина, зоология и ботаника доходят до клетки; молекулярная биология – до крупных биологических молекул, включая ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) и РНК (рибонуклеиновая кислота), которые являются носителями наследственной генетической информации; химия – до молекул и атомов, из которых состоят молекулы. А дальше физика остается в одиночестве, изучая структуру атомов, ядер, элементарных и, наконец, фундаментальных частиц вещества, которые сегодня считаются простейшими и неделимыми, а также частиц квантованных полей, которые обеспечивают взаимодействие между частицами вещества.

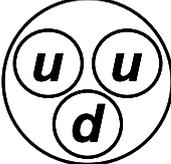
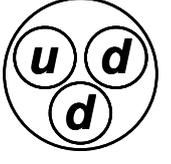
## 1.2 Иерархическая структура материального мира

Несомненным достижением современной физики являются ясные представления о иерархической структуре **устойчивого** вещества от простейших фундаментальных частиц до Вселенной. Устойчивое вещество построено всего из трех фундаментальных частиц: двух кварков –  $u$ ,  $d$  и электрона  $e$ .

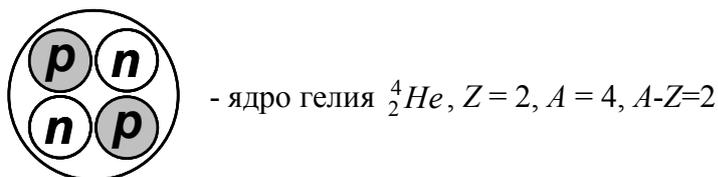
Первая ступень иерархической структуры вещества – фундаментальные частицы:

			
Название	$u$ -кварк	$d$ -кварк	электрон
Электрический заряд в единицах $ e $	$+2/3$	$-1/3$	$-1$

Вторая ступень иерархической структуры вещества – частицы, состоящие из кварков, в частности, нуклоны:

		
Название	$p = u u d$ – протон	$n = u d d$ – нейтрон
Электрический заряд в единицах $ e $	$+1$	$0$

Третья ступень иерархической структуры вещества – ядра, состоят из нуклонов – нейтронов и протонов. Примеры. Ядра: гелия  ${}^4_2\text{He}$ , углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ , урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Верхний индекс  $A$  – число нуклонов, нижний индекс  $Z$  – число протонов,  $(A - Z)$  – число нейтронов.

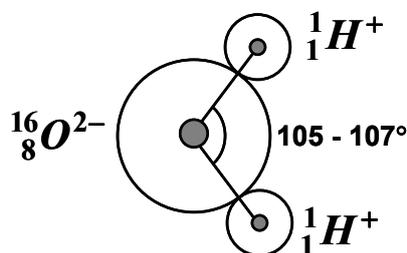


Четвертая ступень иерархической структуры вещества – атомы. Состоят из ядер и электронов.



Верхний правый индекс дает суммарный заряд атома  $Q_a$ . Разность  $(Z - Q_a)$  – число электронов в атоме (ионе). Например,  ${}^4_2\text{He}^{1+}$  содержит  $2 - 1 = 1$  электрон, это однозарядный ион гелия. Ион кислорода  ${}^{16}_8\text{O}^{2-}$  содержит  $8 - (-2) = 10$  электронов.

Пятая ступень иерархической структуры вещества – молекулы. Состоят из атомов. Пример: молекула воды  $\text{H}_2\text{O}$



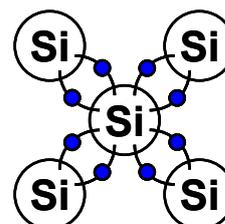
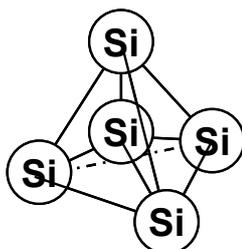
Шестая ступень иерархической структуры вещества – газы. Состоят из молекул, в том числе одноатомных. Пример: земная атмосфера, которой мы дышим (рис. 2). Состоит из молекул  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и других.



Рис. 2 Земная атмосфера

**Седьмая ступень иерархической структуры – конденсированные вещества.** К ним относятся жидкости и твердые тела, которые являются плотными упаковками молекул. Например, вода – плотная упаковка молекул  $H_2O$ . Медь – плотная упаковка одноатомных молекул или просто атомов  $Cu$ . **Конденсированные вещества бывают двух главных типов – упорядоченные и неупорядоченные.** Упорядоченные вещества называют кристаллами. Бывают жидкие и твердые кристаллы. В кристаллах ядра атомов и молекул расположены в строгом геометрическом порядке, который распространяется по всему объему. В неупорядоченных веществах такого дальнего порядка в расположении ядер атомов нет. **Например, из молекул  $SiO_2$  – двуокиси кремния состоит кристалл кварца (упорядоченное вещество) и кварцевое стекло (неупорядоченное вещество).** Вода – неупорядоченное жидкое вещество. Но есть жидкие кристаллы. Некоторые из них широко используют в жидкокристаллических экранах: мониторах компьютеров, телевизоров и т.д.

В качестве примера рассмотрим структуру кристалла кремния  $Si$ , который является абсолютным рекордсменом среди материалов по масштабам применения в микроэлектронике. Элементарная ячейка кристалла  $Si$  представляет собой тетраэдр, все четыре грани которого – правильные треугольники. В вершинах тетраэдра и в его центре расположено по одному атому  $Si$ . Таким образом центральный атом имеет четыре ближайших соседа, с которыми устанавливает ковалентную химическую связь путем обмена электронами.



**Восьмая ступень иерархической структуры вещества – объекты астрофизики.** К ним относятся метеориты, астероиды, планеты, звезды, галактики, скопления галактик и другие (рис. 3).



Рис. 3 Объекты астрофизики

Таковы восемь основных ступеней иерархической структуры вещества. Они кратко перечисляются еще раз в итоговой таблице 1.2.

Таблица 1.2

**Иерархическая структура устойчивого вещества**

Ступень (уровень) иерархии	Название объектов	Примеры
1	Фундаментальные частицы: кварки $u$ , $d$ и электрон $e$	$u$ -кварк, $d$ -кварк, электрон
2	Элементарные частицы, состоящие из кварков – нуклоны	протон $p = u u d$ , нейтрон $n = u d d$
3	Ядра атомов: $A$ – число нуклонов, $Z$ – протонов, $(A - Z)$ - нейтронов	${}^{12}_6\text{C}$ , ${}^{238}_{92}\text{U}$
4	Атомы (ионы): ядро плюс электроны	${}^4_2\text{He}^0$ , ${}^4_2\text{He}^{1+}$ , ${}^{16}_8\text{O}^{2-}$
5	Молекулы: состоят из атомов	$\text{N}_2$ , $\text{O}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$
6	Газ молекул	Атмосфера
7	Конденсированные вещества – жидкости и твердые тела	Вода, жидкие кристаллы, металлы, полупроводники
8	Объекты астрофизики	Планеты, звезды, галактики

**1.3 Открытие структуры вещества**

Идея о том, что окружающий нас материальный мир имеет мелкозернистую структуру и состоит из невидимых глазом устойчивых малых частичек, возникла очень давно, в глубокой древности, возможно в Китае, Индии или другой человеческой цивилизации. Первое описание этой идеи, дошедшее до нас, дал древнеримский поэт Лукреций Кар в своей знаменитой поэме

«О природе вещей». Авторами гипотезы об атомном строении вещества являются древнегреческие философы Левкипп и Демокрит. Именно Демокрит ввел термин  $\alpha\tau\omicron\mu\alpha$  (атом), что в переводе с древнегреческого означает «неделимый». Сущность идеи в том, что число различных атомов невелико, а их всевозможные сочетания обеспечивают гигантское разнообразие мира, в котором мы живем.

Следует отметить относительность понятия «неделимый». Рассмотрим понятие энергии связи ( $E_{св}$ ) сложной структуры, состоящей из более простых, базисных элементов. Для ядер это нуклоны – протоны и нейтроны. Энергия связи ( $E_{св}$ ) ядра равна минимальной работе, которую надо совершить, чтобы разделить его на базисные единицы – нуклоны. Понятие энергии связи переносится на все сложные структуры, которые всегда подвергаются внешним воздействиям – ударам. Если энергия удара больше энергии связи на один базисный элемент:  $E_{удара} > E_{св}/N$ , где  $N$  – число базисных элементов, то сложная система будет разделена, от нее отделиться один базисный элемент, например, из ядра выбит один нуклон, и т.д. Если  $E_{удара} < E_{св}/N$ , то вся сложная система является устойчивой, неделимой. На рис. 4 приведена диаграмма неделимости, устойчивости различных объектов в зависимости от энергии удара.

При энергиях удара меньше  $10^{24}$  эВ неделимыми (бесструктурными, устойчивыми) являются фундаментальные фермионы и антифермионы – кварки и лептоны, антикварки и антилептоны. Достижение энергии удара больше  $10^{24}$  эВ в прямых экспериментах – нереальная, фантастическая задача для ускорительной техники в земных условиях. Но если бы удалось хотя бы косвенно исследовать кварки и лептоны при энергиях больше  $10^{24}$  эВ, то возможно они оказались бы состоящими из субкварков, или партонов (от английского слова *part* – часть целого).

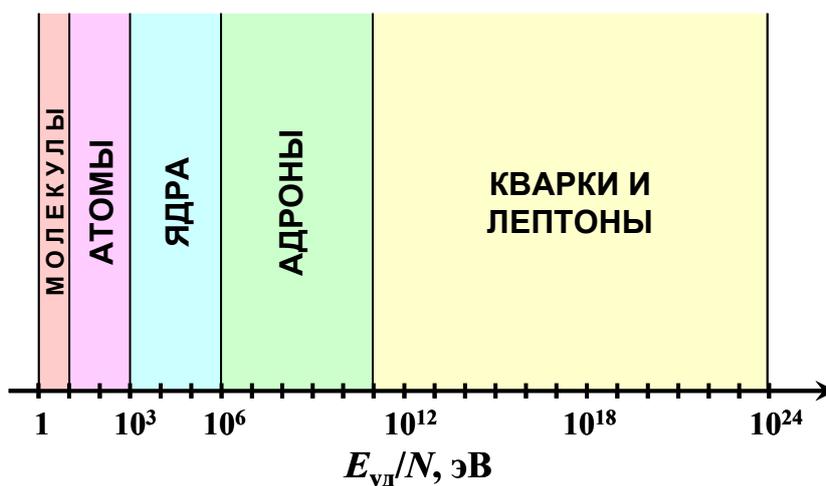


Рис. 4 Неделимость различных объектов иерархической структуры материи в зависимости от удельной энергии удара ( $E_{уд}/N$ ), представленной в логарифмическом масштабе

Интервал  $10^{11} \dots 10^{24}$  эВ энергий удара называют большой пустыней. При энергии удара меньше  $10^{11}$  эВ неделимыми оказываются адроны, состоящие из кварков.

При энергиях удара меньше удельной энергии связи ядра на нуклон  $E_{св}/A \approx 10^6$  эВ устойчивыми и неделимыми оказываются ядра атомов. Здесь  $N = A$  (числу нуклонов).

При энергии удара меньше энергии связи электрона в атоме ( $10 \dots 10^5$  эВ) неделимыми становятся атомы.

Наконец, при энергии удара меньше энергии связи атомов в молекуле ( $1 \dots 10$  эВ) неделимыми становятся молекулы.

При исследовании структуры вещества ученые «шли в обратном направлении» по мере прогресса в исследовательском оборудовании. Так существование атомов в принципе следовало из законов, описывающих идеальный газ, открытых в 18-19 вв. Однако непосредственное доказательство реального существования атомов было получено в начале 20 века в теоретических работах А. Эйнштейна и экспериментальных работах Ж. Перрена по исследованию броуновского движения. Эксперименты же по прямому наблюдению атомов были выполнены во второй половине 20 века. Сегодня в распоряжении ученых имеются приборы, например, туннельный электронный микроскоп, которые позволяют наблюдать атомы с разрешением  $0,1 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ) и видеть не только отдельные атомы, диаметры которых  $1 \dots 6 \text{ \AA}$ , но и их внутреннюю оболочечную структуру.

Составные части атома – электрон и ядро были открыты в опытах Дж. Томсона и Э. Резерфорда в начале 20 века. Томсон использовал катодную трубку – прообраз современной электронной пушки, где электроны разгонялись электрическим полем до энергии порядка  $10^0 - 10^4$  эВ. Структура атома и атомное ядро были открыты в опытах Резерфорда, где использовались пучки альфа-частиц (ядер гелия  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ) с энергией порядка 5 МэВ, испускаемые радиоактивным изотопом радия.

Различные субатомные частицы открывались в течении всего 20 века и этот процесс продолжается по сей день. Одним из источников налетающих частиц большой энергии являются космические лучи – элементарные частицы и ядра атомов различного происхождения, движущиеся с высокими энергиями в космическом пространстве. Другим источником являются эксперименты с ускорителями частиц, возможности которых росли все время использования. На данный момент самое большое значение энергии удара достигнуто в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере и оно составляет  $6,5 \text{ ТэВ} = 6,5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ .