

В. П. Дельцов, В. В. Дельцов

ФИЗИКА

Дойти до самой СУТИ!

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА

для углубленного
изучения физики
в средней школе

Абитуриентам

Участникам
олимпиад

Учителям физики

Всем, кто хочет
понять физику
и научиться решать
стандартные
и нестандартные
задачи!

АТОМНАЯ
И ЯДЕРНАЯ
ФИЗИКА



URSS

В. П. Дельцов, В. В. Дельцов

ФИЗИКА

ДОЙТИ ДО САМОЙ СУТИ!

Настольная книга
для углубленного изучения
физики в средней школе

Атомная и ядерная физика



URSS

МОСКВА

Дельцов Виктор Павлович, Дельцов Василий Викторович

Физика: дойти до самой сути! Настольная книга для углубленного изучения физики в средней школе. Атомная и ядерная физика: Учебное пособие.

М.: ЛЕНАНД, 2017. — 176 с.

Настоящее издание представляет собой шестую часть уникального учебного пособия по основам современной физики для средней школы, посвященную основам атомной и ядерной физики. Оно предназначено для школьников, углубленно изучающих физику, а также для абитуриентов. Пособие может использоваться в качестве настольной книги для учителей физики, ибо в нем есть все — от определений физических величин и формулировок законов до математических выводов достаточно сложных вопросов; от несложных примеров до олимпиадных задач, многие из которых решены.

Настоящая книга — плод 40-летнего преподавания физики в классах основного и физико-математического профилей. Многие в существовавших ранее и нынешних учебниках авторов не устраивает, поэтому они пытаются растолковать трудные и спорные моменты сами, исключить двойные и тройные толкования одного и того же. Теоретический материал изложен на глубоком научном уровне с единым подходом к формулировкам, конкретно и четко, что существенно сокращает расстояние от теории до практики (решения задач) и избавляет учащихся от необходимости впоследствии перечувствовать в вузах.

По ходу изложения теоретического материала постоянно разбирается большое количество задач, это помогает еще глубже понять теорию. А это необходимо, чтобы еще успешнее решать другие стандартные и нестандартные задачи — и не только по физике, ибо развитый мозг из одной области знаний может легко переключаться на решение задач в других областях.

Цель авторов — помочь учащимся усвоить правильно физические понятия и законы, иллюстрируя их проявление на примерах, и научиться переводить нестандартные задачи в стандартный вид и решать их уже как простые задачи.

Представленный курс уникален по глубине, полноте и систематичности изложения теоретического и практического материала. Книга написана практикующим учителем физики, подготовившим десятки призеров Всероссийской олимпиады, в соавторстве с его сыном, магистром МФТИ, который, будучи школьником, три года подряд становился призером и победителем заключительного этапа Всероссийской олимпиады по физике. Весь материал в пособии преподнесен так, чтобы раскрыть физическую сущность происходящих явлений и чтобы от теории до практики решения задач был всего один шаг.

Рецензенты: проф. кафедры физики ЧГУ, д-р физ.-мат. наук *В. С. Аbruков*;
доц. ЧГПУ, канд. физ.-мат. наук *Н. С. Алексеева* -

ООО «ЛЕНАНД». 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.
Формат 60×90/16. Печ. л. 11. Зак. № 4092.




Отпечатано в ООО «Печатное дело». 142300, МО, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1.


ISBN 978-5-9710-3787-3

© ЛЕНАНД, 2017




Оглавление

Используемые обозначения физических величин	5
Глава 1. Элементы теории относительности	6
§ 1. Постулаты теории относительности	6
§ 2. Классический и релятивистский закон сложения скоростей	7
§ 3. Пространство и время в специальной теории относительности	9
§ 4. Преобразования Лоренца	13
§ 5. Эффект Доплера	18
§ 6. Импульс и масса в релятивистской динамике	23
§ 7. Релятивистское уравнение движения	26
§ 8. Энергия системы частиц	27
 Упражнения	30
Глава 2. Фотоэффект. Кванты	33
§ 9. Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект)	33
§ 10. Теория фотоэффекта	36
§ 11. Фотоны	41
§ 12. Люминесценция. Правило Стокса	42
§ 13. Эффект Комптона	45
§ 14. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де Бройля. Соотношение неопределённостей	48
§ 15. Световое давление	52
§ 16. Химическое действие света	56
§ 17. Применение фотоэффекта	58
 Упражнения	60
Глава 3. Физика атома	64
§ 18. Начало развития теории строения атома	64
§ 19. Открытие радиоактивности. Опыты Резерфорда	66
§ 20. Теория Бора	70
§ 21. Атомные и молекулярные спектры	77
§ 22. Лазер	83
 Упражнения	88
Глава 4. Атомное ядро	91
§ 23. Радиоактивные превращения	91
§ 24. Открытие протона и нейтрона. Состав ядра	94
§ 25. Закон радиоактивного распада	99
§ 26. Стабильные и нестабильные ядра	104
§ 27. Энергия связи ядра	104
§ 28. Природа альфа-, бета- и гамма-распада	111

§ 29. Радиоактивные изотопы в природе.....	115
§ 30. Свойства ионизирующих излучений.....	118
§ 31. Методы регистрации ионизирующих излучений.....	120
§ 32. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции.....	128
§ 33. Энергетический выход ядерных реакций.....	130
§ 34. Цепные ядерные реакции.....	131
§ 35. Ядерный реактор.....	135
§ 36. Термоядерные реакции.....	137
§ 37. Атомная энергетика.....	139
§ 38. Проблемы и перспективы энергетики.....	143
§ 39. Угроза ядерной войны.....	147
§ 40. Мероприятия по ситуации «Атомная тревога».....	149
 Упражнения.....	155

Глава 5. Элементарные частицы..... 160

§ 41. История вопроса.....	160
§ 42. Взаимные превращения частиц.....	162
§ 43. Фундаментальные взаимодействия.....	164
§ 44. Лептоны.....	165
§ 45. Адроны.....	166
§ 46. Кварки.....	168
§ 47. Глюоны.....	171
 Упражнения.....	172

Приложение. Основные формулы..... 173

1. Элементы теории относительности.....	173
2. Фотоэффект. Кванты.....	174
3. Физика атома.....	174
4. Атомное ядро.....	175

Источники иллюстраций.....	176
-----------------------------------	------------

Используемые обозначения физических величин

Физическая величина	Условное обозначение	Единица измерения
Координаты	x, y, z	м
Длина	l, L	м
Время	t	с
Интервал времени	τ	с
Скорость	\bar{v}	м/с
Скорость света	\bar{c}	м/с
Релятивистский фактор Лоренца	γ	безразмерная
Частота	ν	с^{-1} , Гц
Длина волны	λ	м
Комптоновская длина волны	Λ	м
Длина волны де Бройля	λ_B	м
Угол	$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varphi, \theta$	$^\circ$ (градус), рад (радиан), безразмерная
Масса	m, M	кг
Энергия	W	Дж
Энергия кинетическая	E_k	Дж
Энергия внутренняя	U	Дж
Импульс	\vec{p}	кг·м/с
Сила	\vec{F}	Н
Постоянная Планка	h, \hbar	Дж·с
Работа выхода	A_v	Дж, эВ
Световое давление	p	Па
Объемная плотность энергии волны	w	Дж/м ³
Коэффициент отражения волны	R	безразмерная
Плотность потока излучения	j^*	Дж/(с·м ²), Вт/м ²
Постоянная Ридберга	R	Гц
Массовое число атома	A	безразмерная
Количество атомов в теле	N	безразмерная
Активность радиоактивного источника	A	Бк, с^{-1}
Постоянная распада	λ	с^{-1}
Дефект масс	Δm	кг, а.е.м.
Энергия связи ядра	$E_{св}$	Дж, МэВ
Удельная энергия связи ядра	$E_{св,уд}$	Дж/нуклон, МэВ/нуклон
Энергетический выход ядерной реакции	Q	Дж, МэВ
Коэффициент размножения нейтронов в цепной реакции деления ядер	k	безразмерная
Поглощенная доза ионизирующего излучения	D	Гр, Дж/кг
Мощность дозы излучения	\dot{D}	Гр/с, Вт/кг
Эквивалентная доза поглощенного излучения	H	Зв
Экспозиционная доза излучения	X	Р (рентген)

Глава 1. Элементы теории относительности

Моисей сказал: «Всё от Бога».

Соломон сказал: «Всё от ума».

Иисус сказал: «Всё от сердца».

Маркс сказал: «Всё от живота».

Фрейд сказал: «Всё от секса».

Эйнштейн сказал: «Всё относительно».

Ленин сказал: «Учиться, учиться и учиться».

Из анекдота про 7 евреев, наиболее
сильно повлиявших на землян

§ 1. Постулаты теории относительности

В 1905 г. Альберт Эйнштейн опубликовал три работы. В одной из них он дал объяснение броуновского движения на основе молекулярно-кинетической теории. В другой объяснил фотоэффект на основе закона сохранения энергии, введя представление о дискретном поглощении света (фотонная теория света). В третьей статье «К электродинамике движущихся тел» разработал основы специальной теории относительности. Он изложил новые законы движения, которые обобщили Ньютоновские и переходили в них при малых скоростях тел ($v \ll c$). Термин «теория относительности» ввёл в науку М. Планк в 1906 г.

Первая работа способствовала утверждению молекулярно-кинетической теории. В XIX веке учение о молекулярном строении вещества тяжело пробивалось в сознание учёного мира. Вторая работа привела к появлению квантовой физики. Она позволила по-новому взглянуть на свет (электромагнитное излучение), как на поток частиц. Эйнштейн получил Нобелевскую премию за теоретическое открытие фотонов к моменту их экспериментального обнаружения. Наиболее сильно повлияла на мировоззрение человечества специальная теория относительности, а позже и общая теория относительности.

В основе специальной теории относительности (СТО) лежат два постулата: принцип относительности и утверждение о максимально возможной скорости передачи сигнала в любой инерциальной системе отсчёта (ИСО).

Эйнштейн обобщил *принцип относительности Галилея*, утверждавший, что *любой механический опыт протекает одинаково в любой ИСО при одинаковых начальных условиях*, на все явления природы, в том числе электромагнитные.

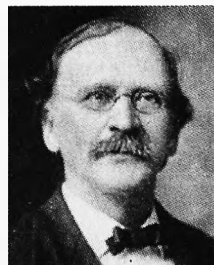
|| Любые физические процессы протекают одинаково в любой ИСО при одинаковых начальных условиях.

Принцип относительности утверждает равноправность всех ИСО. Главным экспериментальным обоснованием принципа относительности в области оптики можно считать результаты опытов Майкельсона и Морли по обнаружению всепроникающей среды – эфира, в котором распространяется свет. Проведя много разных вариантов опыта с интерферометром, Майкельсон и Морли не смогли обнаружить эфира и сделали вывод, что эфир не существует.

Если бы эфир был найден, то связанная с ним ИСО обладала бы преимуществом по сравнению с другими ИСО, которые двигались бы относительно эфира, и это движение можно было бы обнаружить. А поскольку эфира нет, то все ИСО равноправны.



Альберт Абрахам
Майкельсон
(1852–1931)



Эдвард Уильямс
Морли (1838–1923)

Постулат абсолютности скорости утверждает, что скорость света в вакууме является предельной для движения любых материальных объектов относительно любой инерциальной системы отсчёта.

Причём невещественные (безмассовые) тела, например фотоны, рождаются, летят в любой ИСО со скоростью $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с, а любое вещественное тело ни при каких условиях не может достичь скорости, равной c .

Экспериментальным подтверждением этого является, например, тот факт, что в ускорителях элементарных частиц ни при какой энергии, сообщенной разгоняемым электронам или протонам, не удается достичь скорости c , хотя чем больше совершается работа по разгону частицы, тем больше её скорость приближается к c , но достигнуть c не удается.

§ 2. Классический и релятивистский закон сложения скоростей

В классической механике скорость тела \vec{v} в системе отсчёта K , условно принятой за неподвижную, равна сумме скорости \vec{v}_1 подвижной системы отсчёта K' и скорости \vec{v}_2 тела относительно подвижной системы отсчёта K' (рис. 1):

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2. \quad (1)$$

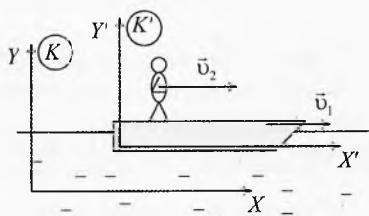


Рис. 1. Сложение скоростей

Релятивистский закон преобразования скоростей (от лат. *relativus* – относительный), то есть закон преобразования скоростей в СТО, имеет вид:

$$\vec{v} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2}{1 + \frac{(\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2)}{c^2}}. \quad (2)$$

Эта формула справедлива, только если \vec{v}_1 и \vec{v}_2 направлены по одной оси. В случае произвольных направлений \vec{v}_1 и \vec{v}_2 формула для \vec{v} выглядит несколько сложнее.

Если \vec{v}_1 и \vec{v}_2 сонаправлены, то

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}.$$

А если направлены противоположно, то

$$v = \frac{|v_1 - v_2|}{1 - \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}.$$

При $v_1, v_2 \ll c^2$ релятивистское выражение (2) переходит в классическое (1). То есть при малых по сравнению со скоростью света \vec{v}_1 и \vec{v}_2 можно пользоваться классическим законом сложения скоростей.

Из (2) видно, что при любых возможных значениях скоростей вещественных тел ($v_1 < c$ и $v_2 < c$) скорость v обязательно окажется меньше скорости c .

✎ **Пример 1.** Пусть система отсчёта K' движется относительно ИСО K со скоростью $v_1 = 0,8c$, а некоторое тело движется относительно системы отсчёта K' в том же направлении со скоростью $v_2 = 0,9c$. Найти скорость тела в ИСО K .

→ **Решение.**
$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}} = \frac{0,8c + 0,9c}{1 + \frac{0,8c \cdot 0,9c}{c^2}} = \frac{1,7c}{1 + 0,72} = 0,988c.$$

✓ **Ответ.** Скорость тела в ИСО K равна $v = 0,988 \cdot c$.

✎ **Пример 2.** Два тела движутся в инерциальной системе отсчёта K навстречу друг другу по одной прямой со скоростями $v_1 = 0,6 \cdot c$, $v_2 = 0,7 \cdot c$. Найти скорость сближения тел в системе отсчёта K . С какой скоростью движется первое тело относительно второго?

→ **Решение.** Скорость взаимного сближения тел в системе отсчёта K равна сумме скоростей:

$$v_{\text{сближения}} = v_1 + v_2 = 0,6 \cdot c + 0,7 \cdot c = 1,3 \cdot c.$$

Этот результат не является нарушением второго постулата. Такая скорость не есть скорость какого-либо из этих тел. Подобное сложение скоростей не определяет скорость тела относительно какой-либо системы отсчёта и не имеет отношения к закону преобразования скоростей.

Если же нас интересует, с какой скоростью движется первое тело в системе отсчёта, связанной со вторым телом, то надо воспользоваться релятивистским законом сложения скоростей:

$$v_{\text{отн12}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}, \quad v_{\text{отн12}} = \frac{0,6c + 0,7c}{1 + \frac{0,6c \cdot 0,7c}{c^2}} = \frac{1,3c}{1 + 0,42} = 0,915 \cdot c.$$

✓ **Ответ.** Наблюдатель на втором теле обнаружит, что первое тело приближается к нему со скоростью $0,915 \cdot c$. Аналогично наблюдатель на первом теле обнаружит, что второе тело приближается к нему с такой же скоростью $0,915 \cdot c$. А наблюдатель в системе отсчёта K увидит, что тела сближаются со скоростью $1,3 \cdot c$.

≠ **Пример 3.** Фотоприёмник в вакууме движется со скоростью v навстречу кванту света. Какова скорость кванта света относительно фотоприёмника?

→ **Решение.** Согласно релятивистскому закону сложения скоростей, скорость кванта света относительно фотоприёмника:

$$v_{\text{отн}} = \frac{v + c}{1 + \frac{v \cdot c}{c^2}} = \frac{v + c}{1 + \frac{v}{c}} = c \cdot \frac{v + c}{c + v} = c.$$

✓ **Ответ.** Скорость кванта света относительно фотоприёмника равна c . Таким образом, скорость кванта света равна c не только в исходной системе отсчёта, но и в движущейся системе отсчёта. То есть скорость света в вакууме в любой инерциальной системе отсчёта одинакова (инвариантна) и равна c .

§ 3. Пространство и время в специальной теории относительности

Координатное и собственное время. Система отсчёта, в которой вещественная частица покоится, называется *собственной системой отсчёта* K_0 частицы. *Собственное время* в этой системе обозначим t_0 . Промежуток времени между двумя событиями, происходящими с частицей, в собственной системе отсчёта K_0 равен:

$$\tau_0 = t_{02} - t_{01}.$$

Время, измеренное в системе отсчёта K , относительно которой частица движется, назовем *координатным временем*. Промежуток времени между теми же двумя событиями в системе отсчёта K :

$$\tau = t_2 - t_1.$$

Примерами событий, связанных с частицей, могут быть излучение или поглощение ею других частиц, соударение с ними и т.п.

В собственной системе отсчёта K_0 события с частицей происходят в одной пространственной точке. Длительность промежутка времени τ_0 между событиями измеряется часами в собственной системе отсчёта, покоящимися в ней. Собственное время частицы абсолютно (инвариантно):

$$\tau_0 = \text{inv.}$$

Это значит, что согласно принципу относительности, протекание процессов не зависит от выбора инерциальной системы отсчёта, относительно которой частица движется. Образно говоря, «возраст» частицы (определяемый её собственным временем) абсолютен, то есть является инвариантной величиной, независимой от выбора инерциальной системы отсчёта. За счёт изменения выбора системы отсчёта частица не может ни «состариться», ни «помолодеть».

Относительность одновременности событий и их длительности. В классической Ньютоновской механике время абсолютно и течёт равномерно. Это значит, что события, одновременные в одной системе отсчёта, будут одновременными и в любой другой системе отсчёта.

|| *В специальной теории относительности события, одновременные в одной ИСО, могут быть неодновременными в другой ИСО.*

Это обусловлено вторым постулатом СТО.

Для того чтобы сравнивать длительность промежутков времени в разных ИСО и даже в разных точках одной ИСО, нужно иметь систему синхронизированных часов.

Представим себе длинный корабль, на корме и носу которого есть часы (метки a и b на рис. 2а). Нужно синхронизировать их ход, то есть установить на них одинаковое время и одновременно запустить их. Тогда с точки зрения системы отсчёта K_0 , связанной с кораблем, они будут идти синхронно. Для синхронизации часов поместим посередине между ними источник света. И в нужный момент включим его. Свет к обоим часам будет двигаться с одинаковой скоростью c , свет одновременно достигнет часов, сработают фотоэлементы, часы включатся одновременно и пойдут синхронно.

А как будет выглядеть эта синхронизация часов с точки зрения наблюдателя часов в движущейся системе отсчёта K ?

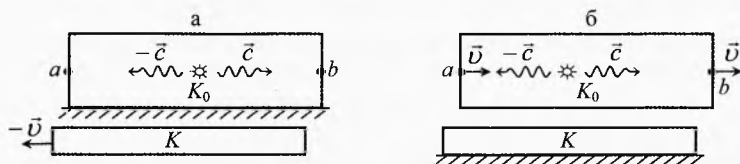


Рис. 2. Относительность одновременности событий

Относительно системы K метки a и b движутся со скоростью \vec{v} . Причём одному кванту света нужно догонять метку b , а к другому кванту света метка a уже движется навстречу (на рис. 2б). Так как скорости обоих квантов света одинаковы и равны c в обеих системах отсчёта, то встреча левого кванта с меткой a произойдет раньше встречи правого кванта света с меткой b . То есть те же самые события (встреча двух квантов света с метками a и b) будут неодновременными в системе отсчёта K .

Таким образом, события, произошедшие одновременно в одной системе отсчёта, в другой системе отсчёта могут произойти в разное время.

Согласно принципу относительности, в любой инерциальной системе отсчёта время течёт точно так же, как и в любой другой инерциальной системе отсчёта. Однако не существует абсолютного времени единого для всех инерциальных систем отсчёта.

Связь между собственным и координатным временем. В СТО доказывается, что длительность промежутка времени между одними и теми же событиями в разных ИСО различна.

Связь между собственным промежутком времени частицы τ_0 и её координатным τ определяется соотношением:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \tau \geq \tau_0.$$

Длительность промежутка времени τ_0 между двумя событиями, происходящими с частицей в собственной системе отсчёта, минимальна. Для наблюдателя в любой другой инерциальной системе отсчёта этот промежуток времени τ будет больше.

Это выражение экспериментально подтверждается различием между временем существования движущейся элементарной частицы и её собственным временем жизни. Так, для π -мезона собственное время жизни равно $\tau_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ с. При движении со скоростью, близкой к скорости света ($v \approx c$), π -мезон пролетел бы расстояние

$$S_0 = \tau_0 \cdot v = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 7,5 \text{ м}.$$

Но в лабораторных исследованиях на ускорителях элементарных частиц установлено, что π -мезон пролетает (не распадаясь, то есть не прекращая своего существования) значительно большие расстояния. То есть в лабораторной системе отсчёта время жизни движущегося π -мезона существенно больше, чем в его собственной системе отсчёта.

Эффекты замедления времени пренебрежимо малы, если скорость тела гораздо меньше скорости света c . Тем не менее удалось получить прямое подтверждение этого эффекта в экспериментах с макроскопическими часами. Наиболее точные часы – атомные, работающие на атомах цезия. Эти часы «тикают» 9 192 631 770 раз в секунду. Американские физики в 1971 году провели сравнение двух таких часов, причём одни из них находились в полёте вокруг Земли на обычном реактивном лайнере, а другие оставались на Земле в военно-морской обсерватории США. В соответствии с предсказаниями СТО, путешествующие на лайнерах часы должны были отстать от находящихся на Земле часов на $(184 \pm 23) \cdot 10^{-9}$ с. Наблюдаемое отставание составило $(203 \pm 10) \cdot 10^{-9}$ с, то есть ожидаемый и реальный результаты совпали (в пределах ошибок измерений). Через несколько лет эксперимент был повторен и дал результат, согласующийся со СТО с точностью 1%.

Относительность расстояний. Пусть твёрдый стержень покоится в системе отсчёта K' , движущейся со скоростью \vec{v} вдоль оси X относительно системы отсчёта K (рис. 3). Стержень ориентирован параллельно оси X . Его длина, измеренная с помощью эталонной линейки в системе K' , равна l_0 . Её называют *собственной длиной*. Какой будет длина этого стержня, измеренная наблюдателем в системе K ?

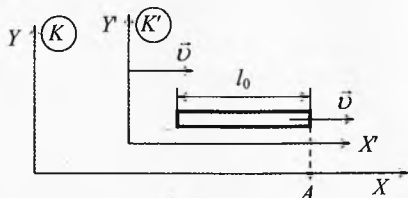


Рис. 3. Относительность расстояний

Под длиной l стержня в системе K , относительно которой стержень движется, понимают расстояние между координатами концов стержня, зафиксированными *одновременно* по синхронизированным часам этой системы.

Измерение длины движущегося стержня можно свести к измерению времени: длина l движущегося со скоростью v стержня равна произведению $v \cdot \tau_0$, где τ_0 – интервал времени по часам в системе K между прохождением начала стержня и его конца мимо какой-нибудь неподвижной в системе K точки (например, точки A).

Поскольку в системе K оба события (прохождение начала и конца стержня мимо фиксированной точки A) происходят в одной точке, то промежуток времени τ_0 между этими событиями в системе K определяется собственным временем этой системы. Итак, длина l движущегося стержня в системе K равна:

$$l = v \cdot \tau_0.$$

С точки зрения наблюдателя в системе K' точка A , принадлежащая системе K , движется вдоль неподвижного стержня в обратную сторону со скоростью $-\bar{v}$, поэтому можно записать:

$$l_0 = v \cdot \tau,$$

где τ – промежуток времени между моментами прохождения точки A мимо концов стержня, измеренный по часам, синхронизированным в движущейся системе отсчёта K' . В данном случае это координатное время (точка A перемещается относительно системы K').

Используя связь $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ между промежутками времени в двух системах отсчёта, найдем:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad l \leq l_0$$

Таким образом, длина стержня зависит от системы отсчёта, в которой она измеряется, то есть является относительной величиной.

Длина стержня оказывается наибольшей в той системе отсчёта, в которой стержень покоится. Тела, движущиеся относительно наблюдателя, сокращаются в направлении своего движения.

Этот релятивистский эффект носит название **лоренцева сокращения длины**. Оно характеризует изменение размера движущегося тела в направлении его движения.

Если стержень расположить перпендикулярно направлению движения, то длина стержня оказывается одинаковой для наблюдателей в обеих системах отсчёта.

Сокращение длины не связано с какими-либо процессами, происходящими в самих телах, реальной деформации тела не происходит.

Следует обратить внимание, что при малых скоростях движения формулы специальной теории относительности переходят в классические соотношения:

$$l \approx l_0 \quad \text{и} \quad \tau \approx \tau_0 \quad \text{при} \quad v \ll c.$$

§ 4. Преобразования Лоренца

В основе специальной теории относительности лежат преобразования Лоренца, которые позволяют переходить от координат одной инерциальной системы отсчёта к другой, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно.

Рассмотрим две системы отсчёта K и K' , пространственные оси которых параллельны друг другу (рис. 4). Пусть система K' движется относительно K вдоль оси X со скоростью \vec{v} . В этом случае преобразования Лоренца будут иметь вид:

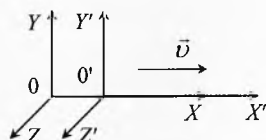


Рис. 4. Преобразования Лоренца

$$\boxed{x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}, \quad \boxed{y' = y}, \quad \boxed{z' = z}, \quad \boxed{t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}},$$

где (x, y, z, t) – координаты и время события, измеренные в «неподвижной» системе отсчёта K , а (x', y', z', t') – координаты и время того же события для наблюдателя, связанного с «движущейся» системой K' .

Замедление времени. Если часы неподвижны в «движущейся» системе K' , то для двух последовательных событий, происходящих с этими часами (например, снятие показаний времени), имеет место $\Delta x' = 0$. Однако относительно наблюдателя в системе K такие часы перемещаются. Поэтому для измерения интервала времени Δt в «неподвижной» системе придётся воспользоваться *двумя разными часами*, «неподвижными» в этой системе K и находящимися на расстоянии $\Delta x = v \cdot \Delta t$ друг от друга. Поэтому интервал времени Δt между двумя измерениями в «неподвижной» системе K будет отличаться от интервала времени $\Delta t'$, измеренного часами «движущейся» системы K' :

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - vx_2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{t_1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Так как $(t_2 - t_1) = \Delta t$ и $(x_2 - x_1) = \Delta x = v \cdot \Delta t$, то:

$$\Delta t' = \frac{(t_2 - t_1) - (x_2 - x_1)v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t - v\Delta t v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t(1 - v^2/c^2)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Итак, показания «движущихся» часов будут меньше разности показаний двух «неподвижных» часов:

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad \Delta t' \leq \Delta t.$$

Важно понимать, что в этой формуле интервал времени $\Delta t'$ измеряется одними движущимися часами K' . Он сравнивается с показаниями Δt нескольких различных, синхронно идущих часов, расположенных в системе K , мимо которых пролетают часы K' . В результате такого сравнения оказывается, что движущиеся часы K' идут медленнее неподвижных часов.

Важный аспект эффекта замедления времени связан с эквивалентностью инерциальных систем отсчёта (принцип относительности). Часы, неподвижные в системе K : $\Delta x = 0$, движутся относительно синхронизированных часов

в системе K' : $\Delta x' = -v \cdot \Delta t'$. В результате, часы K будут идти медленнее по сравнению с часами в системе K' : $\Delta t = \Delta t' \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Несмотря на совпадения обозначений в двух последних формулах, они не противоречат друг другу. Каждая из них описывает различные измерительные процедуры. В первом случае одни часы K' движутся мимо нескольких часов в K , а во втором случае ситуация обратная, и одни часы K движутся мимо нескольких часов в K' .

Относительность одновременности. Рассмотрим несколько синхронизированных часов, расположенных вдоль оси X в каждой из систем отсчёта. В преобразованиях Лоренца предполагается, что в момент времени $t' = t = 0$ начала систем отсчёта совпадают: $x' = x = 0$. На рис. 5 изображена такая синхронизация отсчёта времени с точки зрения системы отсчёта K (левый рисунок) и с точки зрения наблюдателей в K' (правый рисунок).

Предположим, что рядом с каждым часами в обеих системах отсчёта находятся наблюдатели. Положив в преобразованиях Лоренца $t' = 0$, получаем $t = v \cdot x/c^2$. Это означает, что наблюдатели в системе K' , одновременно с совпадением времени на центральных часах, регистрируют различные показания на часах в системе K . Для наблюдателей, расположенных справа от точки $x = 0$, с координатами $x > 0$, в момент времени $t' = 0$ часы «неподвижной» системы отсчёта показывают «будущее» время: $t = v \cdot x/c^2 > 0$. Наблюдатели K' , находящиеся слева от центральных часов ($x < 0$), наоборот, фиксируют «прошлое» время часов K : $t < 0$. На рисунках положение стрелок символизирует подобную разницу показаний часов двух систем отсчёта.

Единое «настоящее», то есть часы, синхронно идущие в различных точках пространства, можно ввести только в рамках конкретной инерциальной системы отсчёта. Однако этого нельзя сделать одновременно для двух различных систем отсчёта.

Движущаяся относительно неподвижных наблюдателей система с их точки зрения содержит рассинхронизированные в направлении движения часы, своеобразное непрерывное объединение «прошлого», «настоящего» и «будущего».

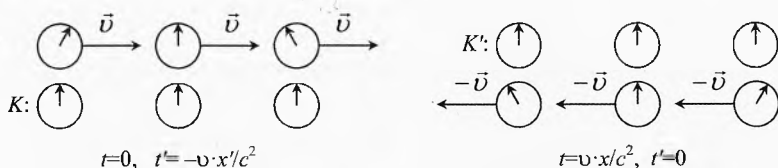


Рис. 5. Относительность одновременности

✎ **Пример 4*. Парадокс карандаша и пенала.** Вдоль оси пенала длиной L , закрывающегося с торцов крышками A и B , со скоростью \vec{v} движется карандаш. Сначала крышка A пенала открыта, а крышка B закрыта. Когда карандаш влетает в пенал, крышка A закрывается. Благодаря релятивистскому уменьшению длины движущегося карандаша в течение некоторого времени он находится в закрытом пенале. Затем открывается крышка B и карандаш свободно вылетает из пенала. Описать явление в системе отсчёта карандаша. Что изменится, если у пенала не открывать крышку B ? Собственная длина карандаша L_0 удовлетворяет условию $L_0 > L > \frac{L_0}{\gamma}$, где $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, $\gamma > 1$ – **релятивистский фактор Лоренца** для карандаша.

➔ **Решение.** Пусть в СО пенала крышка A имеет координату $x = 0$, а крышка B – координату $x = L$, причём крышка A закрывается в момент времени $t_1 = 0$, когда левый конец карандаша имеет координату $x_1 = 0$, а правый конец – координату L_0/γ . С точки зрения СО пенала движущийся карандаш целиком уместается в пенале. Чтобы карандаш свободно вылетел из пенала, крышку B нужно открыть не позднее момента:

$$t_2 = \frac{L - (L_0/\gamma)}{v}.$$

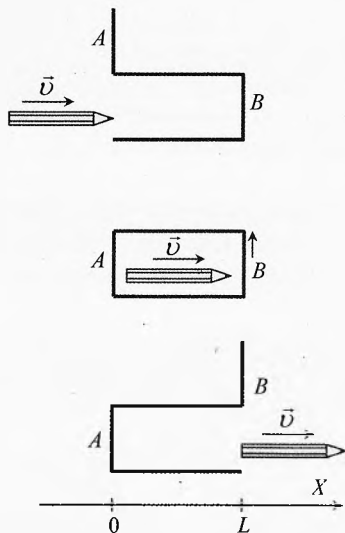


Рис. 6. В системе отсчета пенала

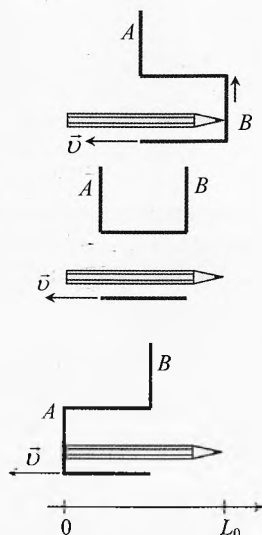


Рис. 7. В системе отсчета карандаша

Итак, в СО пенала события происходят в следующем порядке (рис. 6):

- «короткий» карандаш залетает в пенал;
- закрывается крышка A в момент времени $t_1 = 0$ и в координате $x_1 = 0$;
- карандаш летит внутри пенала;

- открывается крышка B в момент $t_2 = \frac{L - (L_0/\gamma)}{v}$ и в координате $x_2 = L$;
- карандаш вылетает из пенала.

Пусть в СО, связанной с карандашом, крышка A закрывается тоже в момент времени $t'_1 = 0$ и в координате $x'_1 = 0$, тогда из преобразований Лоренца следует, что событие открывания крышки B происходит в координатах:

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \cdot \left(L - v \cdot \frac{L - (L_0/\gamma)}{v} \right) = \gamma \cdot (L - [L - (L_0/\gamma)]) = L_0;$$

$$t'_2 = \frac{t_2 - vx_2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \cdot \left(\frac{L - (L_0/\gamma)}{v} - v \cdot L/c^2 \right) = \gamma \cdot \left(\frac{L(1 - v^2/c^2) - (L_0/\gamma)}{v} \right),$$

$$t'_2 = \frac{L/\gamma - L_0}{v} < 0.$$

Итак, в СО карандаша последовательность событий иная (рис. 7):

- «короткий» пенал налетает на карандаш и задней крышкой B достигает правого конца карандаша;

– открывается крышка B в момент времени $t'_2 = \frac{L/\gamma - L_0}{v}$ (причём $t'_2 < 0$) и в координате $x'_2 = L_0$;

- мимо карандаша пролетает пенал, у которого открыты обе крышки;
- закрывается крышка A в момент времени $t'_1 = 0$ и в координате $x'_1 = 0$;
- пенал улетает от карандаша.

Поскольку указанные события не связаны между собой причинно-следственной связью (закрывание крышки A пенала не является причиной или следствием того, что носик карандаша приблизился к крышке B), изменение их временной последовательности в различных ИСО вполне допустимо и не приводит к каким-либо неожиданным последствиям.

Более парадоксальным выглядит изменение временной последовательности событий, если у пенала не открывать правую крышку B . В этом случае в СО пенала после закрытия крышки A «короткий» карандаш некоторое время находится внутри закрытого пенала, пока его правый конец не столкнется с крышкой B . После столкновения карандаш и/или крышка пенала начнут деформироваться и разрушаться (поскольку скорость движения карандаша во много раз больше скорости упругих деформаций, которая соответствует скорости звука в материале карандаша/пенала). В целом «сценарий» явления будет зависеть от геометрии и массы тел, их прочности и упругих свойств и т.п. Попробуйте промоделировать явление, представив карандаш в виде линейной цепочки упругих шариков.

В СО карандаша (вернее, еще не успевшего деформироваться левого конца карандаша) к моменту закрытия левой крышки A правый конец карандаша уже успел столкнуться со стенкой B пенала и начал деформироваться, так что внутри «короткого» пенала в лучшем случае будет «закрыт» деформированный карандаш. Отметим, что к моменту закрытия крышки A зона деформации карандаша и/или пенала не успевает достичь левого конца карандаша (или крышки A). ◀

§ 5. Эффект Доплера

Опыт показывает, что частота звуковых и световых волн, воспринимаемых наблюдателем, зависит от скорости движения наблюдателя относительно источника.

В 1842 г. Христиан Доплер (австрийский учёный, сын каменотеса, родившийся в Зальцбурге) на основе классических представлений теоретически обосновал эту зависимость, называемую эффектом Доплера.

Рассмотрим эффект Доплера для электромагнитных волн (света) в общем (релятивистском) случае.

Пусть источник, движущийся со скоростью \vec{v} , излучает свет частотой ν_0 (рис. 8). Эта частота измеряется наблюдателем, связанным с источником (так называемая собственная частота). Если этот же сигнал регистрируется «неподвижным» наблюдателем, то регистрируемая частота ν будет отличаться от собственной частоты источника:

$$\nu = \nu_0 \cdot \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta}, \quad \lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где θ – угол между направлением от наблюдателя на источник и скоростью источника.

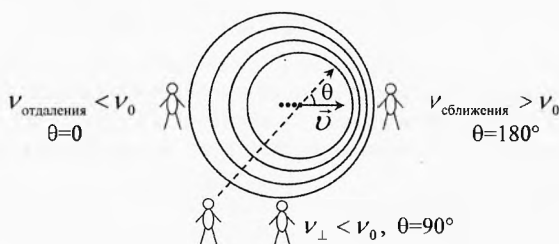


Рис. 8. Эффект Доплера



Христиан Доплер
(1803–1853)

Различают продольный и поперечный эффект Доплера.

В случае *продольного эффекта Доплера* источник движется прямо на приёмник или удаляется в противоположную сторону.

Если источник удаляется от приёмника ($\theta = 0$), то его частота уменьшается (красное смещение):

$$\nu_{\text{отдаления}} = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}, \quad \nu_{\text{отдаления}} < \nu_0, \quad \lambda_{\text{отдаления}} = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

а если источник приближается к приёмнику ($\theta = 180^\circ$), то частота увеличивается (синее смещение):

$$\boxed{v_{\text{сближения}} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}, \quad v_{\text{сближения}} > v_0,} \quad \boxed{\lambda_{\text{сближения}} = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}}$$

Поперечный эффект Доплера возникает, когда $\theta = 90^\circ$, то есть направление на источник перпендикулярно его скорости (например, источник «пролетает над» приёмником). В этом случае проявляется только релятивистский эффект замедления времени:

$$\boxed{v_{\perp} = v_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad v_{\perp} < v_0,} \quad \boxed{\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

Аналога поперечного эффекта в классической физике нет. Это – чисто релятивистский эффект. В отличие от него, продольный эффект Доплера обусловлен как классической составляющей, так и релятивистским эффектом замедления времени.

Поперечный эффект Доплера экспериментально наблюдали в 1938 г. Герберт Айвс (Herbert Eugene Ives) и Джордж Стилуэл (George R. Stilwell). Это явилось прямым доказательством отсутствия абсолютного времени для разных систем отсчёта и справедливости соотношения для собственного и координатного времени.

Эффект Доплера используется в гидро- и радиолокации для определения скорости судов, самолетов и др. объектов. Эффект Доплера также применяется для измерения температуры светящихся раскаленных газов методами спектроскопии. Широко применяется эффект Доплера при ультразвуковых исследованиях кровообращения, работы сердца и других органов человека.

В астрономии эффект Доплера используется для измерения радиальной составляющей скорости звезды (касательную составляющую скорости определяют по годичному параллаксу). Скорость звёзд относительно Земли значительно меньше скорости света ($v \ll c$). Поэтому в астрономии используется **эффект Доплера в классическом варианте**:

$$\boxed{v = \frac{v_0}{1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta},} \quad \boxed{\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta\right)}, \quad \boxed{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \cdot \cos\theta}, \quad \text{при } v \ll c.$$

При приближении источника к наблюдателю ($\theta = 180^\circ$) воспринимаемая частота увеличивается, а длина волны уменьшается:

$$v_{\text{сближения}} = v_0 \cdot \frac{c}{1-v}, \quad \lambda_{\text{сближения}} = \lambda_0 \cdot \frac{c-v}{c}, \quad \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right| = \frac{v}{c}, \quad \Delta\lambda < 0.$$

При отдалении источника ($\theta = 90^\circ$) – частота уменьшается, а длина волны увеличивается:

$$v_{\text{отдаления}} = v_0 \cdot \frac{c}{1+v}, \quad \lambda_{\text{отдаления}} = \lambda_0 \cdot \frac{c+v}{c}, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}, \quad \Delta\lambda > 0.$$

✎ **Пример 5*. Парадокс близнецов.** Один брат-близнец остаётся на Земле, а второй отправляется в космические странствия с околосветовой скоростью. С точки зрения домоседа, движущийся относительно него путешественник имеет замедленный ход времени. Поэтому при возвращении он окажется моложе. Однако с точки зрения космонавта двигалась Земля, поэтому моложе должен оказаться брат-домосед.

→ **Решение. Способ I.** Во время полёта путешественник и домосед находятся в различных точках пространства и не могут сравнивать свои часы непосредственно. Поэтому, будем считать, что вдоль траектории движения путешественника в «неподвижной» системе, связанной с домоседом, расставлены одинаковые, синхронно идущие часы, которые может наблюдать путешественник во время полёта. Благодаря процедуре синхронизации в «неподвижной» системе отсчёта введено единое время, определяющее в данный момент «настоящее» этой системы.

После старта путешественник «переходит» в инерциальную систему отсчёта K' , движущуюся относительно «неподвижной» K со скоростью v . Этот момент времени принимается братьями за начальный $t = t' = 0$. Каждый из них будет наблюдать замедленный ход часов другого брата.

Однако, единое «настоящее» системы K для путешественника перестаёт существовать. В системе отсчёта K' есть своё «настоящее» (множество синхронизированных часов). Для системы K' , чем дальше по ходу движения путешественника находятся части системы K , тем в более отдалённом «будущем» (с точки зрения «настоящего» системы K') они находятся.

Непосредственно это будущее наблюдать путешественник не может. Это могли бы сделать другие наблюдатели системы K' , расположенные впереди по движению и имеющие синхронизированное с путешественником время.

Поэтому, хотя все часы в неподвижной системе отсчёта, мимо которых пролетает путешественник, идут с его точки зрения медленнее, из этого не следует, что они отстают от его часов.

В момент времени $t' = 0$, чем дальше впереди по курсу находятся «неподвижные» часы, тем больше их показания с точки зрения путешественника. Когда он достигает этих часов, они не успеют отстать настолько, чтобы скомпенсировать начальное расхождение времени.

Действительно, положив координату путешественника в преобразованиях Лоренца равной $x' = 0$, получим закон его движения относительно системы K : $x = vt$. Тогда время, прошедшее после начала полёта, по часам в системе K' меньше, чем в K :

$$t' = \frac{t - v \cdot x / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{t - v \cdot (vt) / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{t(1 - v^2 / c^2)}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = t \cdot \sqrt{1 - v^2 / c^2}, \quad t' < t.$$

Другими словами, время на часах путешественника t' отстаёт от показаний часов t системы K , мимо которых он в данный момент пролетает. В то же время часы, мимо которых пролетает путешественник, неподвижны в K : $\Delta x = 0$. Поэтому их темп хода с точки зрения путешественника выглядит замедленным:

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - v \cdot x_2 / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - \frac{t_1 - v \cdot x_1 / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{(t_2 - t_1) - v \cdot (x_2 - x_1) / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{\Delta t - v \cdot \Delta x / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}.$$

Так как $\Delta x = 0$, то $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$, значит, $\Delta t' > \Delta t$.

Таким образом, несмотря на то, что все конкретные часы в системе K идут медленнее с точки зрения наблюдателя в K' , разные часы вдоль его траектории будут показывать время, ушедшее вперед.

Разность темпа хода часов Δt и $\Delta t'$ – эффект относительный, тогда как значения текущих показаний t и t' в одной пространственной точке – носят абсолютный характер. Наблюдатели, находящиеся в различных инерциальных системах отсчёта, но «в одной» пространственной точке, всегда могут сравнить текущие показания своих часов. Путешественник, пролетая мимо часов системы K , видит, что они ушли вперёд $t > t'$. Поэтому, если путешественник решит остановиться (быстро затормозив), ничего не изменится, и он попадёт в «будущее» системы K . Естественно, после остановки темп хода его часов и часов в K станет одинаковым. Однако часы путешественника будут показывать меньшее время, чем часы системы K , находящиеся в точке остановки. В силу единого времени в системе K часы путешественника отстанут от всех часов K , в том числе и от часов его брата. После остановки путешественник может вернуться домой. В этом случае весь анализ повторяется. В результате, как в точке остановки и разворота, так и в исходной точке при возвращении путешественник оказывается моложе своего брата-домоседа.

Если же вместо остановки путешественника до его скорости ускорится домосед, то последний «попадёт» в «будущее» системы путешественника. В результате «домосед» окажется моложе «путешественника». Таким образом, кто изменяет свою систему отсчёта, тот и оказывается моложе.

Способ II. Обмен сигналами. Вычисление замедления времени с позиции каждого брата можно провести при помощи анализа обмена сигналами между ними. Хотя братья, находясь в различных точках пространства, не могут непосредственно сравнивать показания своих часов, они могут передавать сигналы «точного времени» при помощи световых импульсов или видеотрансляции изображения часов. Понятно, что при этом они наблюдают не «текущее» время на часах брата, а «прошлое», так как сигналу требуется время для распространения от источника к приёмнику.

При обмене сигналами необходимо учитывать эффект Доплера. Если источник удаляется от приёмника, то частота сигнала уменьшается, а когда он приближается – увеличивается:

$$\nu_{\text{отдаления}} = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}, \quad \nu_{\text{сближения}} = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}},$$

где ν_0 – собственная частота излучения, а ν – частота принимаемого наблюдателем сигнала. Эффект Доплера имеет классическую составляющую и составляющую релятивистскую, непосредственно связанную с замедлением времени. Скорость v , входящая в соотношения изменения частоты, является относительной скоростью источника и приёмника.

Рассмотрим ситуацию, в которой братья передают друг другу каждую секунду (по своим часам) сигналы точного времени ($\nu_0 = 1$ Гц). Проведём сначала расчёт с позиции путешественника.

Пока путешественник удаляется от Земли, он, в силу эффекта Доплера, регистрирует уменьшение частоты принимаемых сигналов. Видеотрансляция с Земли выглядит более медленной. После быстрого торможения и остановки путешественник перестаёт удаляться от земных сигналов, и их период сразу оказывается равным его секунде. Темп видеотрансляции становится «естественным», хотя, в силу конечности скорости света, путешественник по-прежнему наблюдает «про-

шное» своего брата. Развернувшись и разогнавшись, путешественник начинает «набегать» на идущие ему навстречу сигналы и их частота увеличивается. «Движения брата» на видеотрансляции с этого момента начинают выглядеть для путешественника ускоренными.

Время полёта по часам путешественника в одну сторону равно t'_1 , и такое же в обратную. Количество принятых «земных секунд» в течение путешествия равно их частоте ν , умноженной на время. Поэтому при удалении от Земли путешественник получит существенно меньше «секунд»:

$$t_1 = t'_1 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} < t'_1,$$

а при приближении, наоборот, больше:

$$t_2 = t'_1 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} > t'_1.$$

Суммарное количество «секунд», полученных с Земли за время $t' = 2t'_1$:

$$t = t_1 + t_2 = t'_1 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} + t'_1 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} = t'_1 \cdot \frac{c-v}{\sqrt{c^2-v^2}} + t'_1 \cdot \frac{c+v}{\sqrt{c^2-v^2}} = 2t'_1 \cdot \frac{c}{\sqrt{c^2-v^2}},$$

Итак, путешественник успел получить с Земли больше «секунд», чем отправил на неё, в точном соответствии с формулой замедления времени:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

Несколько иная арифметика у домоседа. Пока его брат удаляется, он также регистрирует увеличенный период точного времени, передаваемый путешественником. Однако, в отличие от брата, домосед наблюдает такое замедление дольше. Время полёта на расстояние L в каждую сторону составляет по земным часам t_1 . Торможение и разворот путешественника домосед увидит спустя дополнительное время t_2 , требуемое свету для прохождения расстояния L от точки разворота до Земли. Поэтому, только через время $t_1 + t_2$ от начала путешествия домосед зарегистрирует ускоренную работу часов приближающегося брата.

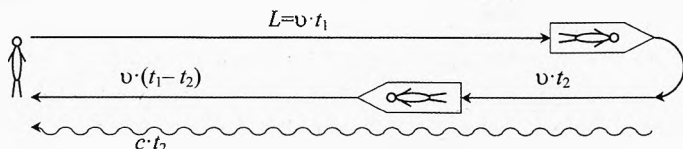


Рис. 9. Парадокс близнецов

Время движения света от точки разворота выражается через время полёта к ней путешественника следующим образом (см. рис. 9):

$$t_2 = \frac{L}{c} = \frac{v t_1}{c}$$

Поэтому количество «медленных секунд», полученных от путешественника, до момента его разворота (по наблюдениям домоседа) равно:

$$t'_1 = (t_1 + t_2) \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} = t_1 \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} = t_1 \cdot \sqrt{1-v^2/c^2}.$$

Сигналы с повышенной частотой домосед принимает в течение оставшегося времени $t_1 - t_2$. За это время домосед получает еще t'_2 «быстрых секунд» от путешественника:

$$t'_2 = (t_1 - t_2) \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} = t_1 \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} = t_1 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Суммарное число полученных «секунд» за время $t = 2t_1$ равно:

$$t' = t'_1 + t'_2 = 2t_1 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2} = t \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Таким образом, соотношение для показания часов в момент встречи путешественника (t') и брата-домоседа (t) не зависит от того, с чьей точки зрения оно рассчитывается. Поэтому парадокса не наблюдается.

Парадоксом близнецов часто также называют сам вывод теории относительности о том, что один из близнецов состарится сильнее другого. Хотя такая ситуация и необычна, в ней нет внутреннего противоречия. Многочисленные эксперименты по удлинению времени жизни элементарных частиц и замедлению хода макроскопических часов при их движении подтверждают теорию относительности. Это даёт основание утверждать, что замедление времени, описанное в истории с близнецами, произойдёт и при реальном осуществлении этого мысленного эксперимента. ←

§ 6. Импульс и масса в релятивистской динамике

Вещественные и невещественные частицы. В физике рассматриваются два вида материи: вещество и поле.

Все вещественные частицы (тела) характеризуются массой (мерой инертности тел).

Частицы электромагнитного поля (фотоны) не обладают массой покоя. Рожденные (излученные веществом), они сразу летят с максимальной скоростью c . У них нет массы покоя, они не могут существовать без движения. Фотоны могут поглощаться веществом или отразиться с такой же скоростью. При поглощении они исчезают, а их энергия и импульс передаются веществу.

Для частицы, не имеющей массы покоя, имеет место связь между её энергией и импульсом:

$$\boxed{E = pc} \quad \text{или} \quad \boxed{E^2 - p^2 \cdot c^2 = 0}. \quad (3)$$

Скорость вещественной частицы в любой системе отсчёта меньше c . Энергия частицы вещества в собственной системе отсчёта не равна нулю, хотя её импульс и кинетическая энергия в собственной системе отсчёта, где она покоится, равны нулю. Энергия покоя вещественной частицы пропорциональна её массе:

$$\boxed{E_0 = mc^2}. \quad (4)$$

Для движущейся вещественной частицы её энергия определяется из соотношения:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$$

Или с учетом (4):

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 c^4 \quad (5)$$

Формула (5) – есть фундаментальное соотношение релятивистской динамики. Оно справедливо для любой частицы в любой ИСО. Как частный случай из неё следует соотношение (3) для невещественной частицы, у которой масса покоя $m = 0$.

Релятивистский импульс и масса. В классической механике импульс тела равен $\vec{p} = m\vec{v}$. Это выражение не удовлетворяет постулатам теории относительности, в частности связи импульса и энергии, а также законам сохранения энергии и импульса – краеугольным камням естествознания.

В теории относительности релятивистский импульс определяется соотношением:

$$\vec{p} = \frac{E \cdot \vec{v}}{c^2} \quad (6)$$

Подставим (6) в (5):

$$E^2 - \left(\frac{E \cdot v}{c^2} \right)^2 \cdot c^2 = m^2 c^4 \Rightarrow E \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = mc^2.$$

$$\Rightarrow E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (7)$$

Формула (7) определяет полную энергию тела массы m , движущегося со скоростью v в данной ИСО.

Подставляя (7) в (6), получим:

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (8)$$

Формула (8) определяет импульс тела массы m , движущегося со скоростью \vec{v} в данной ИСО.

Масса m частицы является для неё неизменной величиной (инвариантом) для любой ИСО.

Некоторые авторы учебников инвариантную массу m обозначают буквой m_0 и называют её массой покоя. Вводится также релятивистская масса $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Тогда энергия покоя $E_0 = m_0 c^2$, полная энергия $E = mc^2$, а импульс $\vec{p} = m\vec{v}$. Так трактовались понятия массы, импульса и энергии при жизни Эйнштейна. Но во второй

половине XX века многие физики пришли к выводу, что масса частицы не зависит от её скорости, то есть является инвариантной величиной для всех ИСО. Известный автор школьных учебников Геннадий Яковлевич Мякишев (1926–2003) на вопрос автора этой книги: «Скажите, масса зависит от скорости или нет?» – ответил (в 1994 г.), что нельзя измерить массу движущегося тела, поэтому это вопрос методики изложения материала, но при любом подходе конечные формулы для энергии и импульса получаются одинаковыми.

Таблица 1. Формулы для массы, энергии, импульса

Трактовка 1-й половины XX в.	Трактовка 2-й половины XX в.
$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$	$m = m_0$
$\vec{p} = m\vec{v}$ или $\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$	$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ или $\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$
$E = mc^2$ или $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$	$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ или $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

Кинетическая энергия. Определим кинетическую энергию тела как изменение полной релятивистской энергии E по сравнению с её собственной энергией E_0 (энергией покоя):

$$E_k = \Delta E = E - E_0 \quad \Rightarrow \quad E_k = m \cdot c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Из этого соотношения видно, что для вещественной частицы при скорости $v \rightarrow c$ кинетическая энергия стремится к бесконечности. А для её создания нужно совершить работу внешними силами, которая реально не может быть бесконечной. Значит, разогнать частицу до скорости c невозможно теоретически и, безусловно, практически.

Получим формулу для кинетической энергии в нерелятивистском случае, когда $v \ll c$:

$$\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

$$\Rightarrow E_k = m \cdot c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) \approx m \cdot c^2 \left(\left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) - 1 \right) = \frac{mv^2}{2}.$$

Итак, при малой по сравнению со скоростью света скорости тела его кинетическая энергия вычисляется по формуле $E_k = \frac{mv^2}{2}$, известной с первой половины XIX века. То есть при малых скоростях релятивистская механика переходит в классическую.

* Использована приближенная формула: $(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha \cdot x$ при $x \ll 1$.

Выполняется методологический принцип — принцип соответствия. Применение новой (более общей) физической теории в условиях, где справедлива менее общая теория, должно дать такой же результат.

§ 7. Релятивистское уравнение движения

Согласно основному закону динамики в формулировке Ньютона, скорость изменения импульса тела равна результирующей сил, приложенных к телу:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

Эта формулировка справедлива, как для классической механики Ньютона, так и для релятивистской. Различие в том, что классический импульс тела, введенный французским учёным Рене Декартом и уточненный количественно Ньютоном, равен произведению массы и его скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}, \text{ а релятивистский импульс равен } \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Это выражение для релятивистского импульса было получено Планком в 1906 г.

В развёрнутом виде релятивистское уравнение движения тела

$$\frac{\Delta \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right)}{\Delta t} = \vec{F}$$

или

$$\Delta \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) = \vec{F} \cdot \Delta t$$



Макс Планк
(1858–1947)

Пример 6. На покоящийся протон действует электрическое поле напряженностью $E = 3,0 \cdot 10^5$ В/м. Вычислить скорость протона через промежутки времени $t_1 = 1,0$ мкс и $t_2 = 10,0$ мкс. Масса протона $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

→ **Решение.** Решим задачу сначала в классическом варианте:

$$v_{\text{кл}} = a_{\text{кл}} \cdot t, \quad a_{\text{кл}} = \frac{F}{m}, \quad F = q \cdot E \Rightarrow v_{\text{кл}} = \frac{q \cdot E}{m} \cdot t,$$

$$v_{\text{кл}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^5}{1,67 \cdot 10^{-27}} \cdot 10^{-6} \approx 2,87 \cdot 10^7 \text{ (м/с)}.$$

Аналогично $v_{2\text{кл}} \approx 2,87 \cdot 10^8$ (м/с). В этом случае скорость протона оказалась близкой к скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, что сомнительно.

Теперь вычислим скорость в обоих случаях, используя релятивистское выражение основного закона динамики.

Учитывая, что $v_0 = 0$, получим: $\frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = F \cdot t$.

Обозначим $\frac{F}{m} = a$. Тогда $\frac{v}{at} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \frac{v^2}{a^2 t^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}$.

Итак, скорость $v = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{a^2 t^2} + \frac{1}{c^2}}}$.

Подставляя данные, получим: $v_1 \approx 2,86 \cdot 10^7$ м/с, $v_2 \approx 2,08 \cdot 10^8$ м/с.

Как видно, в первом случае скорости, вычисленные на основе классической механики и по теории относительности, практически совпали. Заметим, что эта скорость на порядок (примерно в 10 раз) меньше абсолютной $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Во втором же случае результаты вычислений значительно отличаются: в классическом варианте получилось близко к скорости c , и почти в 1,5 раза больше, чем в верном — релятивистском.

Отсюда вывод. Классической механикой можно пользоваться, если скорость тел существенно (на порядок и более) меньше, чем скорость света в вакууме. Если же при вычислении по формулам классической механики скорость получится близкой к скорости света или больше неё, то нужно применять релятивистские уравнения. ←

✓ **Ответ.** В первом случае протон разгонится до скорости $2,86 \cdot 10^7$ м/с, а во втором — до $2,08 \cdot 10^8$ м/с.

§ 8. Энергия системы частиц

Применим основное соотношение теории относительности $E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 c^4$ для системы из нескольких невзаимодействующих частиц. Пусть наша система состоит, к примеру, из трех таких частиц, находящихся в системе отсчёта K . Запишем основное соотношение, связывающее энергию, импульс и массу для системы частиц в целом:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = M^2 c^4, \quad (9)$$

где M — масса системы частиц, $E = E_1 + E_2 + E_3$ — её энергия, $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3$ — общий импульс системы.

Перейдем теперь в систему отсчёта K_0 , связанную с центром масс системы частиц. В этой системе отсчёта импульс системы частиц равен нулю:

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \vec{p}_{03} = 0.$$

Учитывая это, запишем уравнение (9) для этой системы отсчёта:

$$E_0 = M c^2. \quad (10)$$

Представим энергию каждой частицы в этой системе отсчёта как сумму её собственной энергии (энергии покоя) и кинетической энергии:

$$E_{01} = m_1 \cdot c^2 + E_{\kappa 01}, \quad E_{02} = m_2 \cdot c^2 + E_{\kappa 02}, \quad E_{03} = m_3 \cdot c^2 + E_{\kappa 03}.$$

Тогда общая энергия системы частиц:

$$E_0 = (m_1 + m_2 + m_3)c^2 + (E_{\kappa 01} + E_{\kappa 02} + E_{\kappa 03}). \quad (11)$$

Обозначим общую кинетическую энергию частиц в системе отсчёта, связанной с центром масс, через $E_{\kappa 0}$:

$$E_{\kappa 0} = E_{\kappa 01} + E_{\kappa 02} + E_{\kappa 03}. \quad (12)$$

Подставляя (10) и (12) в (11), получим:

$$Mc^2 = (m_1 + m_2 + m_3)c^2 + E_{\kappa 0}.$$

Итак, общая масса системы частиц равна:

$$M = (m_1 + m_2 + m_3) + \frac{E_{\kappa 0}}{c^2}.$$

Мы пришли к необыкновенному с точки зрения классической механики результату.

Масса совокупности невзаимодействующих частиц больше суммы масс частиц, из которых она состоит.

Введем величину $\Delta m = M - \sum m_i$ — избыток массы совокупности невзаимодействующих частиц над суммой масс частиц. Значит, избыток масс равен:

$$\Delta m = \frac{E_{\kappa 0}}{c^2}.$$

Из этого соотношения следует, что при нагревании, например, идеального газа (энергия взаимодействия которого по определению равна нулю), когда кинетическая энергия молекул газа возрастает, возрастает и масса газа!

Энергия системы связанных частиц. Если система частиц (тело) связана силами притяжения (молекулярными, ядерными или др.), то в выражение для её собственной энергии E_0 (энергия в системе отсчёта, где это тело неподвижно) кроме кинетической энергии частиц тела $E_{\kappa 0}$ входит ещё собственная потенциальная энергия, то есть энергия взаимодействия частиц тела, или энергия связи:

$$E_0 = \sum m_i c^2 + E_{\kappa 0} + W_0.$$

Поскольку $E_0 = Mc^2$, то

$$Mc^2 = \sum m_i c^2 + E_{\kappa 0} + W_0 \quad \text{или} \quad M = \sum m_i + \frac{E_{\kappa 0} + W_0}{c^2}.$$

Поскольку энергия связи (энергия притяжения) частиц отрицательна ($W_0 < 0$), то

$$M = \sum m_i + \frac{E_{\kappa 0} - |W_0|}{c^2}.$$

Обозначим $M - \sum m_i = \Delta m$ и назовём **дефектом массы**. Тогда:

$$\Delta m = \frac{E_{\kappa 0} - |W_0|}{c^2}. \quad (13)$$

Например, для тел в твёрдом и жидком состоянии суммарная кинетическая энергия молекул $E_{\kappa 0}$ меньше модуля энергии притяжения частиц (энергии связи). Поэтому для жидких и твёрдых тел дефект массы отрицательный, то есть сумма масс m_i отдельно взятых частиц больше общей массы M тела (системы связанных частиц).

В частности, при температурах, близких к абсолютному нулю $T \rightarrow 0$, кинетическая энергия $E_{\kappa 0} \approx 0$. Тогда

$$\Delta m \approx -\frac{|W_0|}{c^2} \Rightarrow |W_0| = -\Delta m c^2 \text{ или } W_0 = \Delta m c^2.$$

Энергия W_0 отрицательна, она равна работе сил притяжения, которую совершат эти силы при рассоединении тела на отдельные частицы под действием внешних сил и удалении их на расстояние, при котором частицы уже не будут взаимодействовать.

Если такое произойдёт, то дефект массы станет положительным. Как видно из (13), он будет равен $\Delta m = \frac{E_{\kappa 0}}{c^2}$, что совпадает с выражением, полученным выше для невзаимодействующих частиц.

Дефект массы может быть равен нулю для связанных притяжением частиц. Как видно из (13), это будет при $E_{\kappa 0} = |W_0|$.

Обратим внимание на то, что внутренняя энергия теплового движения и взаимодействия частиц тела:

$$U = E_{\kappa 0} + W_0 = E_{\kappa 0} - |W_0|.$$

Подставляя в (13), получим: $\Delta m = \frac{U}{c^2}$.

Если тело нагревается, охлаждается или происходит фазовый переход (плавление, кристаллизация или испарение), то масса тела изменяется на

$$\Delta m = \frac{\Delta U}{c^2}.$$

✎ **Пример 7.** Один килограмм льда, взятый из холодильника при температуре $t_1 = -20^\circ\text{C}$, нагрели до $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и расплавили. Затем нагрели получившуюся воду до температуры $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Определить изменение массы. $c_{\text{л}} = 2100 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, $\lambda = 335 \text{ кДж}/\text{кг}$.

→ **Решение.** $\Delta U = Q_1 + Q_2 + Q_3 = c_{\text{в}} m(t_0 - t_1) + \lambda m + c_{\text{в}} m(t_2 - t_0)$.

$$\Delta U = 2100 \cdot 1(0 - (-20)) + 335 \cdot 10^3 \cdot 1 + 4200 \cdot 1 \cdot (50 - 0) = 587 \text{ (кДж)}.$$

Тогда $\Delta m = \frac{\Delta U}{c^2}$, $\Delta m = \frac{587 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^{16}} = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ (кг)} = 6,5 \text{ (нг)}$. ←

✓ **Ответ.** Масса увеличилась на 6,5 нг.

Интересно, существуют ли весы, измеряющие в пределах одного нанограмма при взвешивании тела массой 1 кг? Если есть, то, нагревая воду в закрытом сосуде, можно будет провести экспериментальную проверку дефекта массы для этого опыта.

У атомных ядер экспериментально обнаружен дефект массы и соответствующая ему энергия связи. Расщепление тяжёлых и синтез легких ядер приводят к уменьшению массы вещества и, соответственно, к увеличению модуля энергии связи, обусловленной ядерными силами, а значит, к увеличению за счёт этого кинетической энергии в невиданных раньше масштабах (цепные ядерные реакции, ядерные взрывы). Расчёты значений выделяемой энергии по релятивистской формуле $\Delta E = \Delta m c^2$ подтверждаются экспериментально.



Упражнения

1 В инерциальной системе отсчёта неподвижно закреплено зеркало. К зеркалу со скоростью v приближается источник света. Определить скорость отражённого света в системе отсчёта, связанной с зеркалом?

2 Релятивистский импульс электрона в 2 раза больше посчитанного по классической (нерелятивистской) формуле. Определить кинетическую энергию.

3 Определить скорость частицы, если кинетическая энергия равна энергии покоя частицы.

4 Относительная скорость двух инерциальных систем отсчёта равна $v_{\text{отн}} = c/4$. С какой скоростью должна двигаться частица в одной из этих систем отсчёта, чтобы в другой её скорость оказалась равной $v_2 = c/2$?

5 В системе отсчёта K со скоростями v_1 и v_2 сближаются два точечных источника света. Определить в системе отсчёта K : скорость взаимного сближения источников, скорость сближения световых волн источников, скорость сближения световой волны первого источника со вторым источником. Определить скорость первого источника относительно второго источника, скорость световой волны первого источника относительно второго источника.

6 Пи-мезон (собственное время жизни $\tau_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ с) пролетел от места своего рождения до места распада $l = 500$ м. Оценить, на сколько процентов его скорость отличается от скорости света.

7 Определить собственное время, необходимое для полета к астрономическим объектам: α Центавра (4 св. года), Сириусу (9 св. лет), Бетельгейзе (650 св. лет), β Ориона (1073 св. года) – на космическом корабле, если его скорость составляет $v = 0,9999999$ с. При вычислениях считайте движение космического корабля на всём пути равномерным.

8 Записать выражение для эффекта Доплера для длины волны в релятивистском и нерелятивистском случаях.

9 При наблюдении спектра водорода в далекой галактике оказалось, что зеленая линия спектра с длиной волны $\lambda_0 = 486$ нм сместилась в красную область спектра и заняла место красной линии с длиной волны $\lambda = 656$ нм. Почему это произошло? С какой скоростью движется галактика относительно Земли? Считать, что касательная составляющая скорости этой галактики равна нулю.

10 Покоящаяся частица массой m_0 с собственной энергией E_0 поглощает безмассовую частицу с энергией E . Определить массу возникшей частицы. Во сколько раз она больше прежней, если: а) $E = 4E_0$; б) $E = E_0$; в) $E = 0,5E_0$; г) $E = 10^{-8} \cdot E_0$.

11 Рождающиеся с энергией $E = 10$ ГэВ в экспериментах на ускорителях элементарные частицы мюоны «живут» в среднем $\tau = 2,1 \cdot 10^{-4}$ с, двигаясь с огромной скоростью относительно экспериментальной установки. Определить собственное время жизни мюонов и расстояние, которое они пролетают до распада в лабораторной системе отсчёта. Масса мюона связана с его собственной энергией соотношением $E_0 = m_\mu \cdot c^2 = 105,7$ МэВ.

12 Частица массой m с энергией E_1 в лабораторной системе отсчёта налетает на такую же неподвижную частицу. Удар неупругий. Какова масса совокупности этих частиц? Каков избыток массы?

13 Найти изменение массы водорода при нагревании при постоянном объёме от 0 до 500°C? Масса водорода при 0°C равна $m = 20$ кг.

14 Протон влетает со скоростью $v = 0,99 \cdot c$ в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,2$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить радиус окружности, которую опишет протон в магнитном поле. Расчёт сделать по формулам ньютоновской и релятивистской механики.

Решения, указания и ответы для самоконтроля

1 с.

$$\mathbf{2} \quad p_{\text{рел}} = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad p_{\text{кл}} = m_0 \cdot v, \quad p_{\text{рел}} = 2 \cdot p_{\text{кл}}; \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 2.$$

$$E_{\text{к}} = E - E_0 = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) = m_0 \cdot c^2 = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ (Дж)} = 511 \text{ (кэВ)}.$$

$$\mathbf{3} \quad E_{\text{к}} = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right), \quad E_0 = m_0 \cdot c^2, \quad E_{\text{к}} = E_0; \Rightarrow v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c.$$

$$\mathbf{4} \quad v_1 = \frac{v_2 + v_{\text{отн}}}{1 + (v_2 \cdot v_{\text{отн}})/c^2} = \frac{2 \cdot c}{3}, \quad \text{либо} \quad v_1' = \frac{v_2 - v_{\text{отн}}}{1 - (v_2 \cdot v_{\text{отн}})/c^2} = \frac{2 \cdot c}{7}.$$

$$\mathbf{5} \quad v_1 + v_2; \quad 2c; \quad c + v_2; \quad \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 \cdot v_2)/c^2}; \quad c.$$

$$\mathbf{6} \quad l = c\tau, \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \Rightarrow v = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c \cdot \tau_0}{l}\right)^2} = 0,99989 \cdot c.$$

Значит, $\delta = \frac{c - v}{c} = 0,00011$ или $0,011\%$.

$$\mathbf{7} \quad \tau_0 = \tau \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad \tau_{01} = (4 \text{ года}) \cdot \sqrt{1 - (0,9999999)^2} = 0,001789 \text{ года},$$

$$\tau_{01} = (0,001789 \text{ года}) \cdot (365,25 \frac{\text{сут}}{\text{год}}) \cdot (24 \frac{\text{ч}}{\text{сут}}) \approx 15,68 \text{ ч} = 15 \text{ ч } 41 \text{ мин}.$$

Аналогично, $\tau_{02} \approx 1,5$ сут; $\tau_{03} \approx 106$ сут; $\tau_{04} \approx 0,5$ года.

$$\mathbf{8} \quad \lambda_{\text{рел}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta\right), \quad \lambda_{\text{кл}} = \lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta\right).$$

$$\mathbf{9} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta\right). \text{ Галактика отдаляется (т.к. } \lambda > \lambda_0 \text{):}$$

$$\cos\theta = \cos 0^\circ = 1, \Rightarrow \lambda = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}, \Rightarrow v = c \cdot \frac{\lambda^2 - \lambda_0^2}{\lambda^2 + \lambda_0^2} = 0,29 \cdot c = 8,7 \cdot 10^7 \text{ (м/с)}.$$

$$\mathbf{10} \quad p = p_2, \quad E_0 + E = E_2, \quad E_0 = m_0 c^2, \quad E = p \cdot c, \quad E_2^2 - p_2^2 \cdot c^2 = m^2 c^4.$$

$$\Rightarrow m = m_0 \cdot \sqrt{1 + 2E/E_0}; \quad m_a = 3m_0; \quad m_b = m_0 \cdot \sqrt{3}; \quad m_u = m_0 \cdot \sqrt{2}; \quad m_r \approx m_0;$$

$$\mathbf{11} \quad E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \Rightarrow \tau_0 = \tau \cdot \frac{E_0}{E} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ (с)},$$

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}} \approx 0,9999 \cdot c; \quad l = v \cdot \tau = 63 \text{ (км)}.$$

$$\mathbf{12} \quad \vec{p}_1 = \vec{p}; \quad E_1 + E_2 = E; \quad E_1^2 - p_1^2 \cdot c^2 = m^2 c^4; \quad E_2^2 = m^2 c^4; \quad E^2 - p^2 \cdot c^2 = M^2 c^4;$$

$$\Rightarrow M = m \sqrt{2(E_1/(mc^2) + 1)}, \quad \Delta m = m \sqrt{2(E_1/(mc^2) + 1)} - 2m.$$

$$\mathbf{13} \quad \Delta m = \frac{\Delta U}{c^2} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta t \right) \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ (кг)} = 1 \text{ (мг)}, \text{ где } M = 0,002 \text{ кг/моль},$$

$R = 8,31 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $i = 5$ — число степеней свободы двухатомного газа H_2 .

14 Поскольку $\vec{F}_L \perp \vec{v}$, то работу сила Лоренца не совершает, значит, энергия протона не изменяется, а модуль скорости остается постоянным ($v = \text{const}$). Значит, протон движется по окружности.

$$ma_n = F_L, \quad a_n = \frac{v^2}{R_{\text{кл}}}, \quad F_L = qvB; \Rightarrow R_{\text{кл}} = \frac{mv}{qB} = 2,58 \text{ (м)}.$$

$$\text{По основному закону динамики: } \frac{\Delta \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)}{\Delta t} = \vec{F}_L. \text{ Так как } v = \text{const, то}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{m\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}_L, \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{mv^2}{R_{\text{рел}}} = qvB; \quad R_{\text{рел}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{mv}{qB} = 18,3 \text{ (м)}.$$

Классический вариант неверен даже приблизительно (отличается в 7 раз)!

Глава 2. Фотоэффект. Кванты

*Человек, который никогда не ошибался,
никогда не пробовал сделать что-нибудь новое.*
Альберт Эйнштейн

§ 9. Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект)

Внешний фотоэффект – это испускание электронов из вещества под действием электромагнитного излучения.

Открытие фотоэффекта. В 1887 г. немецкий учёный Генрих Герц заметил, что электрическая искра проскакивает через разрядный промежуток при меньшей разности потенциалов U , если его освещать ультрафиолетом (рис. 1).

Последующие опыты показали, что отрицательно заряженный проводник заметно теряет свой заряд, если он освещается ультрафиолетовым излучением.

Для обнаружения фотоэффекта можно использовать электрометр с присоединенной к нему цинковой пластинкой (рис. 2), предварительно зачищенной наждачной бумагой. Пластины можно осветить электрической дугой, которая кроме инфракрасного и видимого диапазона излучает ещё и ультрафиолетовый участок спектра.



Генрих Рудольф
Герц (1857–1894)

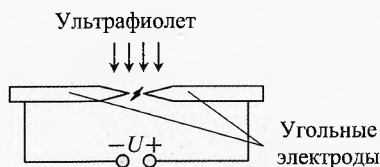


Рис. 1. Искра в разрядном промежутке

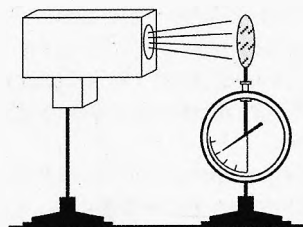


Рис. 2. Потеря отрицательного заряда при облучении ультрафиолетом

Зарядим пластинку положительно, например от стеклянной палочки, потёртой о резину или шёлк. Стрелка при этом отклонится на некоторый угол. Стрелка электрометра останется неподвижной, как при солнечном свете, так и при освещении электрической дугой.

Если же пластину зарядить отрицательно (например, эбонитовой палочкой, потёртой о шерсть), то при солнечном свете стрелка электрометра также

останется неподвижной, но, осветив пластинку дуговым разрядом, сразу заметим, что стрелка начнёт опускаться. Если дуговой разряд прекратить или повернуть в другую сторону, то стрелка перестанет опускаться. Если вновь направить ультрафиолет на пластинку, то стрелка продолжит опускаться до нуля.

При положительном заряде пластины ультрафиолет вырывает из неё электроны, но под действием электрического поля заряда пластины они возвращаются обратно, поэтому стрелка электрометра не опускается. А при отрицательном заряде на пластине вырванные электроны с удовольствием улетают, и заряд пластины уменьшается.

В 1888 г. явление фотоэффекта подробно исследовал русский физик А. Г. Столетов и разработал классический метод наблюдения этого явления, что принесло ему мировую известность.

Установка Столетова (рис. 3) представляла собой металлическую пластину C , которая освещалась через сетку лучами электрической лампы A (дуговым разрядом). Пластина и сетка были включены в цепь, содержащую гальваническую батарею B и гальванометр.

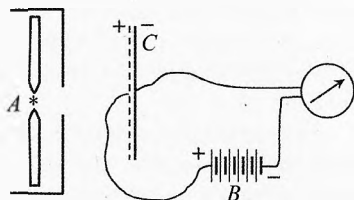


Рис. 3. Авторский рисунок Столетова

Столетов обнаружил, что фотоэффект (актиноэлектрический эффект) может иметь место даже при малых напряжениях, и установил следующие закономерности:

- 1) фототок имеет место, когда на освещаемую пластину подаётся отрицательный потенциал;
- 2) величина тока прямо пропорциональная световому потоку (закон Столетова);
- 3) существует ток насыщения;
- 4) для получения фототока нужно осветить прибор ультрафиолетовыми лучами;
- 5) фототок появляется сразу, как начинается засветка пластины.

Законы фотоэффекта. Столетовым были проведены экспериментальные исследования, которые состояли в следующем. В стеклянный сосуд помещались два электрода (рис. 4). Из него выкачивался воздух, и баллон герметизировался. Излучение поступало через кварцевое окошко, прозрачное и для ультрафиолетовых лучей. На электроды подавалась разность потенциалов, которую можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром.



Александр
Григорьевич
Столетов
(1839–1896)

Под действием излучения из освещаемого электрода (фотокатода) вылетают электроны. Если разность потенциалов между электродами равна нулю, то в цепи протекает некоторый небольшой электрический ток I_0 за счёт кинетической энергии вылетевших электронов. Если на фотокатод подать минус, а на другой электрод – плюс, то ток возрастет, ибо большая часть электронов долетит до второго электрода. При малых напряжениях между электродами и неизменном световом потоке, попадающем на фотокатод, сила фототока линейно возрастает с увеличением напряжения.

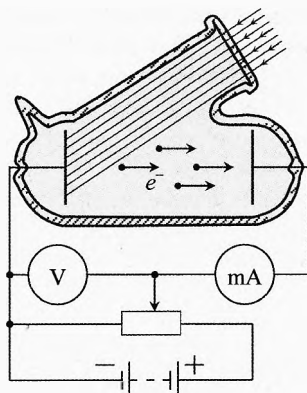


Рис. 4. Наблюдение фотоэффекта

С повышением напряжения обнаруживается, что наступает насыщение, то есть, начиная с некоторого напряжения, сила тока не увеличивается с увеличением напряжения. Это значит, что все выбитые светом электроны долетают до положительного электрода.

Если же увеличивать световой поток, падающий на фотокатод, то ток насыщения становится больше (рис. 5).

Сила тока насыщения прямо пропорциональна потоку излучения, падающему на фотокатод (закон Столетова):

$$I_n = k \cdot \Phi \quad (1)$$

где Φ – поток излучения (световой поток), выбивающий электроны из фотокатода, k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Если же фотокатод присоединить к «+» источника, а второй электрод к «-», то электрическое поле будет тормозить вылетающие электроны. При малых задерживающих напряжениях фототок будет, но меньше, чем при отсутствии напряжения между электродами. При некоторой разности потенциалов, называемой *напряжением запирания*, ток прекратится. Это объясняется тем, что даже самые быстрые электроны не могут долететь до второго электрода за счёт первоначального запаса кинетической энергии и возвращаются обратно на фотокатод.

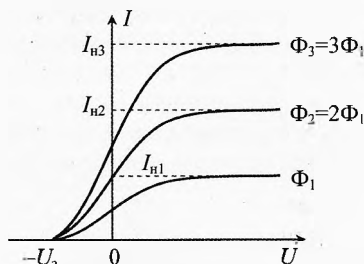


Рис. 5. Насыщение фототока

Согласно теореме о кинетической энергии, работа электрического поля (в этом случае отрицательная) уменьшает кинетическую энергию даже наиболее быстрых электронов от $\frac{mv^2}{2}$ до 0:

$$A_1 = \Delta W \Rightarrow -e \cdot U_1 = 0 - \frac{mv^2}{2} \Rightarrow \boxed{e \cdot U_1 = \frac{mv^2}{2}}$$

где U_1 – модуль запирающего напряжения, e – модуль заряда электрона.

Удивительным оказалось то, что запирающее напряжение не зависит от потока излучения, падающего на фотокатод при одном и том же спектральном составе. Хотя, казалось бы, в соответствии с волновой теорией излучения, чем больше амплитуда колебаний напряжённости электрического поля падающего излучения (при увеличении потока), тем с большей скоростью должны бы вылетать фотоэлектроны с катода.

На самом деле оказалось, что максимальная скорость фотоэлектронов, тем больше, чем выше частота излучения, падающего на катод. Объяснение этой особенности фотоэффекта дал через 17 лет Альберт Эйнштейн в 1905 г.

§ 10. Теория фотоэффекта

Эйнштейн использовал идею Планка о прерывистом испускании электромагнитного излучения (в том числе света) порциями с энергией

$$\boxed{E = h\nu}$$

Он развил идею Планка о том, что порция энергии после излучения сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем вплоть до поглощения, то есть поглощается энергия тоже порциями.

Эйнштейн применил закон сохранения энергии к явлению фотоэффекта. Энергия $E = h\nu$, поглощённая электроном, идёт на совершение работы выхода $A_{\text{в}}$ (то есть работы, которую нужно совершить для извлечения электрона из металла в вакуум) и на сообщение электрону кинетической энергии. Следовательно,

$$\boxed{h\nu = A_{\text{в}} + \frac{mv^2}{2}}$$



Альберт Эйнштейн
(1879–1955)

Это соотношение называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. Оно позволяет объяснить основные особенности фотоэффекта. Интенсивность излучения, согласно Эйнштейну, пропорциональна числу порций (квантов) энергии в потоке излучения, падающего на металл. А чем

больше порций поглощается фотокатодом в единицу времени, тем больше сила фототока.

Максимальная скорость фотоэлектронов определяется только частотой излучения и работой выхода, зависящей от рода металла и состояния его поверхности. От интенсивности света она не зависит. Ибо каждый квант поглощается индивидуально, а вероятность поглощения сразу двух квантов одним электроном маловероятна (хотя при использовании лазера это возможно).

Из уравнения Эйнштейна видно, что электрон может выйти в вакуум, если энергия поглощённого кванта больше работы выхода:

$$h\nu \geq A_{\text{в}}.$$

Поэтому для каждого вещества фотоэффект наблюдается, если частота излучения больше некоторого минимального значения ν_{\min} . Предельную частоту называют **красной границей фотоэффекта**:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{в}}}{h}.$$

Если электрон поглотит порцию энергии $E_{\min} = h\nu_{\min}$, то он может вылететь из металла со скоростью, близкой к нулю.

Работа выхода $A_{\text{в}}$ зависит от рода вещества и поверхностных плёнок, поэтому и предельная частота фотоэффекта (красная граница) для разных веществ и разных покрытий одного и того же вещества различна.

Поскольку длина волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$, то минимальной частоте соответствует максимальная длина волны, при которой наблюдается фотоэффект:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}}.$$

Для цинка красная граница соответствует длине волны $\lambda_{\max} = 0,332$ мкм (ультрафиолетовое излучение). Поэтому если на пути света, идущего от дуги к пластине, поместить обычное стекло, задерживающее ультрафиолет, то фотоэффекта не будет.

Фотоэффект может не возникнуть и без стекла, если поверхность цинковой пластины покрыта оксидом цинка, увеличивающим работу выхода. Поэтому для проведения успешного эксперимента пластину нужно предварительно зачистить наждачной бумагой.

✎ **Пример 1.** Работа выхода с чистой поверхности: меди $A_{\text{в1}} = 4,47$ эВ, железа $A_{\text{в2}} = 4,72$ эВ, цинка $A_{\text{в3}} = 3,74$ эВ, кальция $A_{\text{в4}} = 2,71$ эВ. Чему равна красная граница фотоэффекта для этих веществ?

→ **Решение.** $1 \text{ эВ} = e \cdot 1 \text{ В} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{в}}}{h}.$$

Для меди:

$$\nu_{\min} = \frac{4,47 \text{ эВ}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = \frac{4,47 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 1,08 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}}; \lambda_{1\max} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,08 \cdot 10^{15} \text{ Гц}} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 278 \text{ нм}.$$

Аналогично, можно рассчитать для других веществ. ↩

✓ **Ответ.** Красная граница фотоэффекта:

- для меди $\nu_{1\min} = 1,08 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, $\lambda_{1\max} = 278 \text{ нм}$;
- для железа $\nu_{2\min} = 1,14 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, $\lambda_{2\max} = 263 \text{ нм}$;
- для цинка $\nu_{3\min} = 0,904 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, $\lambda_{3\max} = 332 \text{ нм}$;
- для кальция $\nu_{4\min} = 0,655 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, $\lambda_{4\max} = 458 \text{ нм}$.

Примечание. Как видно из вычислений, при освещении материала видимой глазом частью спектра фотоэффект наблюдается только у кальция (причём только синим и фиолетовым цветом). А из трёх остальных легче всего наблюдать фотоэффект с поверхности чистого цинка, красная граница которого лежит в ультрафиолетовом диапазоне недалеко от фиолетовой части видимого спектра. Поэтому в описываемом выше опыте используется чистый цинк.

✂ **Пример 2.** Для определения постоянной Планка собрали цепь, показанную на рис. 6. Когда скользящий контакт потенциометра находится в крайнем левом положении, то питание от источника не подаётся, а чувствительный гальванометр при освещении фотоэлемента регистрирует слабый ток. Передвигая скользящий контакт вправо, постепенно увеличивают тормозящее напряжение до тех пор, пока ток через гальванометр не прекратится. При освещении фотоэлемента красным светом длиной волны $\lambda_1 = 0,77 \text{ мкм}$ запирающее напряжение равно $U_{31} = 0,50 \text{ В}$, а при освещении фотоэлемента фиолетовым светом длиной волны $\lambda_2 = 0,40 \text{ мкм}$, запирающее напряжение равно $U_{32} = 2,0 \text{ В}$. Какое значение постоянной Планка было получено?

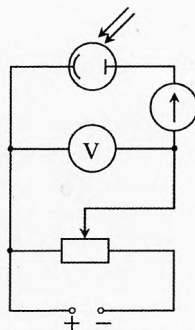


Рис. 6. Определение постоянной Планка

↩ **Решение.** При освещении светом из фотокатода вылетают электроны со скоростью v . Электрическое поле между электродами тормозит их. И при напряжении, равном запирающему U_3 , даже самые быстрые электроны ос-

танавливаются, не долетев до второго электрода, и возвращаются обратно на катод:

$$A_3 = \Delta W \quad \text{или} \quad -e \cdot U_3 = 0 - \frac{mv^2}{2} \Rightarrow e \cdot U_3 = \frac{mv^2}{2}.$$

Запишем уравнение Эйнштейна: $h\nu = A_b + \frac{mv^2}{2}.$

Учитывая, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, из трёх последних уравнений получим:

$$h \cdot \nu = A_b + e \cdot U_3 \quad \text{или} \quad h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_b + e \cdot U_3.$$

Запишем последнее уравнение для обоих случаев:

$$\left. \begin{aligned} h \cdot \frac{c}{\lambda_1} &= A_b + e \cdot U_{31} \\ h \cdot \frac{c}{\lambda_2} &= A_b + e \cdot U_{32} \end{aligned} \right\} \Rightarrow h \cdot \left(\frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} \right) = e \cdot (U_{32} - U_{31}) \Rightarrow h = \frac{e \cdot (U_{32} - U_{31}) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{c(\lambda_1 - \lambda_2)};$$

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (2,0 - 0,50) \cdot 0,77 \cdot 10^{-6} \cdot 0,40 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^8 (0,77 \cdot 10^{-6} - 0,40 \cdot 10^{-6})} \approx 6,66 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж} \cdot \text{с)}.$$

Табличное значение постоянной Планка $h = 6,6260755(40) \cdot 10^{-34}$ Дж·с близко к полученному. Для решения даже довольно строгих школьных задач рекомендуем брать значение

$$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж} \cdot \text{с)}.$$

Пример 3. На вольфрам падает излучение, длина волны которого $\lambda = 100$ нм. Какова максимальная скорость фотоэлектронов? Чему равна скорость фотоэлектрона сразу после поглощения кванта? Работа выхода из вольфрама $A_b = 4,50$ эВ.

Решение. Энергия кванта при поглощении электроном проводимости превращается в кинетическую энергию электрона. Пренебрегая начальной скоростью электрона перед поглощением кванта, получим скорость фотоэлектрона сразу после поглощения кванта (перед вылетом из металла):

$$h \cdot \nu = \frac{mv_0^2}{2}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{mv_0^2}{2} \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2h \cdot c}{\lambda \cdot m}}.$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-7} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}}} = 2,09 \cdot 10^6 \text{ м/с} = 2,09 \text{ Мм/с}.$$

Если этот фотоэлектрон поглотил квант у поверхности металла и, не потеряв энергии от взаимодействия с решеткой, сразу вылетел в вакуум, то его скорость будет максимально возможной. Вычислим её по уравнению Эйнштейна:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_{\text{в}} + \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2}{m} \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - A_{\text{в}} \right)}$$

$$v = 1,67 \cdot 10^6 \text{ м/с} = 1,67 \text{ Мм/с.}$$

$$\text{Доля потерянной скорости } \varepsilon = \frac{v_0 - v}{v_0} \approx 0,2 \text{ или } 20\%.$$

✓ **Ответ.** Максимальная скорость вылета электронов $v = 1,67 \text{ Мм/с}$. Скорость электрона проводимости сразу после поглощения кванта $v_0 = 2,09 \text{ Мм/с}$. Минимальная потеря скорости при выходе из вольфрама в вакуум составляет 20%.

Квантовый выход. Важной количественной характеристикой фотоэффекта является квантовый выход.

Квантовый выход Y – это отношение числа фотоэлектронов, вышедших с поверхности металла, к числу фотонов, упавших на поверхность за то же время.

Квантовый выход из металлов в видимой и ближайшей ультрафиолетовой областях равен $Y \leq 10^{-3}$ электронов/фотон. То есть один электрон вылетает при падении на поверхность не менее тысячи фотонов.

Столь малый выход обусловлен прежде всего малой глубиной, из которой могут выйти электроны, поглотившие фотон. Эта глубина значительно меньше, чем глубина, на которую проникают фотоны в металл до поглощения. Поэтому большинство фотоэлектронов, поглотивших фотоны, рассеивают свою энергию до подхода к поверхности и теряют возможность выйти в вакуум. При энергии фотонов вблизи порога фотоэффекта $h\nu \approx h\nu_{\text{min}}$ большинство фотоэлектронов возбуждается с энергией ниже уровня выхода в вакуум и не дают вклада в фотоэмиссионный ток. Кроме того, коэффициент отражения фотонов поверхностью металлов в видимой и ближней ультрафиолетовых областях велик. И лишь малая часть излучения поглощается в металле. Эти ограничения частично снимаются в дальней ультрафиолетовой области, где квантовый выход Y достигает значения 10^{-2} электронов/фотон при $h\nu \geq 10 \text{ эВ}$. Случайные загрязнения могут сдвинуть порог фотоэффекта в сторону более длинных волн, при этом квантовый выход в дальней ультрафиолетовой области спектра может возрасти.

§ 11. Фотоны

Испускание и поглощение электромагнитного излучения (в том числе света) происходит порциями с энергией

$$E = h\nu \quad (2)$$

Эйнштейн предложил назвать их квантами, а позже кванты назвали фотонами (от греч. *phos*, родительный падеж *photos* – «свет»).

Согласно теории относительности, энергия любой частицы определяется соотношением

$$E = mc^2. \quad (3)$$

У фотона нет массы покоя ($m_0 = 0$), то есть он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу движется со скоростью света c .

Из (2) и (3) получим:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (4)$$

Чем больше частота фотона, тем больше его масса. Наиболее массивны γ -кванты. Масса здесь является мерой энергии частицы.

Импульс фотона $p = mc$. Учитывая (4), получим:

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

Поскольку $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то импульс фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Итак, фотон (или квант электромагнитного излучения) – это частица с энергией $E = h\nu$, массой $m = \frac{h\nu}{c^2}$ и импульсом $p = \frac{h}{\lambda}$.

Удивительно, что дискретные характеристики фотона (энергия, масса и импульс) выражаются через волновые характеристики (частоту и длину волны). То есть электромагнитное излучение – это материя, в которой проявляются волновые и квантовые свойства.

Пример 4. Какова масса, энергия и импульс фотона фиолетового цвета, длина волны которого $\lambda = 400$ нм.

Решение. $p = \frac{h}{\lambda}, \quad p = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$

Энергия $E = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda},$

$$E = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot 3 \cdot 10^8 (\text{м/с})}{400 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,1 \text{ эВ}.$$

$$\text{Масса } m = \frac{E}{c^2}, \quad m = \frac{4,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} = 5,5 \cdot 10^{-36} \text{ кг}.$$

✓ **Ответ.** Масса фотона $m = 5,5 \cdot 10^{-36}$ кг, энергия $E = 3,1$ эВ, импульс $p = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.

✂ **Пример 5.** Какова частота излучения и длина волны фотона, масса которого равна массе: 1) электрона $m_1 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг; 2) протона $m_2 = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

✂ **Решение.** Из великих и простых формул Планка и Эйнштейна $E = h\nu$ и $E = mc^2$ вычислим частоту фотона: $\nu = \frac{mc^2}{h}$.

$$\text{Тогда } \nu_1 = \frac{9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 1,237 \cdot 10^{20} (\text{Гц}).$$

$$\text{Длина волны фотона } \lambda = \frac{c}{\nu}, \quad \lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{1,237 \cdot 10^{20}} = 2,42 \cdot 10^{-12} (\text{м}) = 2,42 (\text{пм}).$$

$$\nu_2 = \frac{1,6726 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 2,27 \cdot 10^{23} (\text{Гц}),$$

$$\lambda_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{2,27 \cdot 10^{23}} = 1,32 \cdot 10^{-15} (\text{м}) = 1,32 (\text{фм}).$$

Оба фотона являются гамма-квантами. ✂

✓ **Ответ.** 1) частота излучения $1,237 \cdot 10^{20}$ Гц, длина волны 2,42 пм.
2) частота $2,27 \cdot 10^{23}$ Гц, длина волны 1,32 фм.

§ 12. Люминесценция. Правило Стокса

Люминесценция. Электромагнитное излучение вещества можно разделить на два вида: тепловое (равновесное) излучение и люминесцентное (неравновесное) излучение, избыточное над тепловым излучением тех же тел. При тепловом излучении потери атомами энергии на излучение компенсируются за счёт энергии теплового движения атомов (молекул) излучающего тела. Люминесцентное же излучение представляет собой послесвечение, то есть свечение после прекращения действия возбудителя люминесценции. Люминесцентное свечение имеет длительность τ , во много раз большую периода колебаний световых волн ($\tau \gg 10^{-14}$ с).

Термин «люминесценция» происходит от лат. *luminis* – свет и *-escent* – суффикс, означающий слабое действие. То есть буквально люминесценция

означает слабое свечение. По длительности люминесценцию условно разделяют на флюоресценцию (кратковременное послесвечение) и фосфоресценцию (длительное послесвечение до десятков минут). Люминесценция объясняется испусканием света атомами (молекулами, ионами) вещества при их переходах из возбуждённого состояния с повышенной энергией в состояние с меньшей энергией.

Тепловое излучение тел в видимой части спектра становится заметным при температуре выше тысячи кельвин, а люминесцировать в видимом свете тела могут при любой, в том числе невысокой, температуре (например, светлячок). Поэтому люминесценцию часто называют холодным свечением.

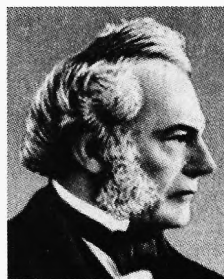
По способу возбуждения люминесценцию различают на: *ионолюминесценцию*, которая вызывается ударами ионов; *катодолюминесценцию*, возбуждаемую ударами электронов, вылетевших из катода; *радиолюминесценцию* и *рентгенолюминесценцию*, возбуждаемые радиоактивным и рентгеновским излучением; *триболюминесценцию*, возбуждаемую трением и разламыванием некоторых кристаллов; *фотолюминесценцию*, возбуждаемую видимым светом и ультрафиолетовыми лучами; *хемилюминесценцию*, возбуждаемую химическими реакциями (светлячки, бактерии, многие рыбы и др.); *электролюминесценцию*, возбуждаемую электрическим полем. А именно при разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию, электроны испытывают неупругие соударения с атомами, ионизируют и возбуждают их. Возбуждённые атомы отдают энергию в виде света.

Правило Стокса. Английский физик Дж. Г. Стокс, изучая явление люминесценции, в 1852 г. пришёл к следующему выводу.

Длина волны света, испускаемого люминесцирующим веществом, как правило, больше, чем у света, который вызвал явление фотолюминесценции (**правило Стокса**).

В квантовой оптике правило Стокса легко объясняется на основе закона сохранения энергии (Эйнштейн, 1905 г.). Действительно, согласно квантовой физике, свет состоит из фотонов частотой ν . Они несут энергию $E = h\nu$. Вещество поглощает фотоны, часть их энергии ΔE может расходоваться на различные неоптические потери из-за взаимодействия с веществом. Затем происходит переизлучение фотона с частотой ν_n , которая меньше частоты ν фотона, падающего на вещество:

$$h\nu_n = h\nu - \Delta E$$



Джордж Габриель Стокс (1819–1903)

Длина волны переизлученного фотона $\lambda_a = \frac{c}{\nu_a}$ больше длины волны λ исходного фотона:

$$\lambda_a > \lambda.$$

Те фотоны, которые сразу отражаются от поверхности вещества (то есть не люминесцируют), сохраняют свою частоту. Но иногда бывает, что частота люминесцентных фотонов больше частоты падающих на вещество, а длина волны, соответственно, меньше (антистоксовское свечение). В этом случае также происходит поглощение фотона частотой ν , но рождается фотон большей энергии. Это происходит из-за того, что фотон попадает на уже возбуждённый атом, который может излучить фотон большей частоты, переходя на основной энергетический уровень.

Применение люминесценции. Применение люминесценции обширно: спектроскопия, поляризованная люминесценция, люминесцентные методы физики твердого тела. Катодолюминесценция лежит в основе свечения экранов осциллографов, локаторов, кинескопов телевизоров и мониторов.

Подробнее расскажем только о люминесцентных лампах дневного света (ЛДС). Обычные лампы накаливания имеют малую светоотдачу (10–20 лм/Вт, или 1–1,5 кд/Вт). Значительно эффективнее лампы низкого давления в форме трубок из стекла (рис. 7), внутренняя



Рис. 7. Лампа люминесцентная

поверхность которых покрыта люминофорами. При пропускании тока по трубке атомы паров ртути возбуждаются и излучают ультрафиолет (явление люминесценции). Ультрафиолетовое излучение, падая на люминофор, вызывает люминесценцию в видимой части спектра в соответствии с правилом Стокса. Лампы дневного света в 3–4 раза экономичнее ламп накаливания, то есть на 1 Вт электроэнергии дают в 3–4 раза больше света. Но у них есть недостатки. Главный заключается в том, что при питании от переменного тока частотой 50 Гц эти лампы светятся и гаснут с частотой 100 раз в секунду. Если же их снабдить полупроводниковыми выпрямителями, то они светятся в непрерывном режиме. Дело за малым – снабдить ЛДС дешёвыми выпрямителями. Обратим внимание на то, что люминесцентные лампы сочетают два вида люминесценции: электролюминесценцию и фотолюминесценцию.

Много времени изучению люминесценции посвятил академик С. И. Вавилов. Он установил основные законы, управляющие энергетикой процесса люминесценции.



Сергей Иванович Вавилов (1891–1951)

Вавиловым и его учениками разработаны высокоэкономичные люминесцентные лампы.

Люминесцентные лампы широко применяются в освещении общественных зданий: школ, больниц, офисов и т. д., а также в местном освещении рабочих мест, световой рекламе и подсветке фасадов.

В конце 80-х гг. XX в. появились компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) (рис. 8), превосходящие по светоотдаче в 5–6 раз обычные лампы накаливания. В корпус лампы встроен пусковой механизм с системой плавного запуска. Такая лампа вкручивается в патроны E27 и E14 светильников вместо ламп накаливания. Эти лампы нагреваются значительно меньше, чем лампы накаливания. Энергосберегающие лампы КЛЛ позволяют подбирать желаемый оттенок светового потока: тёплый желтый (2700 К), тепло-белый цвет (3000 К), нормально-белый цвет (4000 К), холодный белый (5000 К), дневной белый свет (6500 К) и т.д.



Рис. 8. Компактная люминесцентная лампа

Эти лампы содержат небольшое количество (3–5 мг) ртути и требуют особой утилизации. Недостатком таких энергосберегающих ламп является их высокая стоимость по сравнению с дешёвыми лампами накаливания. Поэтому каждый решает, на чём лучше сэкономить: на покупке ламп и утилизации или на оплате электроэнергии.

§ 13. Эффект Комптона

Во второй половине XIX в. работами Максвелла, Герца и др. учёных было строго обосновано, что электромагнитное излучение (в т.ч. свет) является электромагнитными волнами. Но классическая теория электромагнитных волн не позволяла вывести теоретически законы излучения абсолютно чёрного тела. На основе волновой теории не удавалось также объяснить особенности фотоэффекта и правила Стокса. Объяснение Эйнштейна последних двух вопросов в 1905 г. за счёт введения понятия кванта света (фотона) хотя и было воспринято с интересом, но многие считали, что эти явления удастся объяснить на основе волновой теории. Эйнштейну было всего 26 лет. Он работал тогда экспертом патентного бюро, имея лишь образование Цюрихского политехникума (1900 г.).

Понятия квантов им было введено теоретически для объяснения фотоэффекта и правила Стокса. В 1921 г. за эти работы Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия.

Экспериментально же фотоны были открыты американским физиком А. Х. Комптоном при изучении рассеяния рентгеновского излучения в ве-

ществе. Он обнаружил, что при рассеянии рентгеновского излучения на углероде, алюминии, железе и др. наблюдается увеличение длины волны у рассеянного излучения.

Схематически установка Комптона изображена на рис. 9. Здесь 1 – рентгеновская трубка, 2 – свинцовые экраны с диафрагмой, пропускающей узкий пучок рентгеновского излучения, 3 и 4 – кристаллы в роли отражательных дифракционных решеток, выделяющих монохроматический пучок длиной волны λ_0 , 5 – рассеивающее вещество, 6 – кристалл в роли измерительной дифракционной решетки, 7 – ионизационная камера, регистрирующая интенсивность рентгеновского излучения. Кристалл и ионизационная камера могут поворачиваться вокруг рассеивающего образца, что позволяет измерять интенсивность излучения и длину волны при разных углах рассеяния θ .



Артур Холли
Комптон
(1892–1962)



Рис. 9. Эффект Комптона

Согласно классической электромагнитной теории рассеянное излучение должно иметь ту же частоту (и длину волны), что и падающее на вещество излучение. Действительно, излучение, падая на вещество, вызывает вынужденные колебания электронов, которые за счёт этого излучают электромагнитные волны. Частота волны меняться не должна, ибо частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, то есть частоте падающей волны.

Комптон обнаружил, что часть излучения, пройдя рассеивающее вещество, сохраняет первоначальное направление движения и длину волны λ_0 . В рассеиваемой части излучения наряду с излучением той же длины волны λ_0 наблюдается излучение и с большей длиной волны. Изменение длины волны $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ зависит только от угла рассеяния θ электронов:

$$\Delta\lambda = 2\lambda \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где $\Lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,426 \cdot 10^{-12}$ (м) – эта величина называется **комптоновской**

длиной волны. Она не зависит от свойств рассеивающего вещества.

Объяснение эффекта Комптона. Фотон упруго соударяется с «неподвижным» свободным (или слабо связанным) электроном (рис. 10). Он передаёт электрону часть своего импульса. Согласно закону сохранения импульса

$$\vec{p}_{\gamma 0} = \vec{p}_e + \vec{p}_\gamma.$$

Значит, $p_\gamma < p_{\gamma 0}$, или $\frac{h}{\lambda} < \frac{h}{\lambda_0}$, то есть $\lambda > \lambda_0$, что и наблюдалось в эксперименте.

Поскольку электроны у всех веществ одинаковы, то изменение длины волны не зависит от свойств вещества, а зависит только от угла рассеяния.



Петер Йозеф Вильгельм
Дебай (1884–1966)

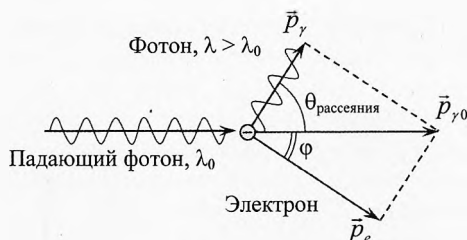


Рис. 10. Рассеяние фотона на электроне

Количественный расчёт эффекта Комптона выполнил сам Комpton и независимо от него нидерландский физик Петер Дебай в 1923 г. За открытие и объяснение эффекта Комптона, по сути, за экспериментальное открытие фотона, Комpton получил Нобелевскую премию в 1927 г.

Таким образом, после объяснения фотоэффекта Комптоном с точки зрения квантовых представлений отпали сомнения в существовании фотонов и наличии у них энергии и импульса.

Обратим внимание на то, что в рассеянном излучении наблюдаются фотоны с исходной длиной волны λ_0 и с увеличенной λ . Дело в том, что электроны не свободны, а связаны в атомах. Если фотоны обладают большой энергией по сравнению с энергией связи электронов в атоме, то электроны испытывают настолько сильную отдачу, что оказываются выбитыми из атома. В этом случае рассеяние фотонов происходит, как на свободных электронах. Если же энергия фотона недостаточна для того, чтобы вырвать электрон из атома, то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом, масса которого в десятки тысяч раз больше, чем у электрона. Поэтому фотоны отскакивают как горох от стенки, то есть без изменения энергии, модуля импульса и длины волны.

А почему увеличение длины волны не происходит для инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений?

Дело в том, что энергия связи валентных электронов с атомами ничтожно мала, по сравнению с энергией рентгеновского фотона, и эти электроны можно считать свободными. В случае фотонов оптического диапазона их энергия такого же порядка, как энергия связи электрона в атоме. Поэтому для оптических фотонов электроны являются связанными с атомами и в этом случае нужно рассматривать фотоэффект, а не эффект Комптона.

§ 14. Корпускулярно-волновой дуализм.

Волны де Бройля.

Соотношение неопределённостей

Единство корпускулярно-волновых свойств света. Природой света учёные начали активно заниматься с конца XVII века. Голландский физик Христиан Гюйгенс был сторонником волновой природы света, а английский учёный Исаак Ньютон считал, что свет – это поток частиц. До XIX века благодаря авторитету Ньютона учёные придерживались корпускулярной (от лат. *corpusculum* – частица) природы света. В XIX веке после работ Френеля, Юнга, Максвелла казалось окончательно, что свет – это электромагнитная волна. И вот в первой четверти XX века после работ Эйнштейна, Комптона, Боте и др. доказано, что свет – это поток фотонов, несущих энергию и импульс.



Христиан Гюйгенс
(1629–1695)



Исаак Ньютон
(1643–1727)



Огюстен Жан Френель
(1788–1827)

Так что же такое свет – волны или частицы? Явления интерференции, дифракции и поляризации свидетельствуют, что у света проявляются волновые свойства, особенно в больших потоках. А фотоэффект и эффект Комптона свидетельствуют о квантовых свойствах света. Таким образом, свет (электромагнитное излучение) – это вид материи, в котором проявляются волновые и квантовые свойства. Имеет место корпускулярно-волновой дуализм (двойственность).

Впервые к этому пришел Эйнштейн при изучении флуктуаций (отклонения от среднего значения) энергии в единице объема излучения абсолютно черного тела и флуктуаций светового давления. Эти величины пропорциональны друг другу, и их флуктуации должны выражаться сходными формулами. Эйнштейн вычислил значения флуктуаций, давления и плотности энергии и получил формулу, содержащую сумму двух членов. Первый «квантовый член» соответствует представлению о свете как о потоке частиц – фотонов. Второй «волновой член» описывает флуктуации в распространяющейся электромагнитной волне. Важно, что только сумма двух этих членов даёт правильное значение флуктуации энергии и светового давления. При этом на высоких частотах главную роль играет квантовый член, а на малых частотах – волновой. То есть у рентгеновских и гамма-лучей больше проявляются квантовые свойства, а у радиоволн – больше волновые.

Когда нами регистрируются усреднённые результаты достаточно мощных световых потоков за длительное время (в масштабе макромира), то дискретность электромагнитного излучения не проявляется. Мы наблюдаем непрерывную волновую картину. Если же мы регистрируем индивидуальные акты взаимодействия излучения с микрочастицами, то здесь дискретная структура излучения проявляется отчетливо – отдельный фотон взаимодействует с одной частицей вещества, например с электроном. А другие пролетают мимо.



Джеймс Клерк
Максвелл (1831–1879)



Томас Юнг
(1773–1829)



Луи де Бройль
(1892–1987)

Волны де Бройля. Французский физик Луи де Бройль высказал в 1924 г. гипотезу о том, что сочетание волновых и квантовых свойств является общим для любых материальных объектов, а не только фотонов. Это значит, что любое тело массой m , движущееся со скоростью v , может быть охарактеризовано не только координатами, импульсом или энергией, но и длиной волны и частотой. По де Бройлю длина волны любого объекта связана с его импульсом так же, как длина волны фотона с его импульсом

$$\lambda_{\phi} = \frac{h}{p}.$$

Значит, для частиц вещества **длина волны Бройля:**

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{p}, \quad \lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv}.$$

Волновые свойства электронов были обнаружены учёными в 1927 г. на опытах по дифракции электронов.

✎ **Пример 6.** Электрон в невозбуждённом состоянии атома водорода вращается со скоростью $v = 2,19$ Мм/с. Вычислить длину волны де Бройля для этого электрона.

➔ **Решение.** $\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{m_e v}$, $\lambda_{\text{Б}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 2,19 \cdot 10^6 \text{ м/с}} = 3,32 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3,32 \text{ \AA}.$

Интересно отметить, что длина волны де Бройля для такого электрона равна длине окружности его орбиты. ➔

✓ **Ответ.** Длина волны де Бройля этого электрона $3,32 \text{ \AA}.$

Соотношение неопределённостей Гейзенберга.

Обнаружение волновых свойств частиц привело к открытию фундаментального закона, управляющего явлениями микромира – соотношение неопределённостей. Его открыл в 1927 г. немецкий физик В. К. Гейзенберг.

Рассмотрим дифракцию моноэнергетического параллельного пучка частиц на щели шириной a (рис. 11). На экране в результате дифракции частиц образуется полоска с неравномерным распределением прошедших частиц с максимумом в центре отверстия. Можно считать, что большинство частиц попадут после прохождения щели на экран между центральным максимумом и первым минимумом по обе стороны от него.

Положение первого дифракционного минимума от одной щели на экране определяется условием:

$$a \cdot \sin \varphi = \lambda. \quad (5)$$

Частице импульсом p соответствует длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует:

$$a \cdot \sin \varphi = \frac{h}{p}. \quad (7)$$

Отклонение частицы в результате дифракции свидетельствует об изменении её импульса, которое найдём по углу отклонения:

$$\Delta p_x = p \cdot \sin \varphi. \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует:

$$a \Delta p_x = h. \quad (9)$$



Вернер Карл
Гейзенберг
(1901–1976)

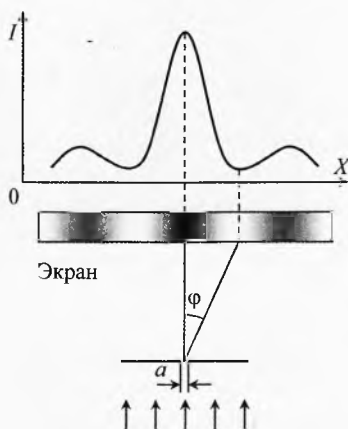


Рис. 11. Дифракция на щели

Таким образом, если частица с первоначальным точно известным импульсом p прошла через щель шириной a , то положение её в пространстве (координата x) было определено с точностью

$$\Delta x = a. \quad (10)$$

В этом случае сведения об импульсе частицы становятся менее определёнными. Неопределённости импульса Δp_x и координаты Δx , как видно из (9) и (10), связаны соотношением:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h. \quad (11)$$

Выражение (11) называется соотношением неопределённостей.

Чем точнее определена координата частицы ($\Delta x \rightarrow 0$), тем менее определённым становится её импульс. И наоборот, чем точнее определен импульс частицы ($\Delta p_x \rightarrow 0$), тем менее точно можно определить её положение x .

Более точное выражение для *соотношения неопределённостей Гейзенберга* имеет вид:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar, \quad (12)$$

где *аш с чертой* $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34}$ (Дж·с) – постоянная Дирака или приведённая постоянная Планка, Δx и Δp_x – среднеквадратичные отклонения координаты и импульса от наиболее вероятного значения.

Важно, что соотношение неопределённостей не связано с несовершенством применяемых измерительных приборов, а отражает особенности физической природы объектов микромира.

Наряду с выражением, связывающим неопределённость координаты и импульса, можно получить выражение, связывающее неопределённость энергии ΔE и времени Δt . Для фотона, излученного атомом, неопределённость импульса Δp_x и координаты Δx равны:

$$\Delta p_x = \frac{\Delta E}{c}, \quad \Delta x = c \cdot \Delta t.$$

Перемножив эти равенства и сравнив с (12), получим:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

Чем меньше неопределённость значения энергии ΔE системы в некотором состоянии с энергией E , тем больше неопределённость времени Δt пребывания системы в данном состоянии.

§ 15. Световое давление

Под световым давлением понимается давление, оказываемое на поверхность всем спектром падающего на неё электромагнитного излучения.

Объяснение светового давления на основе волновой теории. Пусть на металлическую поверхность падает нормально электромагнитная волна (рис. 12). Пусть в начальный момент вектор напряжённости \vec{E} направлен вверх, а вектор магнитной индукции \vec{B} – к нам. Электрическое поле \vec{E} волны заставляет двигаться электроны вниз. Магнитное поле \vec{B} волны действует на электрон силой Лоренца (согласно правилу левой руки) в направлении распространения волны. Когда векторы \vec{E} и \vec{B} одновременно поменяют направление на противоположные, то поле \vec{E} будет заставлять электрон двигаться вверх, а магнитное поле \vec{B} – снова вдоль направления распространения волны, то есть в прежнем направлении. Совокупное действие волны на все электроны создаёт силу давления. Разделив эту силу на площадь поверхности, получим давление.

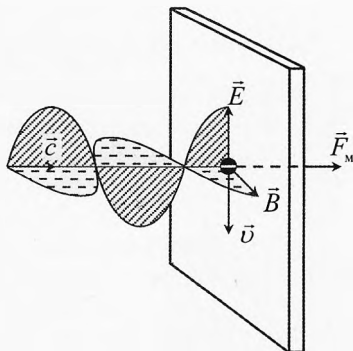


Рис. 12. Электромагнитная волна

Максвелл доказал, что давление электромагнитной волны равно

$$p = (1 + R) \cdot w, \quad (13)$$

где w – средняя объёмная плотность энергии волны, R – коэффициент отражения, равный части энергии волны отражаемой поверхностью. Если волна полностью поглощается (абсолютно чёрное тело), то $R_{\text{лчт}} = 0$, так как $R_{\text{лчт}} = 0$. Если же волна полностью отражается, то $R = 1$, тогда $p = 2w$.

Опыты Лебедева. Вывод Максвелла о наличии светового давления был встречен с недоверием многими учёными. Но, как известно, критерием истины является практика. В 1890 г. русский физик-экспериментатор П. Н. Лебедев провёл решающие эксперименты по обнаружению светового давления на твердые тела, а в 1910 г. обнаружил давление на газы.

Прибор Лебедева представляет собой очень чувствительный крутильные весы (рис. 13)*. Основная деталь весов – лёгкая рамка с укрепленными на ней «крылышками» (светлыми и чёрными дисками толщиной от 0,1 до 0,01 мм). Так как давление на чёрные крылышки значительно меньше, чем на белые (примерно в 1,5 раза), то на рамку действует вращающий момент,

* Обратим внимание на то, что с помощью крутильных весов был открыт закон Кулона и измерена гравитационная постоянная.

который измеряется по углу закручивания нити. Поток падающей энергии Лебедев измерял с помощью миниатюрного калориметра (направлял поток света в калориметр на некоторое время и измерял повышение температуры). Свет падал на крылышки, расположенные только по одну сторону от оси вращения.

Трудности точного измерения давления света обусловлены невозможностью выкачать весь воздух, из-за чего возникают дополнительные вращающие моменты со стороны ударов оставшихся молекул, по-разному действующие на темные и светлые крылышки. Лебедев сумел преодолеть трудности. Варьируя размеры сосуда и толщину крылышек, он измерил световое давление, и пришел к выводу, что в пределах погрешностей измерений давление света, полученное в эксперименте, согласуется с формулой, полученной Максвеллом.

Опыты Лебедева сыграли важную роль в утверждении идей Максвелла, в частности его вывода, что свет – это электромагнитная волна. Опыты Лебедева вошли в историю физики, как классический пример тонкого физического эксперимента.

Перед входом в здание физфака МГУ слева и справа по краям лестницы находятся скульптурные портреты А. Г. Столетова и П. Н. Лебедева как дань уважения их вкладу в развитие физики.

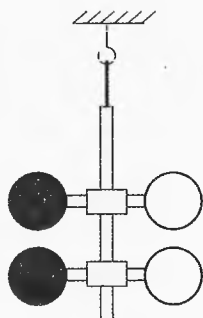


Рис. 13. Прибор Лебедева



Пётр Николаевич
Лебедев (1866–1912)

Квантовая теория светового давления. Согласно Эйнштейну, свет – это поток частиц – квантов света (фотонов), летящих со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в вакууме. Импульс фотона $p_\phi = \frac{h\nu}{c}$. У фотона нет массы покоя. При отражении он остается фотоном, а при поглощении электроном передаёт свою энергию и импульс электрону.

Пусть на поверхность какого-либо тела падает нормально параллельный пучок фотонов, объёмная концентрация которых n . Давление, испытываемое поверхностью,

$$p = \frac{F}{S},$$

где F – средняя сила, приложенная к поверхности со стороны потока фотонов. Поскольку импульс силы, полученный поверхностью за время Δt (которое значительно больше времени одного удара), равен по модулю суммарному изменению импульса фотонов, можем записать: $F \cdot \Delta t = |\Delta \vec{p}_\phi| \cdot N$, где $N = n \cdot V = n \cdot S \cdot c \cdot \Delta t$ – число фотонов, долетевших за время Δt . Итак,

$$F \cdot \Delta t = |\Delta \vec{p}_\phi| \cdot n \cdot S \cdot c \cdot \Delta t.$$

Тогда давление света:

$$p = |\Delta \vec{p}_\phi| \cdot n \cdot c.$$

Рассмотрим частные случаи.

1. Если поток фотонов полностью поглощается (АЧТ), то изменение импульса одного фотона $|\Delta \vec{p}_{\phi 1}| = p_{\phi 0} = \frac{h\nu}{c}$, и давление света равно:

$$\boxed{p_{\text{АЧТ}} = h\nu \cdot n} \quad \text{или} \quad \boxed{p_{\text{АЧТ}} = w},$$

где $w = \frac{E}{V} = \frac{E_\phi \cdot N}{V} = E_\phi \cdot n = h\nu \cdot n$ – средняя объёмная плотность энергии потока фотонов.

|| То есть в случае полного поглощения давление, оказываемое нормальным потоком света, равно объёмной плотности энергии этого потока.

2. Если поток фотонов испытывает полное отражение (зеркальное отражение), то изменение импульса фотона равно двойному значению импульса падающего фотона (во-первых, его останавливают, во-вторых, отбрасывают назад): $|\Delta \vec{p}_{\phi 2}| = 2p_{\phi 0} = 2 \cdot \frac{h\nu}{c}$. Давление в этом случае вдвое больше

$$\boxed{p_{\text{зерк}} = 2h\nu \cdot n} \quad \text{или} \quad \boxed{p_{\text{зерк}} = 2w}.$$

3. Отражённая доля фотонов A называется альбедо (от лат. *albedo* – белизна, от лат. *albus* – белый, светлый) или коэффициент отражения.

Если часть фотонов отражается: $A = \frac{N_{\text{отр}}}{N}$, а остальные поглощаются, то у фотонов поглощённой части потока импульс изменяется по модулю на $p_{\phi 0} = \frac{h\nu}{c}$, у отражённых – на $2p_{\phi 0} = 2 \cdot \frac{h\nu}{c}$. Значит, давление на «серую» поверхность:

$$p_{\text{сер}} = p_{\text{погл}} + p_{\text{отраж}} = (1 - A) \cdot h\nu \cdot n + A \cdot 2h\nu \cdot n = (1 + A) \cdot h\nu \cdot n.$$

Итак, для «серой» поверхности

$$\boxed{p_{\text{сер}} = (1 + A) \cdot h\nu \cdot n} \quad \text{или} \quad \boxed{p = (1 + A) \cdot w}. \quad (14)$$

Последнее выражение охватывает все три случая. Как видим выражение (13) для светового давления, полученное Максвеллом, который рассматривал свет как электромагнитные волны, совпадает с выражением (14) для давления света, если рассматривать его как поток частиц – фотонов.

✎ **Пример 7.** Солнечная постоянная (средняя плотность потока энергии, падающего от Солнца на Землю) $j = 1,36 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$. Вычислить максимальное давление солнечного излучения на Землю и Луну, если средний коэффициент отражения (альбедо) земной поверхности $A_3 = 0,4$, а лунной – $A_л = 0,09$.

→ **Решение.** Получим сначала связь объёмной плотности энергии излучения w с плотностью потока излучения j .

Плотность потока излучения равна отношению энергии потока W к нормальной площади (поперечного сечения), через которую он проходит, и времени прохождения через это сечение:

$$j = \frac{W}{S_{\perp} \cdot \Delta t}.$$

Объёмная плотность энергии равна:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{W}{S \cdot c \cdot \Delta t}.$$

Значит, плотность потока излучения равна произведению объёмной плотности энергии и скорости распространения волны:

$$j = w \cdot c.$$

Если подставить последнее выражение в (14), получим:

$$p = (1 + A) \cdot \frac{j}{c}.$$

Максимальное давление солнечного излучения на земную поверхность:

$$p_3 = (1 + 0,4) \cdot \frac{1,36 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} = 6,3 \text{ мкПа}.$$

Аналогично максимальное давление на лунную поверхность:

$$p_л = (1 + 0,09) \cdot \frac{1,36 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} = 4,9 \text{ мкПа}.$$

Обратим внимание на то, какое маленькое давление оказывает солнечное излучение на Землю. И как непросто было П. Н. Лебедеву его измерить. ←

✓ **Ответ.** Максимальное давление солнечного излучения на Землю равно $p_3 = 6,3 \text{ мкПа}$, на Луну – $p_л = 4,9 \text{ мкПа}$.

✎ **Пример 8.** Чему равна сила давления на Землю, обусловленная электромагнитным излучением Солнца? Радиус Земли $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$.

→ **Решение.** Сила давления равна произведению давления и площади поперечного сечения Земли: $F = p \cdot S = p \cdot \pi R^2$.

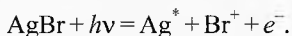
$$F = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot 3,14 \cdot (6,37 \cdot 10^6 \text{ м})^2 = 8 \cdot 10^8 \text{ Н} = 800 \text{ МН}. \curvearrowright$$

✓ **Ответ.** Земля испытывает силу отталкивания со стороны электромагнитного излучения Солнца, равную 800 миллионов ньютон. Кроме электромагнитного излучения на Землю давит солнечный ветер – поток частиц из Солнечной атмосферы, летящих со скоростью 500–1000 км/с. Давление солнечного ветра в 1000 раз меньше давления фотонов на Землю.

§ 16. Химическое действие света

Фотохимические реакции. Фотография. Возьмём негатив отснятой некогда фотоплёнки. Организуем в комнате только свет от красного фонаря. Положим под плёнку фотобумагу и на короткое время включим белый свет. Под светлыми участками фотоплёнки фотобумага несколько потемнеет из-за действия света. Если же её поместить в ванночку с проявителем, то увидим романтическую картину: на фотобумаге постепенно появится позитивное изображение, снятого на плёнку объекта.

Чувствительный слой чёрно-белой фотобумаги состоит из кристалликов бромида серебра (AgBr), вкрапленных в желатин. При поглощении фотона с энергией $E = h\nu$ молекулы бромида серебра распадаются по схеме:

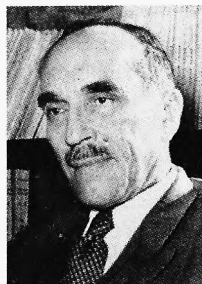


Здесь Ag^* – возбуждённый атом серебра, Br^+ – положительный ион брома, e^- – электрон. Под действием проявителя бром растворяется, а оставшиеся атомы серебра дают на фотобумаге негативное (относительно плёнки) изображение, то есть позитивное относительно сфотографированного объекта.

После проявления фотобумагу нужно промыть в чистой воде и поместить в закрепитель, который растворяет непрореагировавший бромид серебра.

Возбуждённые под действием света атомы, молекулы или их части называются активными радикалами. При их участии протекают различные химические реакции. Например, молекулы хлора и водорода в темноте не взаимодействуют, а на свету вступают в реакцию, образуя хлороводород HCl .

Разрыв электронных связей в молекулах при поглощении фотона является фотохимической реакцией, например, $\text{H}_2 + h\nu = \text{H}^* + \text{H}$. Затем идут вторичные химические реакции, которые представляют собой цепь последовательных превращений. Такие реакции распространены в природе и химическом производстве. Они протекают в процессах горения и взрыва. Советский физик Н. Н. Семёнов выполнил фундаментальные работы в области химической кинетики горения и



Николай Николаевич Семёнов (1896–1986)

взрыва. Он открыл разветвлённые цепные химические реакции и построил общую теорию: разветвлённых, вырожденно-неразветвлённых и неразветвлённых цепных реакций, за что награжден Нобелевской премией по химии за 1956 г. и Ленинской премией в 1976 г.

Фотохимические законы. На основе фотонной структуры электромагнитного излучения Эйнштейн сформулировал в 1912 г. два закона.

Каждый поглощённый веществом фотон вызывает превращение одной молекулы.

Это основной закон фотохимии.

Молекула вступает в химическую реакцию под действием фотона лишь в случае, когда энергия фотона не меньше необходимой для разрыва молекулярной связи (энергии диссоциации).

Если энергия фотона больше энергии диссоциации, то её избыток достаётся продуктам распада молекул, то есть активным радикалам.

При классической (нецифровой) фотографии приходится проявлять плёнки и фотокарточки при красном свете фонаря. Для чего такая романтика? Дело в том, что фотоны красной части спектра не реагируют (не вступают в реакцию) с бромидом серебра, так как их энергия недостаточна, а глаз видит и при красном свете. Кстати, для фотографирования в темноте (в инфракрасных лучах) создается специальная фотоплёнка, где в чувствительный слой вносятся специальные добавки (активаторы), снижающие энергетический порог фотохимической реакции.

Фотосинтез углеводов. Важнейшая для жизни на Земле фотохимическая реакция – фотосинтез углеводов в зеленых листьях растений. Процесс этот очень сложен, он связан с множеством вторичных биохимических реакций. В учебнике биохимии последовательная запись реакций фотосинтеза занимает несколько страниц!

Листья поглощают из воздуха углекислый газ, а корни извлекают из земли воду и различные химические элементы. Как установил русский биолог К. А. Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красного света происходит фотосинтез.

За счёт поглощения примерно трёх фотонов красного цвета длиной волны около 0,6 мкм молекула хлорофилла приходит в возбуждённое состояние и, реагируя с молекулой воды, разлагает её на водород и кислород, который выделяется в атмосферу, а атомарный водород присоединяется к оксиду углерода CO_2 , вследствие чего синтезируются углеводы, из которых затем строятся жиры, белки и другие части организмов



Климент Аркадьевич
Тимирязев
(1843–1920)

по очень длинной цепи (то есть в атмосферу уходит не тот кислород, который входит в состав углекислого газа, поглощаемого листьями, а тот, который входит в состав воды).

Фотосинтез – основа жизни на Земле. Только благодаря ему органический мир пополняет за счёт излучения Солнца внутреннюю энергию, расходуемую в процессе жизнедеятельности. По современным представлениям почти весь кислород в атмосфере Земли образовался и поддерживается на стабильном уровне за счёт фотосинтеза планктона (водорослей) и листьев растений. В атмосферах других планет Солнечной системы почти нет свободного кислорода, что согласуется с фактом отсутствия там органической жизни.

§ 17. Применение фотоэффекта

Вакуумные фотоэлементы. Фотоэффект широко применяют в технике. На основе внешнего фотоэффекта работают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянный баллон, в котором создан глубокий вакуум (рис. 14). Половину баллона покрывают тонким слоем серебра (это подложка), на который напыляют светочувствительный слой из оксида бария или соединения сурьмы с цезием и т. п. Этот электрод служит катодом. В центре фотоэлемента помещают анод в виде кольца или цилиндра.

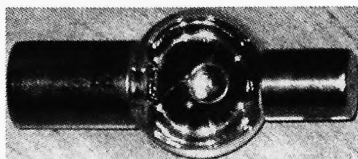


Рис. 14. Вакуумный фотоэлемент

Если включить фотоэлемент в цепь и осветить катод, то из него вылетают электроны и ток в цепи потечёт. А так как сила тока пропорциональна потоку падающего на катод излучения (закон Столетова), то колебания освещённости катода вызывают соответствующие колебания силы тока в цепи.

Сила тока в вакуумных фотоэлементах мала. Для усиления тока иногда используют ударную ионизацию газа (несамостоятельный разряд). С этой целью баллон заполняют инертным газом (чаще всего аргоном) под низким давлением 1–10 Па. За счёт ударной ионизации сила тока возрастает в десятки раз.

Вакуумные фотоэлементы применяют в схемах световой сигнализации, а также в кино для воспроизведения звука, записанного на киноплёнке.

Полупроводниковые фотоэлементы. Освещение полупроводниковых элементов может привести к появлению в них дополнительных носителей тока, концентрация которых порой во много раз превышает концентрацию собственных носителей тока (электронов и дырок). Дополнительные носители тока образуются, если энергия поглощённых фотонов больше энергии ковалентной связи. Проводимость, обусловленная ими, называется фотопроводимостью.

*Проводимость полупроводника, обусловленная образованием дополнительных носителей тока благодаря освещению, называют **внутренним фотоэффектом**, так как образовавшиеся заряженные частицы не выходят за пределы полупроводника.*

Если прекратить освещение полупроводника, то электроны рекомбинируют с дырками, и ток быстро прекращается.

На практике используются полупроводниковые фотоэлементы, работающие не только на видимом свете, но и в инфракрасном диапазоне (причём как в ближней, так и в дальней областях инфракрасного диапазона). Инфракрасное излучение тел существует при любых, даже низких, температурах и может быть обнаружено полупроводниковыми фотоэлементами, реагирующими на инфракрасное излучение, в том числе на очень слабые потоки. Такие фотоэлементы называют болометрами. Порог их чувствительности до 10 пВт (10^{-11} Вт).

Фоторезисторы. На явлении фотопроводимости, или внутреннего фотоэффекта, основано устройство и действие фоторезисторов. Простейший фоторезистор – это стеклянная пластинка, на которую нанесён тонкий слой полупроводника и укреплены токопроводящие электроды. Всё это покрыто прозрачным лаком. Недостатком фоторезисторов является зависимость их сопротивления от температуры. Для создания фоторезисторов, работающих в диапазоне видимого излучения (света), применяют сульфид кадмия и сульфид таллия, а в инфракрасной области – селенид и теллурид свинца.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (в отличие от вакуумных с внешним фотоэффектом) инерционны. Фототок не сразу достигает максимума в начале засветки и не сразу спадает до темнового тока после прекращения освещения. Зато полупроводниковые фотоэлементы механически прочны и высокочувствительны к различным областям спектра.

Вентильные фотоэлементы, солнечные батареи. Важнейшее практическое применение фотопроводимости нашли вентильные фотоэлементы с запирающим слоем. Они представляют собой две соприкасающиеся друг с другом пластинки, изготовленные из металла и его оксида (например, из меди и оксида меди). Граничный слой между металлом и оксидной плёнкой обладает выпрямляющим свойством (*p-n*-переход), при этом электроны могут проходить лишь в направлении от оксида металла к металлу.

Медная пластинка, служащая одним из электродов, покрывается тонким слоем окиси меди Cu_2O (полупроводник). На окись меди наносится прозрачный слой металла (например, золото), который служит вторым электродом (рис. 15). Если фотоэлемент осветить, то между элек-

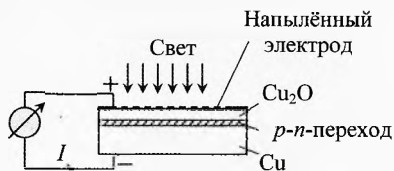


Рис. 15. Вентильный фотоэлемент

тромами возникнет фото-ЭДС, а при замыкании электродов, в электрической цепи пойдет ток, мощность которого зависит от светового потока.

Таким образом, вентильный фотоэлемент является устройством, которое превращает энергию световой волны в энергию электрического тока.

Вентильные фотоэлементы являются основной частью люксметров – приборов для измерения освещенности, а также фотоэкспонетров.

Такие источники тока используются в солнечных батареях на всех космических кораблях. Всё больше вентильные фотоэлементы используются и в быту для выработки электроэнергии (рис. 16). Например, при подъезде к г. Барселоне можно увидеть самую крупную в Европе батарею солнечных элементов, длина панелей которой составляет около 100 м, а ширина – более 10 м.

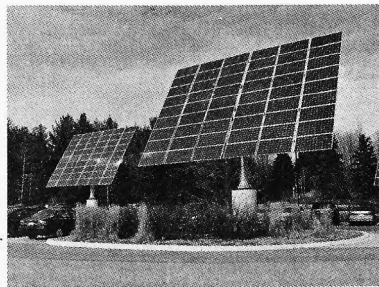
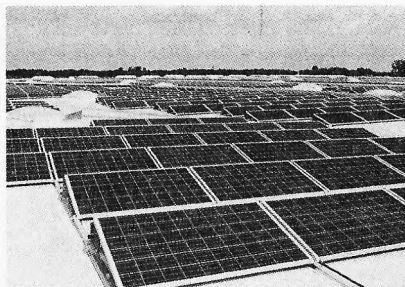


Рис. 16. Солнечные батареи



Упражнения

1 Необходимо увеличить энергию испускаемых фотонов световой волны в 1,5 раза. Как для этого нужно изменить частоту световой волны?

2 Для опыта по фотоэффекту взяли фотопластинку из металла с работой выхода $A_v = 3,4 \cdot 10^{-19}$ Дж и стали освещать её светом частоты $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Гц. Затем частоту уменьшили в 2 раза, одновременно увеличив в 1,5 раза число фотонов, падающих на фотопластинку за 1 с. Как изменилось число фотоэлектронов, покидающих пластину за 1 с?

3 Металлическая пластинка освещается светом с длиной волны $\lambda = 400$ нм. Определить отношение максимальной кинетической энергии фотоэлектронов к работе выхода для этого металла, если красная граница фотоэффекта для металла пластинки $\lambda_{кр} = 600$ нм.

4 Металлическая пластинка освещается ультрафиолетом с частотой $\nu = 10^{15}$ Гц. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, если работа выхода $A_v = 3,11$ эВ.

5 Определить максимальную скорость фотоэлектронов при освещении металлической пластины светом длиной волны $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м, если красная граница фотоэффекта $\lambda_{\text{кр}} = 540$ нм?

6 С катода фотоэлемента под действием света вылетают электроны в северном направлении и попадают в электрическое и магнитное поле. Электрическое поле напряжённостью $E = 300$ В/м направлено на запад, а магнитная индукция $B = 10^{-3}$ Тл – вертикально вверх. Определить частоту падающего света, если в момент попадания самых быстрых электронов в область полей действующая на них сила направлена на запад? Работа выхода для вещества катода $A_{\text{в}} = 2,39$ эВ.

7 Определить наименьшую разность потенциалов между катодом и анодом (запирающее напряжение), необходимую для полной остановки фотоэлектронов, вылетающих из катода, освещаемого ультрафиолетом длиной волны $\lambda = 200$ нм. Работа выхода электрона $A_{\text{в}} = 4$ эВ.

8 Фотокатод облучается ультрафиолетом длиной волны $\lambda = 300$ нм. Красная граница фотоэффекта для катода $\lambda_0 = 450$ нм. Какое запирающее напряжение нужно подать между катодом и анодом, чтобы фототок прекратился?

9 Поверхность фотокатода освещают светом частоты $\nu = 0,75 \cdot 10^{15}$ Гц. Определить длину волны для красной границы фотоэффекта, если при увеличении в 2 раза частоты света, падающего на поверхность металла, запирающее напряжение для фотоэлектронов увеличилось в 3 раза.

10 Кинетическая энергия одного протона в 9 раз превышает кинетическую энергию другого протона. Определить отношение длины волны де Бройля первого протона к длине волны де Бройля второго протона. Считать, что скорости протонов малы по сравнению со скоростью света.

11 Построить график зависимости кинетической энергии фотоэлектрона от частоты света и длины волны для натрия. Работы выхода электрона из натрия равна $A_{\text{в}} = 2,35$ эВ.

12 Определить кинетическую энергию и скорость фотоэлектронов, вылетающих из катода, изготовленного из оксида бария при его освещении зеленым светом с длиной волны $\lambda = 550$ нм. Работа выхода электрона равна $A_{\text{в}} = 1,2$ эВ.

13 На неизвестный металл падает гамма-излучение с длиной волны $\lambda = 40$ нм. Оценить скорость фотоэлектронов.

14 Специальные активированные фотоплёнки характеризуются энергией диссоциации молекул около $E = 1,3$ эВ. Будет ли такая фотоплёнка работать в инфракрасном диапазоне излучений с длиной волны $\lambda = 800$ нм? Какова граница фотохимической реакции?

15 Рентгеновский фотон испытывает центральное соударение с покоящимся электроном. Определить энергию фотона отдачи, если энергия фотона до соударения равна $E_0 = 50$ кэВ.

16 Угол рассеяния фотона в эффекте Комптона $\theta = 90^\circ$, угол отдачи изначально покоящегося электрона $\phi = 30^\circ$. Определить энергию фотона до рассеяния.

17 Определить длину волны де Бройля для атома водорода, движущегося со среднеквадратичной скоростью при температуре 10^3 К.

18 Время жизни электрона на втором энергетическом уровне атома водорода составляет около $\tau = 10^{-9}$ с. Оценить ширину второго энергетического уровня (то есть неопределённость его энергии). Сравнить его со значением энергии второго энергетического уровня атома водорода.

Решения, указания и ответы для самоконтроля

1 $E = h\nu$. Увеличить в 1,5 раза.

2 Энергия фотонов $E_\phi = h \cdot (\nu/2) = 2 \cdot 10^{-19}$ Дж станет меньше работы выхода: $E_\phi < A_b$, поэтому фотоэлектроны больше не будут вылетать из пластины.

3 $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_b + E_k$, $h \cdot \frac{c}{\lambda_{кр}} = A_b$; $\Rightarrow E_k = hc \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{кр}} \right)$, $\Rightarrow \frac{E_k}{A_b} = \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} - 1 = 0,5$.

4 $h\nu = A_b + \frac{m\nu^2}{2} \Rightarrow \nu = \sqrt{\frac{2(h\nu - A_b)}{m}} = 6,0 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}$.

5 $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_b + \frac{m\nu^2}{2}$, $h \cdot \frac{c}{\lambda_{кр}} = A_b + 0$; $\Rightarrow \nu = \sqrt{\frac{2hc}{m} \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{кр}} \right)} = 8 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}$.

6 $F_M = qvB$ направлена на запад, $F_3 = qE$ направлена на восток (рис. 17). Значит, должно выполняться условие:

$F_M > F_3 \Rightarrow v > \frac{E}{B}$. Уравнение Эйнштейна: $h\nu = A_b + \frac{m\nu^2}{2}$.

Значит, $v > \frac{1}{h} \left(A_b + \frac{mE^2}{2B^2} \right)$, $v > 6,4 \cdot 10^{14}$ Гц.

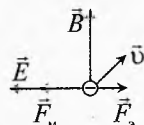


Рис. 17. Электрон в электромагнитном поле

7 $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_b + \frac{m\nu^2}{2}$, $-eU_3 = 0 - \frac{m\nu^2}{2}$; $\Rightarrow U_3 = \frac{1}{e} \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - A_b \right) = 2,2 \text{ (В)}$.

8 $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_b + \frac{m\nu^2}{2}$, $h \cdot \frac{c}{\lambda_0} = A_b$, $\frac{m\nu^2}{2} = eU_3$; $\Rightarrow U_3 = \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) = 1,38 \text{ (В)}$.

9 $h\nu = A_b + eU_3$, $h2\nu = A_b + e3U_3$, $A_b = h \cdot \frac{c}{\lambda_{кр}}$; $\Rightarrow \lambda_{кр} = \frac{2c}{\nu} = 800 \text{ (нм)}$.

10 $\frac{m\nu_A^2}{2} = 9 \cdot \frac{m\nu_B^2}{2}$, $\lambda_A = \frac{h}{m\nu_A}$, $\lambda_B = \frac{h}{m\nu_B}$, $\Rightarrow \frac{\lambda_A}{\lambda_B} = \frac{1}{3}$.

11 См. рис. 18. $E_k = h\nu - A_b$, $\nu_{\min} = \frac{A_b}{h} = 5,67 \cdot 10^{14} \text{ (Гц)}$. $E_k = h \cdot \frac{c}{\lambda} - A_b$,

$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = 529 \text{ (нм)}$.

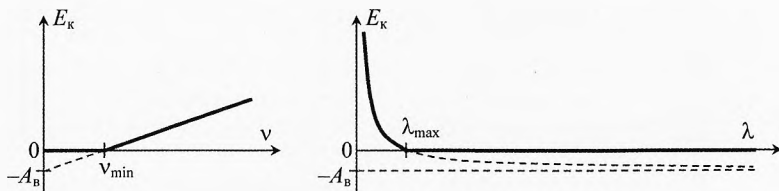


Рис. 18. Кинетическая энергия фотоэлектрона

$$\mathbf{12} \quad E_k = h \cdot \frac{c}{\lambda} - A_b = 1,69 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}. E_k = \frac{mv^2}{2}, \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = 610 \text{ (км/с)}.$$

$$\mathbf{13} \quad E_\gamma = A_b + \frac{mv^2}{2}, E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} = 31 \text{ (эВ)}, A_b < E_\gamma; v \approx \sqrt{\frac{2hc}{m\lambda}} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ (м/с)}.$$

$$\mathbf{14} \quad E = \frac{hc}{\lambda_{\max}} \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{hc}{E} = 956 \text{ (нм)}. \text{ Плёнка будет работать.}$$

$$\mathbf{15} \quad \text{Так как } \theta = \pi, \text{ то по уравнению для эффекта Комптона:} \\ \Delta\lambda = 2\lambda \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = 2\lambda; \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, E_0 = \frac{hc}{\lambda_0}, E = \frac{hc}{\lambda}; \Rightarrow E = \frac{hc}{2\lambda + hc/E_0} \approx 42 \text{ (кэВ)}.$$

$$\mathbf{16} \quad 0 = p_\gamma \cdot \sin\theta - p_e \cdot \sin\varphi, p_{\gamma 0} = p_\gamma \cdot \cos\theta + p_e \cdot \cos\varphi, E_{\gamma 0} = p_{\gamma 0} \cdot c, E_\gamma = p_\gamma \cdot c. \text{ Формула} \\ \text{для эффекта Комптона: } \lambda - \lambda_0 = 2 \cdot \frac{h}{m_e c} \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right); E_{\gamma 0} = \frac{hc}{\lambda_0}, E_\gamma = \frac{hc}{\lambda};$$

$$\Rightarrow E_{\gamma 0} = \frac{m_e c^2 (\cos\theta + \sin\theta / \tan\varphi - 1)}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} = m_e c^2 \cdot \left(\frac{1}{\tan\varphi} - 1\right) = 375 \text{ (кэВ)}.$$

$$\mathbf{17} \quad \lambda = \frac{h}{p}, p = m_0 \cdot v, \frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT; \Rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{3km_0 T}} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ (м)}.$$

$$\mathbf{18} \quad \Delta E \tau = \hbar, \Delta E = \frac{\hbar}{\tau} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ (эВ)}. E_2 = \frac{E_1}{2^2} = \frac{13,6 \text{ эВ}}{4} = 3,4 \text{ (эВ)}, \frac{\Delta E}{E_2} \approx 2 \cdot 10^{-7}.$$

Глава 3. Физика атома

*Очень важно не перестать задавать вопросы.
Любопытство не случайно дано человеку.*

Альберт Эйнштейн

§ 18. Начало развития теории строения атома

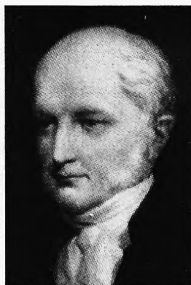
Вопрос о делимости атома возникал давно в философии физики. Ещё Рене Декарт и его последователи картезианцы считали атом делящимся до бесконечности. По их мнению частицы, из которых состоит вещество, могут меняться «по форме и величине». Эти представления настолько опережали своё время, что быстро сошли со сцены.

Первую научную гипотезу, допускающую сложное строение атома, предложил в 1815 г. английский врач Уильям Праут. Исходя из того факта, что атомные массы веществ кратны атомной массе водорода, он высказал гипотезу, согласно которой атомы всех химических элементов образовались путем «конденсации» атомов водорода.

В середине XIX века У. Томсон (лорд Кельвин) предложил рассматривать атомы как вихревые кольца в эфире. Если эфир рассматривать как идеальную жидкость, то кольца в эфире не исчезают, они неделимы, между ними действуют силы, подобные молекулярным.



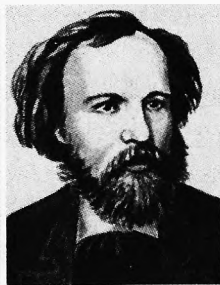
Рене Декарт
(1596–1650)



Уильям Праут
(1785–1850)



Томсон Уильям
лорд Кельвин
(1824–1907)



Дмитрий Иванович
Менделеев
(1834–1907)

Новый импульс для развития идеи сложного строения атома дало открытие в 1869 г. периодического закона Д. И. Менделеевым. Идея о порядке расположения элементов по химическим свойствам блеснула у него при раскладывании пасьянса.

Перед физиками стал вопрос о причинах повторяемости химических свойств элементов, расположенных в порядке возрастания атомной массы. Естественно было предположить, что увеличение массы атома обусловлено увеличением числа частиц, входящих в атом. А периодическая повторяемость химических свойств элементов обусловлена повторяемостью особенностей внутренней структуры атомов. Физикам нужно было выяснить, из каких частиц состоят атомы, и объяснить химические свойства

на основе модели строения атомов и силы взаимодействия между этими частицами. Попытка построить теорию строения атома на основе открытого Менделеевым периодического закона была предпринята профессором МГУ Борисом Николаевичем Чичериным в конце 80-х годов XIX века. По Чичерину атом состоит из нейтральной массы — ядра, вокруг которого вращаются периферические массы. Между ними и ядром действуют силы притяжения, подобные силам тяготения.



Борис Николаевич
Чичерин (1828–1904)



Николай Александрович
Морозов (1854–1946)



Джозеф Джон
Томсон (1856–1940)

Русский физик Николай Александрович Морозов, находясь в тюрьме за революционную деятельность с 1886 по 1905 г., не имея связи с внешним миром, разработал идею сложного строения атома, которую опубликовал в 1907 г. По Морозову все химические элементы состоят из пяти основных частиц: трех частиц с атомными массами 1, 2 и 4 (структуры водорода, протогелия и архония) и двух частиц электричества (отрицательной «катодия» и положительной «анодия»). Он предвосхитил ряд открытий в физике и химии.

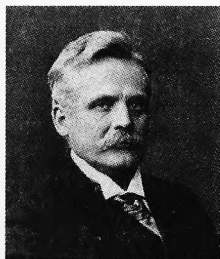
Теория строения атома начала активно развиваться после открытия электрона. В 1897 г. английский физик Дж. Дж. Томсон, исследуя отклонение катодных лучей в магнитном и электрическом полях, показал, что они представляют собой поток отрицательно заряженных частиц. Он измерил их удельный заряд и определил, что их масса приблизительно в 1837 раз меньше массы атома водорода. Это было прямым открытием электрона, за что Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию (1906 г.).

В 1902 г. У. Томсон (Кельвин) выдвинул гипотезу о строении атома вместе с Дж. Дж. Томсоном. В 1903 г. последний изложил её. Согласно томсоновской модели, атом состоит из положительного заряда, равномерно заполняющего сферу, размеры которой того же порядка, что у атома. Внутри сферы находятся отрицательно заряженные частицы «корпускулы» (термин «электрон» ещё не использовался в 1903 г.), размеры которых гораздо меньше размеров сферы.

Число корпускул в атоме велико, даже самый малый атом водорода содержит по Томсону около тысячи корпускул. Корпускулы могут двигаться внутри атома, например, вращаться или находиться в покое. В стационарном состоянии атома отрицательно заряженные корпускулы должны располагаться концентрическими слоями с определённым числом в каждом



Хантаро Нагаока
(1865–1950)



Вильгельм Вин
(1864–1928)

слое. Томсон объяснял многие физические и химические свойства, но его теория сталкивалась с трудностями.

В 1904 г. японский физик Хантаро Нагаока предложил планетарную модель атома, согласно которой атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращается большое количество электронов. Но эта гипотеза не принялась всерьез. Против неё, в частности, выступил Вильгельм Вин в 1905 г. на 77 съезде естествоиспытателей и врачей. Ведь атом, построенный согласно этой модели, не может быть устойчивым, так как электроны, вращаясь (двигаясь ускоренно), должны излучать энергию, а значит, терять её, падать на ядро, а атом должен прекратить существование.

§ 19. Открытие радиоактивности. Опыты Резерфорда

Открытие радиоактивности. Французский физик А. А. Беккерель изучал действие различных люминесцирующих веществ на фотопластинку, в том числе солей урана. В 1896 г. он открыл, что неизвестное излучение присутствует самой урановой соли и не имеет ничего общего с люминесцирующим излучением.

*Явление самопроизвольного излучения солями урана лучей особой природы было названо **радиоактивностью**.*

Исследовав различные химические соединения урана, он пришел к следующему выводу.

Интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и не зависит от того, в какие соединения он входит.

Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его атомам.

В 1899 г. уроженец из Новой Зеландии Эрнест Резерфорд, работавший под руководством Дж. Дж. Томсона в Кавендишской лаборатории открыл α -, β - и γ -лучи (рис. 1). Пропуская излучение урана через магнитное поле, он обнаружил, что излучение разделяется на три компонента, которые были названы альфа-, бета- и гамма-лучами. γ -излучение не отклонялось в магнитном поле, а α - и β -лучи отклонялись в противоположные стороны, причём β -лучи отклонялись в значительно большей степени и с большим разбросом по направлениям.

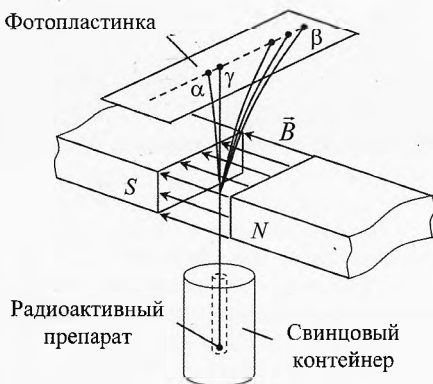


Рис. 1. Отклонение α -, β - и γ -лучей

В 1900 г. Беккерель первым измерил (приблизительно) отношения заряда к массе β -частиц и установил, что оно такого же порядка, как и для частиц катодных лучей, которые позже были названы электронами.

В 1903 г. Резерфорд доказал, что α -лучи состоят из положительно заряженных частиц.



Антуан Анри
Беккерель (1852–1908)



Эрнест Резерфорд
(1871–1937)



Ганс Вильгельм
Гейгер (1882–1945)



Эрнст Марсден
(1889–1970)

Опыты Резерфорда. В 1906 г. Резерфорд произвёл зондирование атома с помощью α -частиц. Для этого он использовал α -частицы, вылетающие из радиоактивного препарата со скоростями примерно 20 000 км/с. Они бомбардировали тонкую фольгу из различных металлов, например золотую фольгу толщиной 1 мкм (3 000 слоёв атомов). Большинство α -частиц пролетали не замечая фольги, но некоторые отклонялись на малые углы. Из чего можно было сделать вывод, что атом в основном пустой, но что-то в нём есть, поскольку некоторые α -частицы немного отклоняются. Прошедшие через фольгу α -частицы регистрировались с помощью спинтарископа, основным элементом которого был кадмиевый экран. Каждая α -частица, падающая на него, вызывала небольшое свечение экрана.

В 1908 г. вместе с немецким физиком-экспериментатором Г. В. Гейгером Резерфорд сконструировал прибор для регистрации отдельных заряженных частиц – счётчик Гейгера. С его помощью Резерфорд окончательно доказал в 1909 г., что α -частицы являются дважды ионизированными атомами гелия.

По предложению Резерфорда в 1909–1910 гг. Гейгер вместе с новозеландским физиком Эрнстом Марсденом систематически исследовал рассеяние α -частиц с помощью спинтарископа (рис. 2) и нашел, что наиболее вероятный угол рассеяния сильно зависит от атомной массы

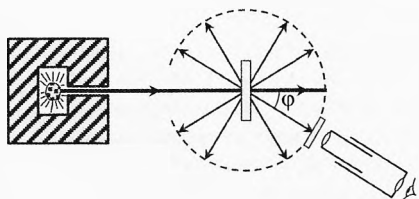


Рис. 2. Опыт Резерфорда

рассеивающего вещества фольги, а также от скорости α -частиц. Кроме того, они обнаружили аномально большие углы рассеяния, чего совершенно не

ожидали и что оказалось самым главным в объяснении строения атома. При рассеянии α -частиц, испускаемых радием, на платине (Pt) получилось, что одна из 8 000 α -частиц отклонялась на угол больше 90° .

Резерфорд, обобщив экспериментальные данные, получил закон рассеяния α -частиц атомами различных элементов (формула Резерфорда), что привело его в 1911 г. к открытию в атоме ядра – плотного положительно заряженного образования диаметром около 10^{-12} см, и в конечном счёте созданию новой модели атома – планетарной (модель атома Резерфорда).

В центре каждого атома любого вещества находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. А вокруг ядра вращаются одна или более отрицательно заряженные частицы – электроны.

Решим задачу, позволяющую оценить размеры ядра.

Пример 1. Пусть α -частица ($m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}$ кг, $q_\alpha = 2 \cdot e$) летит со скоростью $v = 2 \cdot 10^7$ м/с и центрально сталкивается с ядром атома платины, масса которого во много раз больше массы α -частицы, а заряд $q = 78 \cdot e$. Оценить минимальное расстояние, на которое подлетит α -частица к ядру платины (точнее, расстояние между центром ядра и α -частицы).

Решение. Когда α -частица была далеко от ядра, они не взаимодействовали. Энергия системы (α -частица и ядро платины) была равна кинетической энергии α -частицы:

$$E_0 = \frac{m_\alpha v^2}{2}.$$

При подлёте кулоновская сила тормозит α -частицу. И при максимальном сближении r_{\min} она на мгновение останавливается, а затем отбрасывается назад (рис. 3). Смещением ядра платины пренебрегаем из-за большой разницы в массах. Энергия системы в момент максимального сближения:

$$E \approx \frac{kq q_\alpha}{r_{\min}}.$$



Рис. 3. Подлёт α -частицы на минимальное расстояние к ядру

Согласно закону сохранения энергии:

$$E_0 \approx E; \quad \frac{m_\alpha v^2}{2} \approx \frac{kq q_\alpha}{r_{\min}}; \quad \Rightarrow \quad r_{\min} \approx \frac{2kq q_\alpha}{m_\alpha v^2};$$

$$r_{\min} \approx \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 78 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{6,64 \cdot 10^{-27} \cdot (2 \cdot 10^7)^2} = 2,7 \cdot 10^{-14} \text{ (м)}. \leftarrow$$

✓ **Ответ.** α -частица могла сблизиться с ядром платины на расстояние (между их центрами), равное $2,7 \cdot 10^{-14}$ м.

В 1913 г. нидерландский юрист и физик Антониус ван ден Брук выдвинул гипотезу, согласно которой заряд ядра атома равен порядковому номеру элемента.

Планетарная модель атома Резерфорда встретила возражения, аналогичные возражениям к модели Х. Нагаока. Кроме того, она не могла объяснить наличие простой закономерности распределения спектральных линий. Ведь ещё в 1885 г. швейцарский физик Бальмер обнаружил закономерность для частот излучения спектральных линий атома водорода в трубках Гейслера:

$$\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где $m = 3, 4, 5$ и т.д., $R = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц – постоянная Ридберга.

В дальнейшем было исследовано распределение спектральных линий в ультрафиолетовой и инфракрасной областях и получена общая формула для спектра водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где n и m – целые числа, причём $m > n$.



Иоганн Якоб
Бальмер (1805–1898)



Антониус Йоханнес
ван ден Брук (1870–1926)



Йоханнес Роберт
Ридберг (1854–1919)

Модель атома Резерфорда не могла объяснить такой характер спектральных закономерностей.

В 1913 г. Дж. Дж. Томсон, опираясь на экспериментальные данные по рассеянию α -частиц, разработал новую модель атома. Теперь он предполагал, что атом состоит из ядра и электронов, но сила взаимодействия электронов с ядром не является кулоновской, а зависит от расстояния по следующему закону:

$$F = \frac{Z \cdot e^2}{r^2} \cdot \left(1 - \frac{c}{r} \right),$$

где $c \approx 10^{-8}$ см, Z – порядковый номер атома в таблице Менделеева.

В случае действия этой силы электроны могут находиться в атомах в равновесии, будучи неподвижными. Томсон долго придерживался этой модели и даже в 1923 г. излагал её в своих лекциях.

Появлялись и другие модели строения атома, отличные от Резерфордской и томсоновской.

§ 20. Теория Бора

Успеха в построении теории атома добился ученик Резерфорда датский физик Нильс Бор в 1913 г. Бор понял, что для построения теории, удовлетворительно объясняющей: результаты опытов Резерфорда, устойчивость атома, спектральных зависимостей, нужно отказаться от некоторых принципов классической физики. Бор соединил планетарную модель атома (следствие опытов Резерфорда), идею Планка о дискретном излучении атомом, открытие Бальмера и в конечном счёте комбинационный принцип Риджа. Он дополнил модель Резерфорда двумя гипотезами (*постулатами Бора*).



Нильс Хенрик Давид Бор (1885–1962)

1. Каждый электрон в атоме может совершать устойчивое движение по определённой орбите. При этом его энергия неизменна. Атом не излучает и не поглощает энергию.
2. Электрон способен перескакивать с одной стационарной орбиты на другую, и только в этом случае он излучает или поглощает определённую порцию энергии фиксированной частоты.

Эти частоты определяются изменением энергии при переходе в согласии с идеями Планка. Квант излучается при переходе с уровня большей энергии E_m на уровень с меньшей энергией E_n :

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n.$$

Рассчитаем возможные энергии атома водорода, радиусы орбит и частоты излучения и поглощения согласно теории Бора.

В центре атома находится положительно заряженное массивное ядро, а вокруг него вращается отрицательно заряженный электрон (рис. 4). Центробежное ускорение электронов обусловлено кулоновской силой:

$$F_c = \frac{k \cdot e^2}{r^2},$$

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,987 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$.

Согласно II закону Ньютона:

$$m_e a_n = F_c,$$

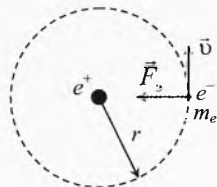


Рис. 4. Атом водорода

где $a_n = \frac{v^2}{r}$ – центростремительное ускорение. Тогда:

$$m_e \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{k \cdot e^2}{r^2} \Rightarrow m_e \cdot v^2 = \frac{k \cdot e^2}{r}. \quad (1)$$

Энергия системы ядро–электрон состоит из кинетической энергии и потенциальной энергии электрического взаимодействия:

$$E = E_k + E_{\text{э}}, \quad (2)$$

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (3)$$

$$E_{\text{э}} = -\frac{k \cdot e^2}{r}. \quad (4)$$

Из (1) и (3) следует:

$$E_k = \frac{k \cdot e^2}{2r}. \quad (5)$$

То есть кинетическая энергия по модулю равна половине потенциальной (электрической энергии).

Подставляя (4) и (5) в (2), получим:

$$E = \frac{k \cdot e^2}{2r} - \frac{k \cdot e^2}{r} = -\frac{k \cdot e^2}{2r}.$$

То есть полная энергия по модулю равна полной кинетической энергии:

$$E = -\frac{k \cdot e^2}{2r}.$$

Возникает вопрос: каковы возможные радиусы вращения электрона?

Бор ввел правило квантования, заметив, что момент импульса электрона $L_e = m_e v_n r_n$ имеет такую же размерность, как постоянная Планка. Он получил, что

$$m_e v_n r_n = n \cdot \hbar, \quad (6)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (аш с чертой) – приведённая постоянная

Планка, $n = 1, 2, 3$ и т.д. – натуральное число, в квантовой механике оно называется главным квантовым числом.

Найдём возможные радиусы орбит электрона в атоме водорода, решая совместно (1) и (6).

$$\left. \begin{aligned} m_e v_n^2 r_n^2 &= n^2 \cdot \hbar^2 \\ m_e v_n^2 &= \frac{k \cdot e^2}{r_n} \end{aligned} \right| \Rightarrow r_n = \frac{n^2 \cdot \hbar^2}{m_e \cdot k \cdot e^2}. \quad (7)$$

Ближний к ядру первый боровский радиус ($n_1 = 1$):

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{m_e \cdot k \cdot e^2}$$

$$r_1 = \frac{(1,0546 \cdot 10^{-34})^2}{9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 8,987 \cdot 10^9 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м},$$

$$r_1 = 0,529 \text{ Å}.$$

Диаметр первой боровской орбиты равен:

$$d_1 = 2r_1; \quad d_1 = 1,058 \text{ Å} \approx 1 \text{ Å}.$$

Не случайно введена единица измерения длины ангстрем. 1 Å примерно равен диаметру атома водорода в невозбуждённом состоянии.

Тогда n -й боровский радиус:

$$r_n = r_1 \cdot n^2 \quad (8)$$

Из (8) видно, что

$$r_2 = 4 \cdot r_1 \approx 2,12 \text{ Å};$$

$$r_3 = 9 \cdot r_1 \approx 4,76 \text{ Å};$$

$$r_4 = 16 \cdot r_1 \approx 8,46 \text{ Å} \text{ и т.д.}$$

Энергия на 1-й боровской орбите:

$$E_1 = -\frac{k \cdot e^2}{2r_1}$$

$$E_1 = -\frac{8,987 \cdot 10^9 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 0,529 \cdot 10^{-10}} = -21,8 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)} = -13,6 \text{ (эВ)}.$$

Энергия на n -й боровской орбите:

$$E_n = -\frac{k \cdot e^2}{2r_n} = -\frac{k \cdot e^2}{2r_1 \cdot n^2} = \frac{E_1}{n^2} \Rightarrow \boxed{E_n = \frac{E_1}{n^2}} \quad (9)$$

Вычислим энергию атома водорода на 2, 3 и 4-й орбитах:

$$E_2 = \frac{E_1}{4}, \quad E_2 = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{4} = -3,40 \text{ эВ};$$

$$E_3 = \frac{E_1}{9}, \quad E_3 = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{9} = -1,51 \text{ эВ};$$

$$E_4 = \frac{E_1}{16}, \quad E_4 = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{16} = -0,85 \text{ эВ}.$$

Вычислим возможные частоты излучения атома водорода при переходе с более удаленных от ядра орбит с энергией E_m к ближним к ядру орбитам с энергией E_n . В этих случаях происходит излучение кванта. А при обратном переходе (на более высокую орбиту) – поглощение кванта такой же частоты.

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n = \frac{E_1}{m^2} - \frac{E_1}{n^2} = E_1 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \Rightarrow \nu_{mn} = \frac{E_1}{h} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Учитывая, что $E_1 < 0$, запишем:

$$\nu_{mn} = \frac{|E_1|}{h} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Величина $\boxed{\frac{|E_1|}{h} = R}$ называется **постоянной Ридберга**.

$$R = \frac{21,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}, \quad R \approx 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

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

Каков смысл постоянной Ридберга R ?

Постоянная Ридберга равна частоте кванта, который излучится, если свободный электрон ($m = \infty$) свяжется со свободным протоном, попав сразу на самую близкую к ядру орбиту ($n = 1$).

То есть постоянная Ридберга равна максимальной частоте кванта, который может излучить образовавшийся атом водорода:

$$\nu_{\max} = R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

Этой частоте соответствует минимальная длина волны фотона:

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}}; \quad \lambda_{\min} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}} = 9,1 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 91 \text{ нм}.$$

Такой квант лежит в ультрафиолетовой области спектра.

Постоянная Ридберга также равна частоте фотона $3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, который поглотившись атомом водорода, переведёт электрон с первой орбиты в свободное состояние, то есть ионизирует атом водорода, находившийся в основном состоянии.

Если переходы совершаются на первую орбиту ($n = 1$) с любых других ($m = 2, 3, 4$ и т.д.), то атом излучает ультрафиолетовые кванты, принадлежащие *серии Лаймана* (рис. 5). Обратные переходы с первой орбиты на более далёкие происходят при поглощении квантов соответствующих частот ультрафиолетового спектра. Эту серию открыл в 1906 г. американский физик-экспериментатор Теодор Лайман. Он получил ультрафиолетовые спектры газов до длины волны $\lambda = 500 \text{ Å} = 0,05 \text{ мкм}$.

Если переходы электрона происходят на вторую орбиту ($n = 2$) с более далёких, то наблюдается излучение в видимой части спектра. Обратные переходы наблюдаются при поглощении фотонов тех же частот. Визуально

наблюдаются четыре линии (переходы с 3, 4, 5 и 6-й орбит на вторую). Более высокие частоты этой серии (серии Бальмера) имеют место, но визуально не наблюдаются (не соответствуют диапазону частот, видимых человеческим глазом).

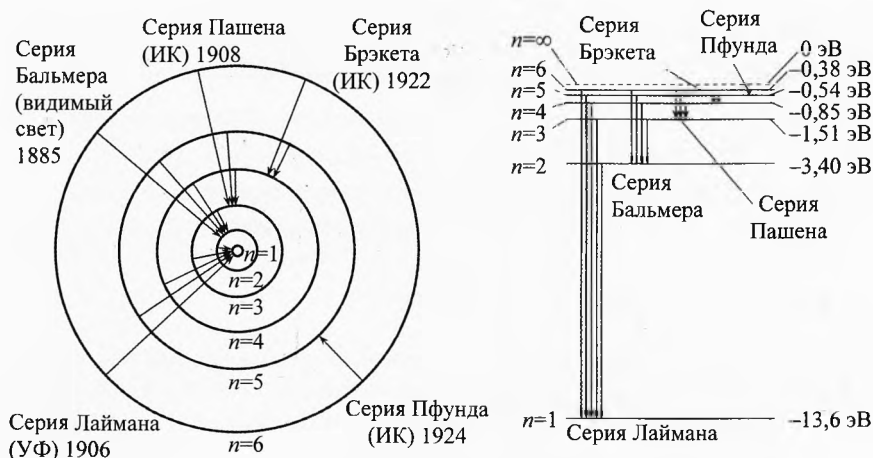


Рис. 5. Серии испускания фотонов атомом

При переходе на 3, 4, 5-ю орбиты с ещё более далёких наблюдаются серии инфракрасных частей света: серия Пашена (1908 г.), Брэкета (1922 г.), Пфунда (1924 г.).

Резерфорд назвал теорию Бора высшим достижением в области музыкальности мысли. Она хорошо описывает частоты излучения и поглощения атомов водорода и водородо-подобных атомов (ионов): однократно ионизированного атома гелия, двукратно ионизированного атома лития и т.п., то есть ионов, вокруг ядра которых вращается по одному электрону. Для более сложных атомов теория Бора неприменима.



Теодор Лайман
(1874–1954)



Луис Карл Генрих
Фридрих Пашен
(1865–1947)



Фредерик Брэккет
(1896–1988)



Август Герман
Пфунд (1879–1949)

Пример 2. Рассчитать первые 6 частот и длин волн в серии Бальмера.

Решение. Согласно общей формуле $\nu = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, для серии

Бальмера ($n = 2$) запишем: $\nu = R \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right)$.

Первая частота из серии Бальмера соответствует переходу с третьего уровня ($m = 3$) на второй:

$$\nu_1 = \nu_{32} = R \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right) = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) = 0,457 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1}; \quad \lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{0,457 \cdot 10^{15} \text{ Гц}} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 656 \text{ нм}.$$

Это диапазон красного цвета (770–620 нм).

Аналогично:

$$\nu_2 = \nu_{42} = 0,617 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad \lambda_2 = \frac{c}{\nu_2} = 486 \text{ нм}. \text{ Голубой цвет.}$$

$$\nu_3 = \nu_{52} = 0,690 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad \lambda_3 = \frac{c}{\nu_3} = 434 \text{ нм}. \text{ Фиолетовый цвет.}$$

$$\nu_4 = \nu_{62} = 0,731 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad \lambda_4 = \frac{c}{\nu_4} = 410 \text{ нм}. \text{ Фиолетовый цвет.}$$

$$\nu_5 = \nu_{72} = 0,755 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad \lambda_5 = \frac{c}{\nu_5} = 397 \text{ нм}. \text{ Ультрафиолет.}$$

$$\nu_6 = \nu_{82} = 0,771 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad \lambda_6 = \frac{c}{\nu_6} = 389 \text{ нм}. \text{ Ультрафиолет.}$$

Пример 3. Вычислить скорость, период и частоту вращения электрона на первой орбите атома водорода $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Решение. Согласно II закону Ньютона, центростремительное ускорение создаётся электрической силой:

$$m_e \cdot a_n = F_3; \Rightarrow m_e \cdot \frac{v_1^2}{r_1} = \frac{k \cdot e^2}{r_1^2}; \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{k \cdot e^2}{m_e \cdot r_1}};$$

$$v = \sqrt{\frac{8,987 \cdot 10^9 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 0,529 \cdot 10^{-10}}} \approx 2,19 \cdot 10^6 \text{ (м/с)} = 2,19 \text{ (Мм/с)}.$$

$$\text{Период: } T_1 = \frac{2\pi r_1}{v_1}; \quad T_1 = \frac{2\pi \cdot 0,529 \cdot 10^{-10}}{2,19 \cdot 10^6} = 1,52 \cdot 10^{-16} \text{ (с)}.$$

Частота: $n_1 = \frac{1}{T_1}$; $n_1 = \frac{1}{1,52 \cdot 10^{-16}} = 6,58 \cdot 10^{15}$ (об/с).

За одну миллиардную долю секунды на первой боровской орбите электрон совершает 6,58 миллиона оборотов! \blacktriangleleft

✓ **Ответ.** Скорость $v = 2,19$ Мм/с, период $T = 1,52 \cdot 10^{-16}$ с, частота вращения $\nu = 6,58 \cdot 10^{15}$ об/с.

✎ **Пример 4.** Вычислим длину траектории (окружности) электрона на первой боровской орбите.

➔ **Решение.** $L_1 = 2\pi r_1$; $L_1 = 2\pi \cdot 0,529 \cdot 10^{-10} = 3,32 \cdot 10^{-10}$ (м). \blacktriangleleft

✓ **Ответ.** Длина траектории электрона на первой боровской орбите $L_1 = 3,32 \cdot 10^{-10}$ (м).

Оказалось, что длина окружности первой боровской орбиты совпала с длиной волны де Бройля электрона на этой орбите (см. пример 6 в предыдущей главе)!

Аналогично можно вычислить, что на второй боровской орбите укладываются ровно две длины волны де Бройля. Так же и для других орбит. Поэтому **правило квантования орбит Бора** можно сформулировать следующим образом.

На длине окружности каждой стационарной орбиты электрона в атоме водорода укладывается целое число длин волн де Бройля $\lambda_B = \frac{h}{m_e v_n}$, соответствующих движению электрона:

$$2\pi r_n = n \cdot \lambda_B; \Rightarrow 2\pi r_n = n \cdot \frac{h}{m_e v_n}; \Rightarrow m_e v_n r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi}.$$

И, наконец,

$$m_e v_n r_n = n \cdot \hbar.$$

Теперь ясно, откуда появилась \hbar (аи с чертой).

Таким образом, движение электрона на стационарной орбите можно рассматривать как процесс стоячих волн. При этом на орбите должно помещаться целое число длин волн. Это трудно охватить умом, но ясно, что частицы (в нашем случае электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами.

§ 21. Атомные и молекулярные спектры

Линейчатые спектры газов. Раскалённое твёрдое или жидкое тело дает непрерывный спектр излучения, который можно наблюдать в спектроскоп.

Если на пути непрерывного спектра излучения поместить облако паров какого-нибудь химического элемента или газ, то в спектре появляются тёмные тонкие линии (линии поглощения) как раз в тех местах, где находятся линии излучения разряженного газа в нагретом состоянии (закон Кирхгофа).

Когда свет от мощного источника проходит через газ, то атомы газа поглощают фотоны и в течение миллиардных долей секунды переизлучают на тех же частотах по всевозможным направлениям (а не только в исходном направлении распространения света от источника). Поэтому на соответствующих этим частотам местах появляются тёмные линии спектра поглощения.

В 1814–1815 гг. немецкий физик Йозеф Фраунгофер первым исследовал и объяснил тёмные линии в солнечном свете, названные в дальнейшем фраунгоферовыми. Используя явление дифракции, он измерил длины волн наиболее заметных тёмных линий.



Йозеф Фраунгофер
(1787–1826)

Спектры различных элементов отличаются друг от друга количеством линий, их расположением и интенсивностью. Астрономы используют это для изучения химического состава атмосфер небесных тел. Они пользуются главным образом спектрографами – приборами, позволяющими фотографировать спектры небесных тел. Спектр Солнца (как и спектр других звезд) является спектром поглощения. В нём известно уже более 26 000 линий поглощения.

Сложные спектры испускания газов. В разряженном состоянии газы испускают уникальный линейчатый спектр, являющийся как бы паспортом данного газа. Но спектр нагретых газов может быть и сплошным. Фотосфера Солнца, по которой мы оцениваем видимый размер Солнца, представляет собой газ, давление которого 10^3 Па (в 100 раз меньше давления атмосферного воздуха у поверхности Земли) и эффективная температура 5780 К. Тем не менее спектр фотосферы сплошной (непрерывный). Газовые оболочки большинства звезд тоже излучают сплошной спектр.

Каким же образом разряженный газ излучает сплошной спектр?

Первый механизм излучения – рекомбинация свободных электронов с положительными ионами. Энергия свободных электронов не квантована и может быть любой. Поэтому возникающий при рекомбинации с ионами спектр ограничен только со стороны низких частот. Этим механизмом созда-

ётся часть сплошного спектра солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне. Сплошной спектр со стороны низких частот ограничивается серией Лаймана (напомним, что Солнце состоит в основном из водорода и гелия).

Второй механизм возникновения излучения со сплошным спектром – тормозное излучение свободных электронов, движущихся в электрических полях, создаваемых положительными ионами плазмы. Так как скорости свободных электронов в плазме могут быть любыми и они проходят на различных случайных расстояниях от положительных ионов, то спектр их тормозного излучения сплошной.

Третий механизм возникновения сплошного спектра – излучение при образовании отрицательных ионов водорода. Кинетическая энергия электронов произвольна до присоединения к нейтральному атому. Поэтому, хотя энергетические уровни образующегося иона квантованы, разность энергий до и после соединения может иметь непрерывные значения, и возникает излучение с непрерывным участком спектра на низких частотах.

В фотосфере Солнца происходят все три указанных процесса.

Рентгеновские спектры. Электроны в атомах распределены на разных расстояниях от ядра на так называемых электронных оболочках и подоболочках. Чем ближе электрон к ядру, тем сильнее он взаимодействует с ядром и быстрее движется. В многоэлектронных атомах электроны взаимодействуют не только с ядром, но и друг с другом. В таких атомах излучение и поглощение возможны не только при переходах внешних (валентных) электронов, но и с внутренних оболочек.

При достаточно большой энергии возбуждения в результате столкновения атома с заряженной частицей или в результате поглощения кванта может быть выбит электрон из внутренней оболочки (оболочка K). Тогда из вышерасположенной оболочки (L) электрон перейдет вниз и излучит квант K_α (рис. 6). На его место перейдет электрон, расположенный ещё выше (на оболочке M), и излучится ещё один квант L_α и т.д.

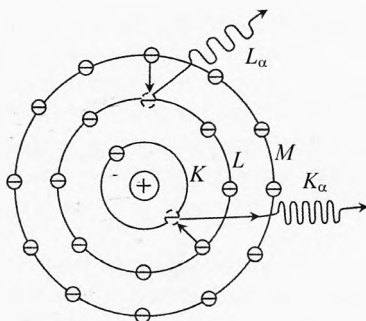


Рис. 6. Излучение с внутренних слоев

В тяжёлых атомах с большими порядковыми номерами Z излучение с внутренних слоёв принадлежит рентгеновскому спектру и называется характеристическим рентгеновским излучением.

Поскольку на внутренние оболочки электронов почти не влияют взаимодействия атомов при вступлении их в химические реакции, то характеристические рентгеновские спектры практически не зависят от химических соединений атома определённого элемента с атомами других веществ. Поэтому по рентгеновским спектрам можно определить наличие отдельных хими-

ческих элементов в любых соединениях в любом агрегатном состоянии вещества.

Молекулярные спектры. Для газов, состоящих из молекул, как и для атомарных газов, характерны линейчатые спектры испускания и поглощения. Но этих линий очень много, и они представляют собой систему широких полос. Положение каждой полосы соответствует одному из возможных электронных переходов. Расщепление одного энергетического уровня на полосу близкорасположенных подуровней объясняется колебанием атомов внутри молекулы и её вращением.

Энергия колебаний молекулы подчиняется законами квантовой физики и имеет дискретный ряд значений, поэтому один электронный энергетический уровень разбивается на множество колебательных подуровней (рис. 7).

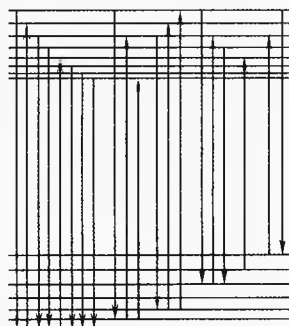


Рис. 7. Молекулярные спектры

Кроме колебаний атомов в молекуле может происходить вращение молекулы (рис. 8). При вращении энергия молекулы увеличивается. Изменение энергии вращательного движения квантуется. Электронные и колебательные уровни энергии молекул разбиваются на множество вращательных подуровней. В результате число возможных переходов резко увеличивается. Возникает большое число линий спектра, сливающихся в широкую полосу.

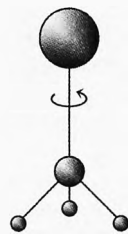


Рис. 8. Вращение молекулы

Спектр излучения жидких и твёрдых тел. В жидких и твёрдых телах атомы и молекулы находятся близко друг к другу и сильно взаимодействуют. Каждый атомный энергетический уровень в твёрдом или жидком теле расщепляется на N подуровней, где N — число атомов в теле. Число N так велико в макроскопическом теле, что энергетические подуровни можно считать находящимися рядом друг с другом. Поэтому энергия электронов в твёрдом или жидком теле может изменяться столь малыми порциями, что возможно излучение и поглощение фотонов всевозможных частот. Поэтому спектр излучения твёрдых и жидких тел оказывается сплошным.

Естественная ширина спектральных линий. Интересно, почему мы видим в спектроскопе параллельные разноцветные линии? Ответ прост: каждая линия является изображением щели на входе света в трубу коллиматора. Если отверстие на входе трубы коллиматора изготовлено в виде полуокружности, то получится спектр из разноцветных дуг. Такой спектр получают астрономы при солнечных затмениях, сняв ширму с трубы коллиматора при исследовании спектра хромосферы Солнца.

Следовательно, смысл слова «линейчатый» по отношению к спектру обусловлен не формой наблюдаемых линий, а тем, что спектр содержит не все возможные частоты (длины волн), а лишь некоторый набор частот ($\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$) или длин волн ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$).

Как будут изменяться наблюдаемые спектральные линии, если уменьшать ширину щели коллиматора? Так как каждая линия спектра есть изображение освещенной щели в цвете, соответствующем определённой частоте, то по мере уменьшения ширины щели должно было бы происходить уменьшение ширины спектральной линии, согласно законам геометрической оптики, до тех пор, пока не станет существенным влияние дифракции света на краях щели. Но это не совсем так.

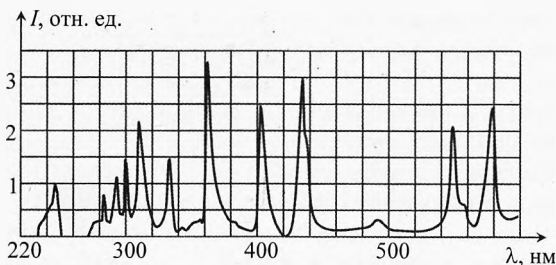


Рис. 9. Спектр излучения

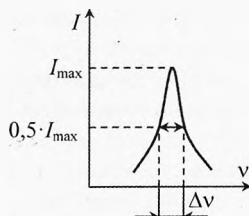


Рис. 10. Ширина спектральной линии

Действительно, при уменьшении ширины щели ширина спектральных линий уменьшается, но при достижении некоторого значения ширины щели её дальнейшее уменьшение не приводит к уменьшению ширины спектральных линий, уменьшается только их яркость (волновые свойства ещё не проявляются).

Используя спектрограф высокого класса, можно обнаружить, что разные линии спектра имеют разную ширину и не имеют четких границ. Если исследовать распределение поверхностной плотности потока излучения по длинам волн, то можно получить картину, какая представлена на рис. 9. Как видно, «спектральные линии» в действительности не являются монохроматическими. Они представляют собой набор узких участков световых волн разной интенсивности в пределах каждого участка $\Delta\lambda$ (или $\Delta\nu$).

Диапазон частот, в пределах которого интенсивность спектральной линии убывает в 2 раза по сравнению с максимальным значением, называется шириной спектральной линии (рис. 10).

Одна из причин уширения спектральных линий — эффект Доплера. Действительно, атомы движутся с разными скоростями в произвольных направлениях. Относительно наблюдателя в данный момент одни молекулы удаляются, другие — приближаются, третьи — движутся поперек и т.д.

Воспринимаемая частота изменяется в зависимости от направления и скорости излучающих атомов: от удаляющихся — частота уменьшается, от приближающихся — увеличивается.

Этот эффект называется **доплеровским уширением спектральных линий**.

Измеряя доплеровское уширение, можно определить среднюю арифметическую скорость теплового движения атомов газа, а значит, и его температуру.

Ширина спектральной линии неподвижных и удаленных друг от друга атомов (разреженный газ) называется естественной шириной спектральной линии.

Исследования линейных спектров показали, что реальное уширение атомных спектров превышает доплеровское.

Так как любая спектральная линия имеет конечную ширину, то это означает, что энергия атома в возбужденном состоянии не имеет строго определенного значения. Энергия возбужденного атома в состояниях m и n может находиться в некоторых интервалах энергии шириной ΔE_m и ΔE_n относительно средних значений E_m и E_n (рис. 11). Поэтому естественная ширина спектральной линии определяется суммой значений ширины двух энергетических уровней:

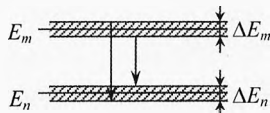


Рис. 11. Неопределённость энергетических уровней атома

$$\Delta \nu = \frac{\Delta E}{h}, \quad \text{где } \Delta E = \Delta E_m + \Delta E_n.$$

Соотношение неопределённостей и время жизни невозбуждённых атомов. Неопределённость энергии атома в любом стационарном состоянии обусловлена наличием фундаментального закона квантовой физики – соотношением неопределённостей:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

В нашем случае ΔE – неопределённость значения энергии атома в возбужденном состоянии, Δt – неопределённость времени пребывания атома в этом состоянии.

Время жизни τ атома в возбужденном состоянии обычно составляет от 1 нс до 100 нс. Оценим ширину спектральной линии для типичного случая $\tau = 10^{-9}$ с, считая, что совершается переход из возбужденного в нормальное состояние, приняв $\Delta t \approx \tau$:

$$\Delta E = h \cdot \Delta \nu, \quad \Delta E \cdot \tau \geq \hbar.$$

Поставляя первое уравнение во второе, и учитывая, что $\hbar = 2\pi \hbar$, получим:

$$h \cdot \Delta \nu \cdot \tau \geq \hbar \Rightarrow \Delta \nu \geq \frac{1}{2\pi \cdot \tau}; \quad \Delta \nu \geq 1,6 \cdot 10^8 \text{ Гц}.$$

Так, частота видимого света $\nu = (0,47-0,77) \cdot 10^{15}$ Гц или в среднем $\nu_{\text{cp}} = 6 \cdot 10^{14}$ Гц, тогда относительная ширина спектральной линии:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_{\text{cp}}} = 2,7 \cdot 10^{-7} = 2,7 \cdot 10^{-5} \%.$$

Реальная ширина спектральных линии разреженных газов при слабом и редком взаимодействии (низкой температуре и малом давлении) близка к естественной ширине. При повышении давления и температуры увеличивается энергия атомов и частота их столкновения. В результате уменьшается время их жизни в возбужденном состоянии, что ведет к уширению спектральных линий. Этот процесс называется ударным уширением спектральных линий.

Спектральный анализ. Исследование линейчатого спектра вещества позволяет определить, из каких химических элементов оно состоит и в каком количестве содержится каждый элемент в данном веществе. Количественное содержание в исследуемом образце определяется путем сравнения интенсивности отдельных линий спектра этого элемента с интенсивностью линий в другом образце, в котором количественное содержание элементов известно.

|| *Метод определения качественного и количественного состава вещества по его спектру называется **спектральным анализом**.*

Для выполнения спектрального анализа вещества с неизвестным химическим составом необходимо выполнить три операции: перевести вещество в газообразное состояние при такой высокой температуре, когда оно излучает свет, затем разложить этот свет в спектр и определить длины волн и интенсивности наблюдаемых в нём линий. Сравнивая полученные значения длин волн с известными спектрами отдельных элементов таблицы Менделеева, можно определить, какие химические элементы входят в состав исследуемого вещества.

Если исследуемое вещество находится в газообразном состоянии, то для получения его линейчатого спектра обычно применяется искровой разряд. Исследуемым газом заполняют трубку с двумя электродами на концах. На эти электроды подается высокое напряжение, и в трубке возникает электрический разряд.

Для проведения спектрального анализа образцов в твёрдом состоянии обычно используют дуговой разряд. В плазме дуги происходит превращение исследуемого вещества в пар и нагревание до высокой температуры. Электроды, между которыми зажигается дуговой разряд, обычно изготавливают из графита или меди. Углерод и медь удобны по той причине, что спектры излучения их атомов в видимой области имеют небольшое число линий и не создают серьезных помех для наблюдения спектра исследуемого вещества.

Спектральный анализ широко применяется при поисках полезных ископаемых для определения химического состава образцов руды. В промышленности спектральный анализ используется для контроля состава сплавов и примесей, вводимых в металлы для получения материалов с заданными свойствами.

Достоинствами спектрального анализа являются высокая чувствительность и быстрота получения результатов. С его помощью можно, например, в пробе массой 600 нг обнаружить присутствие золота при его содержании всего 10 нг. Определение марки стали методом спектрального анализа может быть выполнено за несколько десятков секунд.

Спектральный анализ позволяет определить химический состав небесных тел, удалённых от нас на сотни миллионов световых лет, а также скоро-

сти их движения относительно Земли (табличные спектры накладываются на спектр звезды и по смещению соответствующих линий определяют скорость звезды по эффекту Доплера).

§ 22. Лазер

Одним из самых выдающихся достижений второй половины XX века явилось изобретение и невероятно разнообразное применение лазера. Слово «лазер» есть аббревиатура от «*light amplification by stimulated emission of radiation*», что означает усиление света с помощью вынужденного излучения. Физической основой работы лазера служит явление индуцированного (то есть вынужденного) излучения. Рассмотрим историю вопроса с появлением лазера.

Спонтанное и вынужденное излучение.

Излучение, испускаемое атомом самопроизвольно при переходе из одного состояния в другое, называется **спонтанным излучением**.

Спонтанное (самопроизвольное) излучение происходит некогерентно, т. е. каждый атом излучает независимо от других атомов.

В 1916 г. А. Эйнштейн высказал следующую гипотезу.

Излучение атомами фотонов может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Такое излучение назвали **вынужденным или индуцированным излучением** (резонансный эффект).

С точки зрения квантовых представлений, в результате взаимодействия возбужденного атома с полем фотона, частота которого равна частоте перехода, излучается такой же фотон по энергии и направлению движения (рис. 12).

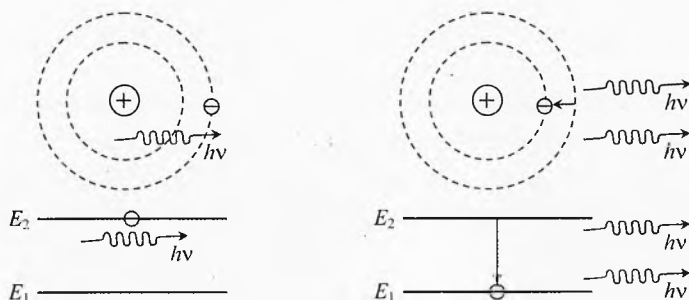


Рис. 12. Вынужденное излучение

С точки зрения волновой теории этот возбуждённый атом излучает электромагнитную волну, совпадающую с исходной: по направлению, частоте, фазе и поляризации. В итоге увеличивается амплитуда волны. Замечательно то, что результирующее излучение монохроматично и когерентно. Это свойство индуцированного излучения положено в основу устройства лазеров.



Валентин Александрович
Фабрикант (1907–1991)



Михаил Мартынович
Вудынский (1907–1975)



Фатима Асланбековна
Бутаева (1907–1992)

Чтобы получить когерентный пучок света, нужно осветить рабочее вещество от внешнего источника достаточно большой мощности, чтобы много атомов пришло в возбуждённое состояние.

Состояние, при котором большая часть атомов не возбуждена, называется состоянием с **нормальной населённостью** энергетических уровней (рис. 13а).

Если большая часть атомов рабочего тела возбуждена (рис. 13б), то такое состояние называется состоянием с **инверсной населённостью** (от лат. *inversio* – переворачивать).

В теле с инверсной населённостью уровней на пути фотонов чаще встречаются возбуждённые атомы. В результате прохождения света нужной частоты через это тело поток света усиливается.

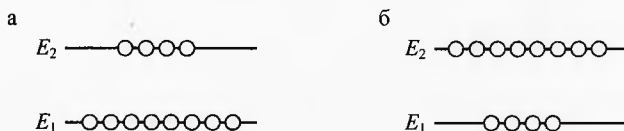


Рис. 13. Нормальная и инверсная населённость энергетических уровней

Возможность такого усиления света за счёт вынужденного испускания фотонов в плазме с инверсной населённостью энергетических уровней теоретически обосновал в 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант. В 1951 г. совместно с М. М. Вудынским и Ф. А. Бутаевой он сформулировал принцип усиления электромагнитного излучения при прохождении среды с инверсной населённостью (идея квантового усилителя).

Создание в веществе инверсной населенности уровней. Атомы большинства веществ живут в возбужденном состоянии очень мало (1–100 нс), а затем переходят в основное состояние. Использовать их для индуцированного излучения нельзя. Но атомы некоторых веществ переходят из возбужденного состояния с энергией E_3 с небольшой потерей энергии в так называемое *метастабильное состояние* с энергией E_2 . В этом состоянии они могут находиться довольно долго, примерно 1 мс (или 10^6 нс). Поэтому в таких веществах можно создать инверсную населенность. При прохождении через такое вещество фотона с энергией, равной разности энергий метастабильного и основного состояний ($h\nu_{21} = E_2 - E_1$), происходит лавинообразный процесс усиления света за счёт индуцированного излучения (рис. 14).

Оптический квантовый генератор – лазер. Активную среду располагают в резонаторе. После облучения активной среды мощным потоком света большая часть атомов переходит в возбужденное, а затем в метастабильное состояние.

В результате спонтанных переходов образуются фотоны, летящие в произвольных направлениях.

Фотоны, движущиеся не перпендикулярно зеркалам, вылетают из пределов активной зоны вместе с небольшим количеством индуцированных ими фотонов.

Фотоны, которые в результате спонтанного перехода движутся перпендикулярно зеркалам, проходят между ними, многократно отражаясь вместе с другими фотонами, которые излучились под их влиянием с метастабильных атомов. Процесс продолжается до тех пор, пока существует инверсная населенность.

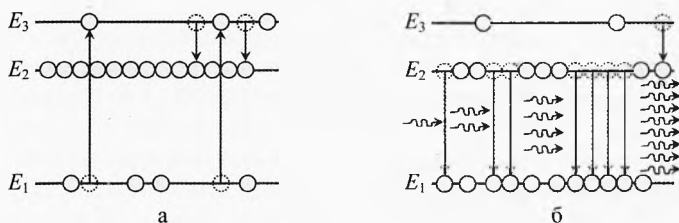


Рис. 14. Лавинообразное усиление света за счет индуцированного излучения

С точки зрения квантовых представлений генерация должна происходить при любых расстояниях между зеркалами. Но опыт показывает, что она возникает только при длине резонатора, кратной числу полувольт:

$$L = k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

При этом условии с точки зрения волновых представлений разность хода между вышедшей волной и волной, испытавшей отражение от двух зер-

кал, оказывается равной целому числу длин волн. И на выходе лазера происходит сложение амплитуд световых волн, то есть в резонаторе образуется стоячая волна.

Лирическое отступление. Мы здесь говорим то о квантах, то о волнах. Волновые и квантовые свойства излучения переплетаются. Действительно, при излучении и поглощении свет ведет себя как частица (квант, фотон). А при распространении группы фотонов проявляются волновые свойства. Это – естественно, но трудно охватить умом.

Описанный принцип генерации излучения разработал Н. Г. Басов совместно с А. М. Прохоровым. Они создали первые квантовые генераторы, активной средой которых были молекулы аммиака.



Николай
Геннадьевич
Басов (1922–2001)



Александр Михай-
лович Прохоров
(1916–2002)



Чарльз Хард
Таунс (1915–2015)

В 1955 г. они предложили трехуровневый метод неравновесных квантовых систем, который стал широко использоваться в квантовых генераторах и усилителях радио- и оптического диапазона. Их работами, а также исследованиями американского физика Чарльза Харда Таунса было положено начало развитию нового научного направления квантовой электроники, за что всем троим в 1964 г. была присуждена Нобелевская премия.

Первые лазеры. В первых оптических лазерах активной средой был кристалл рубина (Al_2O_3) с примесью около 0,05% хрома. Это кристалл 1 цилиндрической формы диаметром от 0,4 до 2 см и длиной от 3 до 20 см (рис. 15). Торцы цилиндра 3 и 4 очень гладкие и строго параллельные. На них нанесён отражающий слой: одна из поверхностей непрозрачна, а вторая – частично прозрачна (пропускает 8% светового потока, а 92% – отражает). Рубиновый стержень помещен внутри

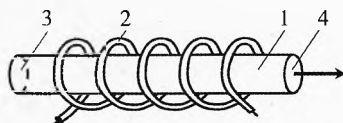


Рис. 15. Лазер

импульсной ксеноновой лампы спиральной формы 2, являющейся источником возбуждающего излучения (*оптическая накачка*).

Атомы хрома, поглощая из всего спектра излучения лампы фотоны длиной волны $\lambda = 560$ нм, переходят из основного состояния E_1 в возбуждённое с энергией E_3 , где время его жизни мало (около 10 нс). Передавая часть энергии кристаллической решетке, они переходят в метастабильное состояние с энергией $E_2 < E_3$ и временем жизни около 10^6 нс. На этом уровне оказывается инверсная заселенность. Некоторые атомы совершают спонтанные переходы на 1-й уровень и создают лавины фотонов с энергией $h\nu_{21} = E_2 - E_1$. Если они летят не по оси трубки, то лавины возникают небольшие, т.к. трубка тонкая по сравнению с её длиной. Эти фотоны покидают активную зону. Если спонтанно образовавшийся фотон летит по оси стрелы, то создаваемая им лавина усиливается при многократных отражениях от торцов поверхности. Через частично прозрачный торец выходит когерентное лазерное излучение, мощность которого лавинообразно нарастает. Длина волны фотона, излучаемого рубиновым лазером, $\lambda = 694,3$ нм (красный цвет). Частота излучения $\nu = c/\lambda = 4,32 \cdot 10^{14}$ Гц.

Применение лазеров. Мощность светового излучения лазера при использовании для разных целей может варьироваться в широких пределах. В школьном гелий-неоновом лазере мощность излучения порядка 1 мВт. В медицинском инфракрасном лазере для прогревания стоп человека – до 10 Вт. А мощные лазеры для технических, научных и военных целей – до 10^9 Вт и более.

В настоящее время существует много типов и конструкций лазеров: газовые, полупроводниковые, на красителях и др.

Лазеры имеют многообразное применение. В науке применение лазеров перспективно в проблеме управления термоядерной реакцией. Лазеры используются в селекции растений. Много применений находит лазер в промышленности стройматериалов, в военных и медицинских целях.

Например, многообразно применение лазеров в офтальмологии. При проведении операций на роговице глаза используют 6 видов лазеров, работающих на разных длинах волн. В операциях по исправлению донной патологии, в том числе при приваривании отслаивающейся сетчатки, применяют 4 вида лазеров, а для лечения катаракты используют один вид лазера. При консервативном лечении применяются два вида лазеров: один глубоко на уровне сетчатки, а второй снаружи – на роговице, при воспалении век и др.

А в области бытовой техники при записи лазерных дисков инфракрасный лазер прожигает на диске десятки миллионов точек в секунду! При воспроизведении лазерного диска головка лазерного проигрывателя считывает десятки миллионов единиц информации в секунду.

Большую научную работу с практическим выходом в решении задач быстрой обработки информации выполнил физик из Санкт-Петербурга Жорес Иванович Алфёров, за что ему присуждена Нобелевская премия в 2000 г.



Упражнения

1 На рис. 16 показана схема энергетических уровней атома. В начальный момент времени атом находится в состоянии с начальной энергией E_2 . Фотоны какой энергии может испускать атом: 1) только 2 эВ; 2) только 2,5 эВ; 3) любой, не меньше 2,5 эВ; 2) любой в пределах от 2,5 до 4,5 эВ?

2 На рис. 17 изображены энергетические уровни атома: E_1 , E_2 , E_3 и E_4 , а также длины волн для фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах с одного уровня на другой: $\lambda_{13} = 300$ нм, $\lambda_{24} = 400$ нм, $\lambda_{32} = 500$ нм. Определить минимальную длину волны фотонов, излучаемых атомом при всех возможных переходах между этими уровнями?

3 На рис. 18 изображены энергетические уровни электронной оболочки атома, а также указаны частоты света, излучаемого и поглощаемого при переходах между уровнями. Определить частоту ν_{13} , если $\nu_{24} = 4,5 \cdot 10^{14}$ Гц, $\nu_{32} = 3,5 \cdot 10^{14}$ Гц, а при переходе с уровня E_4 на уровень E_1 излучается свет длиной волны $\lambda = 360$ нм?

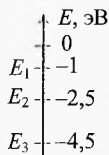


Рис. 16. Энергетические уровни атома

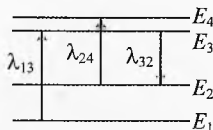


Рис. 17. Энергетические уровни атома

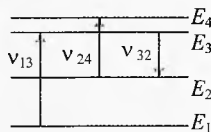


Рис. 18. Энергетические уровни атома

4 Атом позитрония состоит из электрона и позитрона, обращающихся вокруг их общего центра масс. Масса позитрона равна массе электрона. Заряд позитрона равен заряду электрона, но противоположен по знаку. Найти диаметр позитрония. Сравнить его с диаметром атома водорода.

5 При переходе атома водорода со второго энергетического уровня на первый испускается фотон. Этот фотон попадает на поверхность фотокатода и выбивает фотозлектрон. Определить максимально возможную скорость фотозлектрона. Красной границе фотоэффекта для материала поверхности фотокатода соответствует частота света, $\nu_{кр} = 6 \cdot 10^{14}$ Гц. Уровни энергии электрона в атоме водорода задаются формулой $E_n = \frac{-13,6 \text{ эВ}}{n^2}$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д.

6 Фотокатод освещается светом. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле индукцией $B = 2 \cdot 10^{-4}$ Тл перпендикулярно линиям индукции этого поля и движутся по окружности максимального радиуса $R = 20$ мм. Определить частоту падающего света? Работа выхода $A_{\text{в}} = 4,42 \cdot 10^{-19}$ Дж.

7 Определить кинетическую, потенциальную и полную энергию электрона в атоме водорода на орбите радиусом $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м.

8 Вычислить радиус боровской круговой орбиты электрона в атоме водорода для $n = 1000$ и частоты электромагнитного излучения, испускаемого при переходе с тысяча первой круговой орбиты на тысячную. Пояснить, почему атомы водорода в таких состояниях обычно не наблюдаются.

Решения, указания и ответы для самоконтроля

1 Только 2 эВ при переходе на уровень с энергией E_3 .

2 $\frac{h \cdot c}{\lambda_{13}} = E_3 - E_1$, $\frac{h \cdot c}{\lambda_{24}} = E_4 - E_2$, $\frac{h \cdot c}{\lambda_{32}} = E_3 - E_2$. Минимальная длина волны

будет при максимальной разности энергий уровней: $\frac{h \cdot c}{\lambda_{\min}} = E_4 - E_1$; \Rightarrow

$$\frac{h \cdot c}{\lambda_{\min}} = (E_3 - E_1) + (E_4 - E_2) - (E_3 - E_2), \quad \frac{1}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{\lambda_{13}} + \frac{1}{\lambda_{24}} - \frac{1}{\lambda_{32}}, \quad \lambda_{\min} = 261 \text{ (нм)}.$$

3 $h \cdot \nu_{13} = E_3 - E_1$, $h \cdot \nu_{24} = E_4 - E_2$, $h \cdot \nu_{32} = E_3 - E_2$, $\frac{h \cdot c}{\lambda} = E_4 - E_1$; \Rightarrow

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = h\nu_{13} + h\nu_{24} - h\nu_{32}; \quad \Rightarrow \quad \nu_{13} = \frac{c}{\lambda} - \nu_{24} + \nu_{32} = 7,3 \cdot 10^{14} \text{ (Гц)}.$$

4 Правило квантования для системы из двух частиц гласит, что суммарный момент импульса системы (например, электрон-протон или электрон-позитрон) кратен \hbar : $m_1 \nu_1 r_1 + m_2 \nu_2 r_2 = n \cdot \hbar$, где r_1 и r_2 – расстояние от каждой частицы до центра масс. Суммарный импульс системы равен нулю, значит $m_1 \nu_1 = m_2 \nu_2$, тогда для минимального расстояния ($n = 1$): $m_1 \nu_1 (r_1 + r_2) = \hbar$. По II закону Ньютона: $m_1 a_{r1} = F$,

$$m_1 \cdot \frac{\nu_1^2}{r_1} = \frac{ke^2}{(r_1 + r_2)^2}. \quad \text{Итак, } r_1 = \frac{m_2^2 \nu_1^2 (r_1 + r_2)^2}{m_1 ke^2} = \frac{\hbar^2}{m_1 ke^2}. \quad \text{Аналогично, } r_2 = \frac{\hbar^2}{m_2 \cdot ke^2}.$$

Найдём радиусы вращения электрона и протона в атоме водорода (H): $r_1 = \frac{\hbar^2}{m_e \cdot ke^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $r_2 = \frac{\hbar^2}{m_p \cdot ke^2} = 2,9 \cdot 10^{-14} \text{ м}$.

Видно, что в атоме водорода (рис. 19а) электрон вращается вокруг практически неподвижного протона по круговой орбите диаметром $d_H \approx 2r_1 = 1,06 \text{ \AA}$.

У позитрония (Ps) электрон и позитрон одинаковы по массе, значит, они вращаются вокруг общего центра на одинаковом расстоянии (рис. 19б):

$r_1 = r_2 = \frac{\hbar^2}{m_e \cdot ke^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Значит, диаметр атома позитрония равен расстоянию между частицами: $d_{Ps} = r_1 + r_2 = 1,06 \text{ \AA}$.

Таким образом, у позитрония частицы находятся на расстоянии вдвое больше, чем у водорода, однако диаметр атома позитрония совпадает с диаметром атома водорода.

5 $h\nu = E_2 - E_1$, $h\nu = A_n + \frac{m\nu^2}{2}$, $h\nu_{\text{кр}} = A_n$, $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$, $E_2 = -3,4 \text{ эВ}$; \Rightarrow

$$\nu = \sqrt{\frac{2((E_2 - E_1) - h\nu_{\text{кр}})}{m}} = 1,65 \text{ Мм/с}.$$

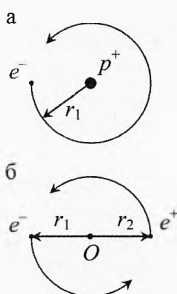


Рис. 19. Водород и позитроний

$$\mathbf{6} \quad h\nu = A_B + \frac{m\nu^2}{2}; \quad ma_n = F_n; \quad a_n = \frac{\nu^2}{R}; \quad F_n = e\nu B; \Rightarrow$$

$$\nu = \frac{1}{h} \left(A_B + \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot R^2}{2m} \right) = 10^{15} \text{ (Гц)}.$$

$$\mathbf{7} \quad E_n = -\frac{k \cdot e^2}{r} = -27,2 \text{ (эВ)}; \quad m_e a_n = F_s, \quad a_n = \frac{\nu^2}{r}, \quad F_s = \frac{k \cdot e^2}{r^2},$$

$$E_k = \frac{m_e \nu^2}{2}; \Rightarrow E_k = \frac{k \cdot e^2}{2r} = +13,6 \text{ (эВ)}. \quad E = E_k + E_n = -\frac{k \cdot e^2}{2r} = -13,6 \text{ (эВ)}.$$

$\mathbf{8} \quad r_n = r_1 \cdot n^2 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ (м)} \cdot 1000^2 = 53 \text{ (мкм)}.$ На таком большом расстоянии электрон уже практически не взаимодействует с ядром и легко отрывается.

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right) = 6,57 \text{ (МГц)}, \text{ где } R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц} - \text{постоянная Ридберга}.$$

Глава 4. Атомное ядро

*Как много дел считалось невозможным,
пока они не были осуществлены.*

Гай Плиний Секунд Старший

§ 23. Радиоактивные превращения

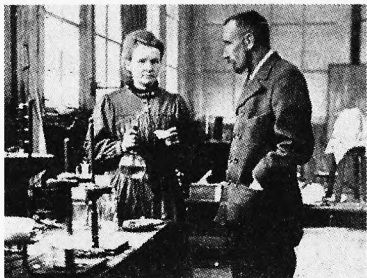
Открытие Беккерелем естественной радиоактивности урана подтолкнуло учёных проверить, не обладают ли другие химические элементы способностью к самопроизвольному излучению. Наибольших успехов в этом вопросе достигла подданная Российского государства, полячка Мария Склодовская, родившаяся в Варшаве. В 1891–1894 гг. она училась в Краковском университете и окончила его, получив два диплома: по физике в 1893 г. и по математике в 1894 г. В 1895 г. французский физик Пьер Кюри добился её руки и сердца. С того же года Мария Склодовская-Кюри стала работать в его лаборатории – школе физики и химии, в Париже.

В 1897 г. она начала исследование солей урана и пришла к выводу, что радиоактивность является свойством самих атомов урана, а не его соединений. В 1898 г. доказала наличие радиоактивности у тория и заметила, что радиоактивность у некоторых минералов, содержащих уран и торий, намного интенсивнее, чем можно было бы ожидать. Поэтому она предположила, что эти минералы (урановая смоляная руда, хальковит и аутонит) содержат неизвестный радиоактивный элемент, отличный от урана и тория. Его поиски в урановой смолке провела совместно с мужем П. Кюри. Используя разработанный ими метод обогащения активным веществом, они пришли к выводу, что в урановой смолке присутствуют два неизвестных радиоактивных элемента. В результате напряжённого кропотливого труда по переработке больших количеств урановой смолки с целью увеличения концентрации активного вещества в июле 1898 г. они открыли один из этих элементов – полоний, названный в честь её малой родины – Польши; а в декабре открыли второй элемент – радий (лат. radium – лучистый, от лат. radius – луч).

В 1902 г. она получила несколько дециграммов чистой соли радия, а в 1910 г. вместе с французским химиком Андре Дебьёрном – металлический радий. Она определила его атомную массу и место в таблице Менделеева. В 1903 г. за исследования явления радиоактивности супруги Кюри и А. Беккерель удостоены Нобелевской премии по физике. А в 1911 г. М. Склодовская-Кюри удостоена Нобелевской премии по химии за получение металлического радия (редчайший случай, что Нобелевской премией наградили дважды одного учёного).

Она испытала много элементов на радиоактивность, установила влияние радиоактивного вещества на живую клетку, первая использовала радиоактивные препараты в медицине, ввела термин «радиоактивность». В годы I мировой войны (1914–1918) организовала 220 передвижных и стационарных рентгеновских установок для обслуживания госпиталей Франции. Мария Склодовская-Кюри умерла

от лейкемии (лучевой болезни) в возрасте 67 лет. Это первый официально зарегистрированный в медицине летальный исход от лучевой болезни.



Мария Склодовская (1867–1934)
и Пьер Кюри (1859–1906)



Андре-Луи Дебьёрн
(1874–1949)



Фредерик Содди
(1877–1956)

Что же происходит с веществом при радиоактивном превращении? Теорию радиоактивного распада разработал в 1902–1903 годах Э. Резерфорд совместно с английским физиком и химиком Фредериком Содди. Уже в начале исследований радиоактивности обнаружилось много необычного. В первую очередь удивляло постоянство, с которым радиоактивные элементы излучают независимо от каких-либо воздействий на препараты. Во-вторых, радиоактивные превращения сопровождаются выделением большой энергии. Пьер Кюри поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр, в котором поглощались α -, β - и γ -лучи, и за счёт их энергии нагревалось содержимое калориметра. Кюри определил, что один грамм радия выделял за час около 582 Дж энергии, и такое излучение происходит без подпитки в течение многих лет!

Резерфорд обнаружил, что активность препарата, содержащего торий, определяемая как число α -частиц, испускаемых в единицу времени, зависит от того, находится препарат в закрытой ампуле или обдувается даже очень слабыми потоками воздуха.

Он предположил, что одновременно с α -частицами торий испускает какой-то радиоактивный газ. Отсасывая воздух из ампулы, содержащей торий, Резерфорд выделил радиоактивный газ и исследовал его ионизирующую способность. Оказалось, что радиоактивность этого газа (в отличие от активности тория, урана и радия) очень быстро убывает со временем (уменьшается в два раза за каждую минуту). Содди исследовал химические свойства этого газа. Он оказался инертным и впоследствии был назван *радоном* ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ и помещён в 86 клетку таблицы Менделеева.

Резерфорд сформулировал общий вывод.

Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным изменениям. В каждый момент небольшая часть атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается α -частица с огромной скоростью. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбросом β -частицы (электрона) и появлением лучей, обладающих подобно рентгеновским лучам большой проникающей способностью и называемых γ -излучением.

Образуются новые вещества, которые часто бывают тоже неустойчивыми и снова распадаются.

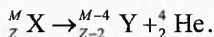
После того как было открыто ядро (1911 г.), сразу стало ясно, что именно оно подвержено радиоактивным превращениям.

Естественная радиоактивность – это самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием разных частиц и выделением большой энергии.

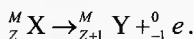
Правило смещения. Содди сформулировал правило смещения, которому подчиняется превращение ядер.

При α -распаде ядро теряет заряд $2e$ и массу приблизительно 4 а.е.м., а новый элемент смещается на две клетки к началу таблицы Менделеева.

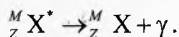
Символически реакцию α -распада можно записать так:



При β -распаде из ядра вылетает электрон, заряд ядра увеличивается на e , а масса почти не меняется:



γ -излучение не сопровождается изменением заряда, а масса изменяется ничтожно мало*:



В этих реакциях распада проявляются законы сохранения.

Закон сохранения барионного заряда (верхние индексы) – суммарное массовое число до и после реакции должно сохраняться;

* X^* – ядро атома в возбуждённом состоянии.

Закон сохранения электрического заряда (нижние индексы) – алгебраическая сумма зарядов до и после реакции должна быть одинаковой.

Итак, в 1911 г. стало ясно, что радиоактивные превращения испытывают ядра атомов, а также какие именно частицы вылетает из ядра. Но осталось неизвестным, из чего состоят ядра.

§ 24. Открытие протона и нейтрона. Состав ядра

Протон. Первую частицу, входящую в состав ядра, открыл Резерфорд в 1919 г. Поскольку в его распоряжении в качестве «снарядов» для ядерных исследований по-прежнему были только α -частицы, то с их помощью он продолжал эксперименты, начатые ещё в 1906 г.

В герметичный сосуд (рис. 1) помещался источник альфа-частиц D . Перед источником располагался прозрачный экран F , покрытый сульфидом цинка. При откачивании воздуха из сосуда α -частицы достигали экрана и вызывали световые вспышки (сцинтилляции), которые наблюдались с помощью микроскопа M . Заметим, что при атмосферном давлении α -частицы, пролетев всего 5 см, полностью теряют свою кинетическую энергию из-за взаимодействия с молекулами воздуха.

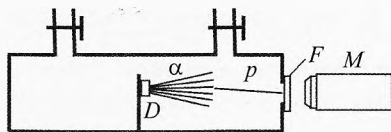
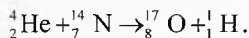


Рис 1. Открытие протона

При заполнении сосуда азотом α -частицы растрчивали свою энергию на ионизацию и возбуждение азота и не достигали экрана. Однако редкие световые вспышки всё же наблюдались. Они вызывались заряженными частицами, появляющимися в результате взаимодействия α -частиц с азотом. Электроны не способны вызвать световую вспышку в кристалле сульфида цинка, видимую в микроскоп. Значит, α -частицы выбивали из ядер азота какие-то другие частицы. Действуя на них электрическим и магнитным полем, обнаружили, что заряд такой частицы положителен и равен элементарному заряду, а масса почти равна массе атома водорода ${}^1_1\text{H}$. Значит, эти частицы – ядра самого легкого изотопа* водорода. Их назвали *протонами* (от греч. *protos* – первый).

* **Изотопы** (от греч. *isos* – одинаковый и *topos* – место), разновидности одного химического элемента, занимающие одно место в периодической таблице Менделеева, то есть имеющие одинаковый заряд ядра, но отличающиеся массами атомов. Ядра всех изотопов данного элемента содержат одинаковое количество протонов, но различное число нейтронов.

Уравнение этой ядерной реакции:



Затем Резерфорд продолжил опыты, заполняя сосуд поочередно: бором, фтором, неоном и другими газами. Обнаружилось, что во всех случаях α -частицы выбивают протоны. Отсюда следует естественный вывод:

|| Ядра всех атомов содержат протоны.

Согласно современным измерениям, заряд протона равен элементарному:

$$q_p = e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

а масса протона:

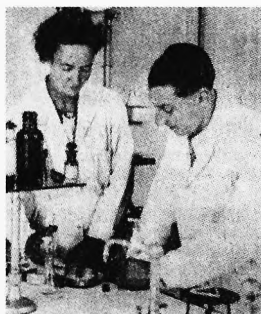
$$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276470 \text{ а.е.м.}$$

Открытие нейтрона. После открытия протона стало ясно, что в ядре кроме протонов находятся ещё какие-то частицы, так как масса ядер оказалась существенно превышающей суммарную массу протонов, число которых равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева. Например, масса урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ почти в 2,6 раза больше суммарной массы 92-х протонов, входящих в его состав.

В 1920 г. Резерфорд высказал гипотезу, согласно которой в ядре кроме протона существует ещё нейтральная частица массой, приблизительно равной массе протона. Эту предполагаемую частицу он назвал нейтроном (от лат. *neutron* – ни тот, ни другой, то есть и без положительного, и без отрицательного электрического заряда).



Вальтер Вильгельм
Георг Боте
(1891–1957)



Фредерик Жолио-Кюри
(1900–1958) и Ирен
Жолио-Кюри (1897–1956)



Джеймс Чедвик
(1891–1974)

Открытие нейтрона произошло после серии экспериментов. Сначала в 1930 г. немецкий физик Вальтер Боте и его студент Герберт Беккер (р. 1906), облучая α -частицами ряд элементов, в частности бериллий, обнаружили

неизвестное излучение, способное проходить через толстые слои свинца с меньшим ослаблением, чем рентгеновское или γ -излучение.

Далее в 1932 г. дочь супругов Кюри, Ирен, вместе с мужем Фредериком Жолио-Кюри установили, что излучение, возникающее при облучении бериллиевой пластины α -частицами, выбивает из парафина протоны, то есть ядра атомов водорода (рис. 2).

В том же году английский физик-экспериментатор Джеймс Чедвик, исследуя излучение, возникающее при облучении бериллия α -частицами, показал, что оно является потоком электрически нейтральных частиц – нейтронов (Нобелевская премия 1935 г.).

Так была раскрыта загадка бериллиевого излучения. Опыты Фредерика и Ирен Жолио-Кюри сыграли при этом решающую роль.

В 1934 г. Фредерик и Ирен Жолио-Кюри показали, что масса нейтрона несколько больше массы протона. По современным измерениям масса нейтрона:

$$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008664902 \text{ а.е.м.}$$

Масса нейтрона больше массы протона на 2,53 массы электрона.

Протонно-нейтронная модель ядра атома. В 1932 г. после открытия нейтрона советский физик-теоретик Д. Д. Иваненко предложил протонно-нейтронную модель ядра атома, рассматривая нейтрон как элементарную частицу. Вслед за ним к протонно-нейтронной модели ядра пришёл немецкий физик Вернер Гейзенберг и показал, что ядерные силы имеют свойство насыщения. То есть каждый протон и нейтрон осуществляют ядерное взаимодействие не со всеми протонами и нейтронами ядра, а только с ближайшими соседями.

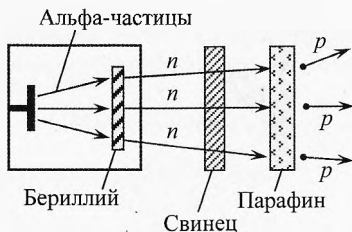


Рис. 2. Открытие нейтрона



Дмитрий
Дмитриевич
Иваненко
(1904–1994)

Протон и нейтрон принято считать разными зарядовыми состояниями одной и той же частицы – нуклона (от лат. *nucleus* – ядро).

Между нуклонами в ядре наблюдается ядерное взаимодействие. Ядерные силы являются короткодействующими и проявляются на расстоянии порядка 10^{-15} м. А между протонами ядра действует ещё кулоновская сила отталкивания. Причём каждый протон отталкивается электрической силой от всех остальных протонов в ядре, а удерживает его в ядре сила притяжения, которой он взаимодействует лишь с несколькими соседними нуклонами.

Ядерное взаимодействие экспериментально обнаружил Резерфорд ещё в 1915 г. в опытах по бомбардировке лёгких ядер α -частицами. В частности, при бомбардировке ядер атома водорода (протонов) α -частицы испытывали кулоновское отталкивание от протонов свыше 3 фм ($3 \cdot 10^{-15}$ м). На меньших расстояниях пролета от протона наблюдалось притяжение α -частиц к протону. Нейтрон же начинает притягиваться к протону, находясь от него на расстоянии 2 фм. На расстоянии менее 0,4 фм действуют мощные силы ядерного отталкивания между нейтроном и протоном.

Приведём такой пример: быстрый нейтрон с энергией 3 МэВ, попав в воду и влетая в атом, сначала притягивается ядерной силой, а затем отталкивается ядерной силой, теряя часть энергии. В среднем через 18 столкновений он становится тепловым нейтроном с энергией 0,025 эВ.

Состав ядра. В простейшем атоме водорода ${}^1_1\text{H}$ ядро состоит из протона, вокруг которого движется электрон. Ядро такого атома стабильно. В электронной оболочке гелия находятся два электрона, а устойчивое ядро состоит из двух протонов и двух нейтронов. Силы их ядерного притяжения между собой компенсируют кулоновское отталкивание протонов. Подобное парное размещение нуклонов соответствует максимальному заполнению энергетических уровней. Энергия ядер, как и атомов, квантуется, поэтому энергетический спектр ядер дискретен. В случае нечётного числа протонов или нейтронов в ядре неспаренный нуклон может занять лишь более высокий энергетический уровень. Ядра с нечётными числами Z и N (нечётно-нечётные ядра) обладают большей энергией, поэтому они менее стабильные, чем чётно-чётные ядра. Существует всего четыре стабильных нечётно-нечётных ядра: ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$ и ${}^{14}_7\text{N}$, для которых $Z = N$.

Нечётно-чётных стабильных ядер не существует вообще. Нечётно-чётные ядра состоят из нечётного числа протонов и чётного числа нейтронов, и наоборот.

Наиболее стабильными являются чётно-чётные ядра, состоящие из чётного числа и протонов и нейтронов. Известно около 160 стабильных чётно-чётных ядер. Особо устойчивы чётно-чётные «магические» ядра, у которых число Z протонов или N нейтронов равно одному из следующих чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Сами эти числа также называются магическими. Они отражают периодичность заполнения нуклонами энергетических оболочек ядра, аналогично периодичности заполнения электронами электронных оболочек атомов (отражённой в периодической системе Менделеева).

Устойчивые магические ядра аналогичны атомам инертных газов, характеризующихся химической пассивностью, связанной с небольшой энергией связи валентных электронов. Хотя число электронов в инертных газах (2, 10, 18, 36, 54, 86) отличается от магических чисел.

Максимально устойчивы и поэтому наиболее распространены в природе элементы с дважды магическими ядрами: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Особая прочность дважды магического ядра ${}^4_2\text{He}$ проявляется, в частности, в том, что такие ядра (α -частицы) испускаются при радиоактивном распаде тяжёлых ядер.

Очень широко распространён в природе также водород ${}^1_1\text{H}$, поскольку протон стабилен и может существовать вечно, если не испытает ядерного взаимодействия с другой частицей.

Размеры атомных ядер. Согласно капельной модели, ядра нуклоны расположены в нём вплотную. Радиус ядра водорода ${}^1_1\text{H}$ (протона) примем равным r_0 . Оценим радиус R ядра с массовым числом A :

$$V_{\text{ядра}} = A \cdot V_p \quad \text{или} \quad \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi \cdot r_0^3 \cdot A \Rightarrow \boxed{R \approx r_0 \cdot \sqrt[3]{A}}$$

Эксперименты показывают, что классический радиус протона $r_0 = 1,2$ фм. Значит, для урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ радиус ядра $R = 1,2 \cdot \sqrt[3]{238} = 7,4$ (фм).

На рис. 3 изображены относительные размеры ядер водорода, гелия, кислорода, серебра и урана.

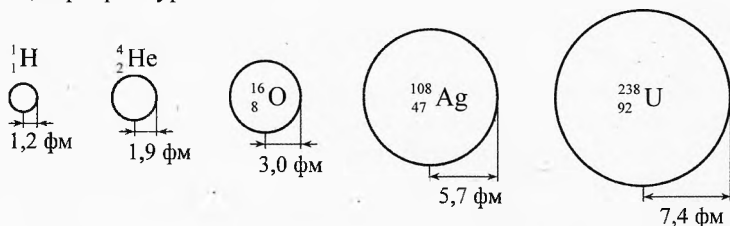


Рис. 3. Относительные размеры ядер

Пример 1. Оценить плотность ядерного вещества.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \text{Решение. } \rho_{\text{я}} &= \frac{m_{\text{ядра}}}{V_{\text{ядра}}} = \frac{A \cdot 1 \text{ а.е.м.}}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_0^3 \cdot A} = \frac{1 \text{ а.е.м.}}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_0^3}, \\ \rho_{\text{я}} &= \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{\frac{4}{3} \pi \cdot (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м})^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

✓ **Ответ.** Плотность ядерного вещества $\rho_{\text{я}} \approx 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$.

Сравним плотность ядерного вещества с плотностью одного из самых тяжёлых элементов, осмия ($\rho_{\text{ос}} \approx 2,3 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$):

$$\rho_{\text{я}} : \rho_{\text{ос}} = 10^{13}.$$

То есть ядерное вещество плотнее осмия в 10 триллионов раз! Масса одного кубического миллиметра ядерного вещества составляет 230 миллионов кг. Из ядерного вещества состоят нейтронные звезды – гигантские ядра, удерживаемые гравитационным притяжением.

Пример 2. Оценить диаметры ядер железа, серебра и свинца.

→ **Решение.** Согласно формуле $R \approx r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$, учитывая, что диаметр ядра вдвое больше радиуса, получим: $d \approx 2r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$

Для железа ($A_1 = 56$):

$$d_1 \approx 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{56} = 9,2 \cdot 10^{-15} (\text{м}) = 9,2 (\text{фм}).$$

Для серебра ($A_2 = 108$):

$$d_2 \approx 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{108} = 11,4 \cdot 10^{-15} (\text{м}) = 11,4 (\text{фм}).$$

Для свинца ($A_3 = 207$):

$$d_3 \approx 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{207} = 14,2 \cdot 10^{-15} (\text{м}) = 14,2 (\text{фм}). \leftarrow$$

✓ **Ответ.** Диаметры ядра железа 9,2 фм, серебра – 11,4 фм, свинца – 14,2 фм.

§ 25. Закон радиоактивного распада

Период полураспада. Исследуя превращения радиоактивных веществ, Резерфорд опытным путём установил, что активность распада, то есть число распадов ядер за одну секунду

$$A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|,$$

убывает с течением времени. Так, активность радона-220 убывает в два раза за 1 минуту. Активность урана, радия и плутония тоже убывает со временем, но гораздо медленнее, причём у всех с разной скоростью.

Для каждого радиоактивного вещества существует промежуток времени, в течение которого активность уменьшается в 2 раза. Этот промежуток времени называется периодом полураспада.

Период полураспада T – это промежуток времени, в течение которого распадается половина радиоактивных ядер от имевшихся в начальный момент в данном теле (образце, препарате).

За следующий период полураспада распадается половина от оставшейся половины радиоактивных ядер.

Итак, если в начальный момент времени при $t_0 = 0$ было N_0 радиоактивных ядер в данном образце, то:

$$\text{через } t_1 = T \text{ их останется } N_1 = \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{2^1},$$

$$\text{через } t_2 = 2T \text{ их останется } N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2},$$

$$\text{через } t_3 = 3T \text{ их останется } N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{2^3},$$

$$\text{через } t_4 = 4T \text{ их останется } N_4 = \frac{N_3}{2} = \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{2^4}.$$

Через произвольный промежуток времени $t = n \cdot T$ число оставшихся радиоактивных ядер будет равно:

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad \text{или} \quad N = N_0 \cdot 2^{-n},$$

где $n = \frac{t}{T}$ – число прошедших периодов полураспада, которое может быть как целым, так и дробным.

Окончательно получим:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Это и есть **закон радиоактивного распада**, где N_0 – число радиоактивных ядер в начальный момент времени t_0 , а N – в произвольный момент времени t (рис. 4).

Этот закон является статистическим. Он справедлив для больших чисел, то есть верен до тех пор, пока число нераспавшихся ядер остается достаточно большим.

Активность радиоактивного источника. Что такое активность образца и от чего она зависит?

Активность радиоактивного источника характеризует частоту самопроизвольных ядерных распадов в данном источнике. Она равна отношению числа распавшихся радиоактивных ядер ко времени, за которое эти распады произошли:

$$A = \frac{\Delta N_{\text{расп}}}{\Delta t}, \quad [A] = \text{Бк}.$$

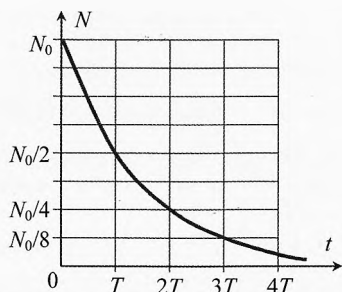


Рис. 4. Закон радиоактивного распада

В системе единиц СИ активность радиоактивного вещества измеряется в *беккерелях* (Бк). 1 Бк – активность радиоактивного источника, при которой за одну секунду распадется одно ядро.

Активность одного грамма радия равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. Эта величина на практике часто используется в качестве самостоятельной единицы измерения активности – *кюри* (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Очевидно, что чем больше радиоактивных ядер в образце, тем активность образца больше, так как чем больше имеется радиоактивных ядер, тем больше за секунду их распадается.

Если же в двух образцах содержится одинаковое число радиоактивных ядер, но период полураспада у первого образца больше, то у него за секунду будет распадаться меньше ядер, чем у второго.

Получим математическое выражение для активности распада образца.

В процессе радиоактивного распада количество нераспавшихся ядер уменьшается, значит, активность образца равна скорости уменьшения количества нераспавшихся ядер:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad \text{или} \quad A = -N'.$$

где $dN < 0$ – изменение числа радиоактивных ядер за малый промежуток времени dt .

Используя закон радиоактивного распада для числа нераспавшихся ядер, получим:

$$A = -N' = -\left(N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}\right)' = \frac{N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot \ln 2}{T} = \frac{N \cdot \ln 2}{T}.$$

Итак, активность источника прямо пропорциональна числу радиоактивных ядер, имеющих в образце в данный момент времени, и обратно пропорциональна периоду полураспада данного радиоактивного вещества:

$$A = \frac{N \cdot \ln 2}{T}, \quad \text{или} \quad A \approx \frac{0,693 \cdot N}{T}, \quad \text{или} \quad A \approx \frac{N}{1,44 \cdot T}.$$

Промежуток времени $\tau_{\text{ср}} = 1,44 \cdot T$ равен среднему времени жизни радиоактивного изотопа.

Пример 3. Определить среднее время жизни ядер радиоактивного вещества с периодом полураспада T .

Решение. В очередной промежуток времени dt осталось не распавшихся ядер $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$. Тогда среднее арифметическое время жизни ядра можно посчитать как суммарное время жизни всех ядер, деленное на общее количество ядер:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{\infty} N \cdot dt}{N_0} = \frac{\int_0^{\infty} N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot dt}{N_0} = \int_0^{\infty} 2^{-\frac{t}{T}} \cdot dt = \frac{T}{\ln 2} \cdot \left(-2^{-\frac{t}{T}} \right) \Big|_0^{\infty}$$

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{T}{\ln 2} \cdot ((-2^{-\infty}) - (-2^0)) = \frac{T}{\ln 2} \cdot (0 - (-1)), \quad \boxed{\tau_{\text{ср}} = \frac{T}{\ln 2} \approx 1,44 \cdot T} \leftarrow$$

✓ **Ответ.** Среднее время жизни ядра равно $1,44 \cdot T$. Оно также равно периоду, за который количество не распавшихся ядер уменьшается в e ($\approx 2,72$) раз.

Постоянная распада. Существует ли очередность распада ядер в образце? Какие ядра распадаются раньше, а какие позже?

Оказывается, что все радиоактивные ядра данного изотопа одинаковы. Поэтому вероятность распада для каждого из них одинакова в каждую секунду. То есть распад ядра не есть неотвратимая необходимость данного момента, а скорее «несчастный случай» в его жизни. Он может сейчас распасться, а может прожить в образце неопределённо долго без распада.

Вероятность распада одного ядра данного изотопа за одну секунду называется постоянной распада и обозначается буквой λ .

Для любого ядра данного изотопа постоянная распада одинакова. Для ядер различных изотопов постоянная распада различна.

Пусть в образце имеется N атомов радиоактивного вещества. Вероятность распада равна части атомов $\left| \frac{dN}{N} \right|$ образца, которая распадётся за единицу времени:

$$\lambda = - \frac{dN}{N \cdot dt}.$$

Знак « $-$ » в уравнении указывает на убывание числа радиоактивных ядер данного изотопа с течением времени ($dN < 0$).

Из этой формулы следует, что доля распавшихся ядер равна произведению постоянной распада на малый промежуток времени, за который они распались:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt.$$

Проинтегрируем от начального до произвольного момента времени:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \quad \text{или} \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}.$$

Мы получили второй вариант записи закона радиоактивного распада:

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

Через время, равное периоду полураспада $t_1 = T$, количество оставшихся ядер будет равно $N_1 = N_0 / 2$, значит:

$$N_0 / 2 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad \text{или} \quad 2^{-1} = e^{-\lambda \cdot T}.$$

Прологарифмируем последнее выражение:

$$-\ln 2 = -\lambda \cdot T \quad \text{или} \quad \ln 2 = \lambda \cdot T.$$

Отсюда видно, что постоянная распада обратно пропорциональна периоду полураспада:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad \text{или} \quad \lambda \approx \frac{0,693}{T} \quad \text{или} \quad \lambda \approx \frac{1}{1,44 \cdot T}.$$

Сравнивая эти формулы с полученной ранее $A = \frac{N \cdot \ln 2}{T}$, видим, что активность образца равна произведению постоянной распада λ и числа радиоактивных ядер N в образце в данный момент:

$$A = \lambda \cdot N.$$

✍ **Пример 4.** Существует два радиоактивных изотопа радона: $^{220}_{86}\text{Rn}$ с периодом полураспада 55 с и $^{222}_{86}\text{Rn}$ с периодом полураспада около 3,8 суток. Определить постоянную распада для этих изотопов.

✓ **Ответ.** $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$; $\lambda_1 = 0,0126 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2 = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Это означает, то из тысячи ядер радона $^{220}_{86}\text{Rn}$ за одну секунду распадается в среднем 13 ядер, а из миллиона ядер радона $^{222}_{86}\text{Rn}$ распадается в среднем 2 ядра в секунду.

✍ **Пример 5.** При взрыве четвертого блока Чернобыльской АЭС в 1986 г. произошла утечка в том числе плутония. Через какой промежуток времени активность заражённой плутонием местности уменьшится в 16 раз? Период полураспада плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$ равен $T = 24 \cdot 10^3$ лет.

➡ **Решение.** Активность выбросов радиоактивного вещества, например в Брянской области, прямо пропорциональна числу радиоактивных ядер:

$$A = \lambda \cdot N.$$

По закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Значит, активность уменьшается по такому же закону:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

По условию $A = \frac{A_0}{16}$, значит:

$$\frac{1}{16} = 2^{-\frac{t}{T}} \quad \text{или} \quad 2^{-4} = 2^{-\frac{t}{T}} \Rightarrow t = 4 \cdot T = 96 \cdot 10^3 \text{ лет.} \quad \blacktriangleleft$$

✓ **Ответ.** Активность радиационного заражения плутонием $^{239}_{94}\text{Pu}$ уменьшится в 16 раз примерно через сто тысяч лет.

Следует отметить, что суммарная активность выброшенных в результате чернобыльской аварии радиоактивных изотопов плутония относительно

невелика. В настоящее время (и в ближайшие десятилетия) наибольшую опасность представляют изотопы стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$ и цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$ с периодом полураспада около 30 лет. Активность этих изотопов уменьшится в 16 раз через 120 лет.

§ 26. Стабильные и нестабильные ядра

Почему одни ядра устойчивы, а другие – нет?

*Атомные ядра, состоящие из одинакового числа нуклонов при различном соотношении числа протонов и нейтронов, называются **изобарами**, то есть одинаковыми по тяжести.*

Например, с числом нуклонов 10 существует только один стабильный изобар – изотоп бора $^{10}_5\text{B}$. Его ближайшие изобары (бериллий $^{10}_4\text{Be}$ и углерод $^{10}_6\text{C}$) являются нестабильными и самопроизвольно превращаются в другие ядра.

Что же является причиной нестабильности остальных изобарных ядер? Оказывается, что принцип, определяющий стабильность ядер, прост!

Устойчивыми являются лишь ядра с минимальной энергией по сравнению со всеми ядрами, в которые данное ядро может самопроизвольно превратиться.

Различие в энергии атомных ядер изобаров обусловлено различием в массах протонов и нейтронов, а также наличием у протонов электрического заряда.

Ядра, в которых протонов больше, чем нейтронов, нестабильны из-за избытка кулоновского отталкивания. Ядра, которые содержат большой избыток нейтронов над числом протонов, нестабильны потому, что масса нейтрона больше массы протона. Ведь увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии.

Ядра с избыточной энергией могут освобождаться от избытка энергии либо при самопроизвольном делении ядра на более устойчивые части (например, при α -распаде), либо при самопроизвольном изменении заряда (при β -распаде, то есть при испускании ядром электрона или позитрона).

§ 27. Энергия связи ядра

Ядерные силы. В ядрах атомов находятся нуклоны (протоны и нейтроны). Сила электростатического отталкивания протонов составляет сотни, а у тяжёлых ядер – даже тысячи ньютонов. Какие же силы удерживают протоны в ядре? Удерживает их так называемое ядерное взаимодействие, попросту – ядерная сила.

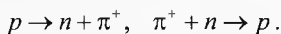
Экспериментальное определение сил ядерного взаимодействия у пар протон-протон, протон-нейтрон и нейтрон-нейтрон показало, что ядерное взаимодействие одинаково, то есть ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия у частицы электрического заряда.

Свойство насыщения ядерных сил указывает на возможную природу ядерных сил как сил обменного типа. Японский физик Хидэки Юкава* в 1935 г. показал, что все основные свойства ядерных сил можно объяснить, приняв, что нуклоны обмениваются между собой частицами массой, несколько превышающей 200 электронных масс. Такие частицы были обнаружены экспериментально в 1947 г. Они называются *пи-мезонами*, или *пионами*.



Хидэки Юкава
(1907–1981)

Существует три вида пи-мезонов: положительные и отрицательные пи-мезоны с зарядами $+e$ и $-e$ соответственно и массой $274m_e$, а также нейтральный пи-мезон массой $264m_e$. Пи-мезоны не являются составными частями протонов и нейтронов. Они испускаются и поглощаются при взаимодействии нуклонов. Например, протон испускает π^+ (положительно заряженный виртуальный** пион), превращаясь в нейтрон. Этот π^+ пион тут же поглощается нейтроном, и они превращаются в протон (рис. 5):



При этом за пределы ядра ничего не излучается.

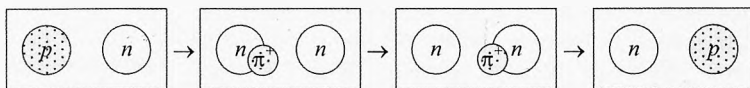


Рис. 5. Протон и нейтрон обмениваются пионом

Таким образом, пионы являются квантами поля ядерных сил (сильного взаимодействия) или квантами ядерного поля.

Возможны четыре типа обмена пионами:

$$p = p + \pi^0, \quad n = n + \pi^0, \quad p = n + \pi^+, \quad n = p + \pi^-.$$

Все эти обменные процессы обеспечивают сильное взаимодействие между нуклонами и тем самым – устойчивость ядра.

* В 1949 г. за предположение существования мезонов и теоретические исследования природы ядерных сил Юкава присуждена Нобелевская премия. Он был первым японцем, получившим Нобелевскую премию.

** Термин «виртуальный» означает, что это – такая частица, которой нет, но она может появиться на некоторое время, и практически сразу исчезнуть.

Энергия связи. Лирическое отступление. По четвергам группой из нескольких семей мы ходим в сауну с бассейном. Как-то, сидя там за чайным столом, наш приятель, профессор физики В. С. Аbruков, посетовал на студентов, что они слабо разбираются в вопросах об энергии связи в ядре атома, и проиллюстрировал примером. На что я ответил: это легко понять, ведь энергия связи – отрицательная величина. Он же сказал, что студенты об этом не знают, т.к. в учебниках об этом умалчивается. Попробуем устранить этот методический пробел и подробно рассмотрим данный вопрос.

Как известно, энергия – это скалярная величина, являющаяся наиболее общей мерой движения и взаимодействия материи. Её можно представить в виде двух компонентов: кинетической и потенциальной энергии.

Кинетическая энергия обусловлена движением тела в данной системе отсчёта. Кинетическая энергия всегда положительна и равна $E_k = \frac{mv^2}{2}$. При торможении до остановки это тело совершит над внешними телами положительную работу, равную $\frac{mv^2}{2}$.

Потенциальная энергия является наиболее общей мерой взаимодействия материи в поле консервативных сил.

Например, потенциальная энергия тела, обусловленная силой тяжести, вблизи поверхности Земли равна $E_{\tau} = mgy$. При этом ось Y должна быть направлена вертикально вверх. В первом положении (рис. 6) энергия тела положительна в данной системе отсчёта. А во втором положении – отрицательна. Почему? Потенциальная энергия равна работе, которую совершит сила (в нашем случае сила тяжести) при переходе из данного уровня на нулевой уровень, то есть в положении, где $y=0$.

При переходе из первого положения ($y_1 > 0$) на нулевой уровень сила тяжести совершит положительную работу:

$$A_1 = \vec{F}_{\tau} \cdot \vec{S}_1 \cdot \cos \alpha_1 = mg \cdot y_1, \quad A_1 > 0,$$

где $\alpha_1 = 0$ – угол между \vec{F}_{τ} и \vec{S}_1 , значит, первоначальный запас потенциальной энергии был положительным.

Если же тело перевести из второго положения ($y_2 < 0$) на нулевой уровень, то сила тяжести совершит отрицательную работу:

$$A_2 = \vec{F}_{\tau} \cdot \vec{S}_2 \cdot \cos \alpha_2 = mg \cdot y_2, \quad A_2 < 0,$$

где $\alpha_2 = 180^\circ$, значит, в этом случае первоначальный запас потенциальной энергии был отрицательным.

Энергия связи атомов. Теперь рассмотрим энергию связи атома водорода. Потенциальная (электрическая) энергия взаимодействия электрона с

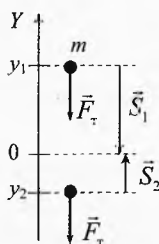


Рис. 6. Потенциальная энергия силы тяжести

ядром отрицательна: $E_3 = -\frac{ke^2}{r}$. На первой орбите она равна $E_{31} = -27,2$ эВ.

Значит, при переходе на нулевой уровень (на расстояние, при котором протон и электрон практически не притягиваются) кулоновская сила совершит отрицательную работу, равную $A_1 = -27,2$ эВ, то есть кулоновская сила будет препятствовать удалению электрона от протона.

Кинетическая энергия электрона положительна и равна $E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{ke^2}{2r} = \frac{|E_3|}{2}$. На первой орбите равна $E_k = +13,6$ эВ. Она способствует удалению электрона от протона, но он удерживается на орбите благодаря кулоновской силе.

Энергия системы электрон–протон равна:

$$E = E_3 + E_k = -\frac{ke^2}{2r}, \quad E = -13,6 \text{ эВ.}$$

По сути, это и есть энергия связи, которая не позволяет распасться атому. Если атом поглотит фотон такой энергии или большей, то произойдет ионизация атома. Электрон улетит от протона (возможно, навсегда).

Что происходит при такой ионизации атома? Электрическое поле совершает отрицательную работу, равную $-27,2$ эВ, препятствующую ионизации. А наличие кинетической энергии $+13,6$ эВ, наоборот, способствует ионизации. Поэтому минимальная энергия, необходимая для ионизации невозбуждённого атома водорода, равна $+13,6$ эВ. Она равна модулю энергии связи электрона с ядром. Во всех учебниках, где изображают диаграммы энергетических уровней атома водорода, энергия атома (энергия связи) рассматривается как отрицательная энергия. А когда речь заходит об энергии связи в ядре, то авторы учебников забывают обратить на это внимание.

Энергия связи нуклонов в ядре. Точные измерения масс атомных ядер с помощью масс-спектрографов показали, что масса любого ядра, содержащего Z протонов и N нейтронов, меньше суммы масс такого же числа протонов и нейтронов:

$$m_a < Z \cdot m_p + N \cdot m_n.$$

Разность между суммой масс нуклонов, из которых состоит ядро, и массой ядра называется дефектом масс Δm :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_a, \quad \Delta m > 0$$

Почему имеет место такой факт, неизвестный человечеству до XX века? Рассмотрим этот вопрос с позиции силы, энергии и теории относительности.

Примем для простоты, что нуклоны в ядре неподвижны. Между протонами действует кулоновская сила взаимного отталкивания. Потенциальная энергия, обусловленная этим взаимодействием, положительна. Если ядро разлетится на свободные нуклоны, то электрическая сила взаимного отталкивания протонов совершит положительную работу.

Пренебрежем силой гравитационного притяжения, ибо она по сравнению с электрической силой ничтожно мала.

Но между нуклонами действует ещё ядерная сила. На расстояниях от 0,5 до 2 фм нуклоны притягиваются друг к другу ядерной силой, которая существенно зависит от расстояния между ними. На расстоянии около 1 фм (10^{-15} м) ядерные силы превышают кулоновскую примерно в 100 раз. Ядерная сила – это «богатырь с короткими руками». На расстоянии менее 0,5 фм ядерная сила меняет направление, и нуклоны отталкиваются очень сильно.

Протоны и нейтроны так располагаются в ядре, что между ними действуют ядерные силы притяжения, а кулоновская сила отталкивания компенсирует это притяжение. Суммарная энергия взаимодействия (энергия связи) нуклонов в ядре равна алгебраической сумме положительной электрической энергии отталкивания и отрицательной энергии притяжения нуклонов друг к другу ядерной силой. Эта энергия связывает нуклоны в единое ядро.

Если под действием каких-либо внешних сил разорвать ядро на отдельные нуклоны, то электрическая сила совершит при этом положительную работу, а ядерные – большую по модулю отрицательную работу. Алгебраическая сумма этих работ равна энергии связи.

Как вычислить энергию связи нуклонов в ядре? Легко, благодаря великой формуле Эйнштейна, связывающей энергию тела с его массой: $E = mc^2$. Энергия ядра

$$E_{\text{я}} = m_{\text{я}} c^2.$$

Суммарная энергия нуклонов после разрушения ядра на свободные нуклоны:

$$\sum E_{\text{нукл}} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) c^2.$$

По определению потенциальная энергия (в нашем случае это энергия связи нуклонов) $E_{\text{св}}$ равна работе, которую совершат силы электрического и ядерного взаимодействия при разделении ядра на отдельные нуклоны, то есть при переходе из начального состояния (невозбуждённого ядра) в совокупность свободных нуклонов:

$$E_{\text{св}} = A_{\text{я}} + A_{\text{эл}}. \quad (1)$$

Эта работа равна разности энергий ядра и отдельных нуклонов:

$$A_{\text{я}} + A_{\text{эл}} = E_{\text{я}} - \sum E_{\text{нукл}}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим:

$$E_{\text{св}} = E_{\text{я}} - \sum E_{\text{нукл}},$$

или

$$E_{\text{св}} = (m_{\text{я}} - Z \cdot m_p - N \cdot m_n) c^2,$$

или

$$E_{\text{св}} = -\Delta m c^2.$$

(3)

Поскольку дефект масс для ядра любого атома положителен ($\Delta m > 0$), то энергия связи всегда отрицательна $E_{\text{св}} < 0$. Отрицательна также и удельная энергия связи, то есть энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$E_{\text{св,уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \quad E_{\text{св,уд}} < 0,$$

где $A = Z + N$ – число нуклонов в ядре.

На рис. 7а приведена зависимость удельной энергии связи от числа нуклонов в ядре.

Если взять удельную энергию по модулю или хотя бы иметь это в виду, то зависимость $|E_{\text{св.уд.}}| = f(A)$ будет выглядеть как обычно в учебниках (рис. 7б).

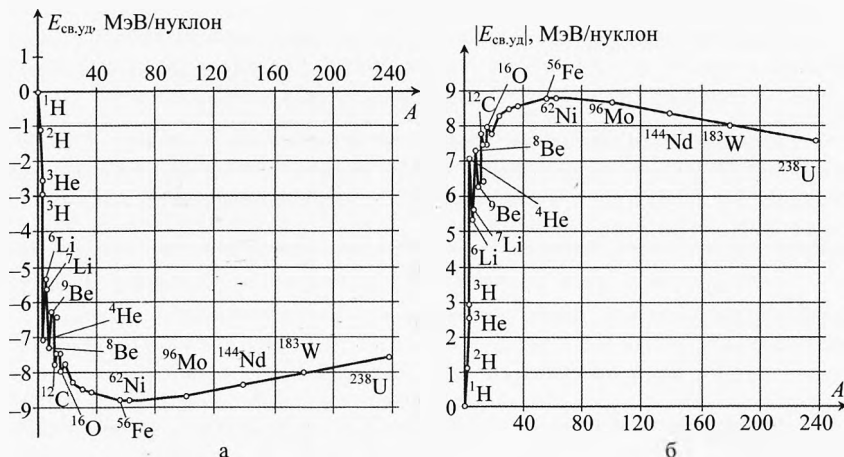


Рис. 7. Удельная энергия связи

Пример 6. Вычислить энергию связи ядра углерода.

Решение. Возьмём самый распространённый (99%) изотоп углерода $^{12}_6\text{C}$, ядро которого состоит из 6 протонов и 6 нейтронов. Масса атома углерода $m_{\text{атом}} = 12$ а.е.м.

Масса ядра $m_{\text{я}}$ равна массе атома за вычетом массы шести электронов:

$$m_{\text{я}} = m_{\text{атом}} - 6 \cdot m_e, \quad m_{\text{я}} = (12 - 6 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4}) \text{ а.е.м.} \approx 11,99671 \text{ а.е.м.}$$

Суммарная масса протонов и нейтронов:

$$6 \cdot (m_p + m_n) = 6 \cdot (1,00728 + 1,00866) \text{ а.е.м.} = 12,09564 \text{ а.е.м.}$$

Тогда дефект масс ядра:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{я}},$$

$$\Delta m = 12,09564 \text{ а.е.м.} - 11,99671 \text{ а.е.м.} = 0,09893 \text{ а.е.м.}$$

В соответствии с (3) энергия связи ядра углерода:

$$E_{\text{св}} = -\Delta m c^2,$$

$$E_{\text{св}} = -0,09893 \cdot 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = -1,478 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

Или в электрон-вольтах:

$$E_{\text{св}} = -\frac{1,478 \cdot 10^{-11}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx -9,226 \cdot 10^7 \text{ эВ} = -92,26 \text{ МэВ.}$$

Тогда удельная энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон:

$$E_{\text{св,уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \quad E_{\text{св,уд}} = \frac{-92,26 \text{ МэВ}}{12 \text{ нуклон}} \approx -7,69 \text{ МэВ/нуклон.}$$

✓ **Ответ.** Энергия связи ядра углерода равна $-92,26$ МэВ, удельная энергия связи тоже отрицательна и равна $-7,69$ МэВ/нуклон.

Люди не любят отрицательные числа, поскольку они появились относительно недавно*, и народ к ним пока не привык. Только этим можно объяснить, что энергия связи атомных ядер принимается положительной.

Энергия связи атомных ядер – величина, равная работе, которую должны совершить внешние силы, чтобы разорвать ядро на отдельные неподвижные свободные нуклоны. Энергия связи равна произведению дефекта массы и квадрата скорости света.

Поэтому будем брать энергию связи по модулю: $|E_{\text{св}}| = \Delta mc^2$. А чтобы ещё больше облегчить записи, не будем ставить знак модуля:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 \quad \text{или} \quad E_{\text{св}} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{я}}) c^2.$$

Проанализируем зависимость удельной энергии связи от числа A нуклонов в ядре. При малых A удельная энергия связи скачкообразно меняется в зависимости от A . Но, начиная с углерода, эта зависимость носит относительно плавный характер со слабовыраженным максимумом в районе железа, никеля и меди.

Максимальная удельная энергия связи $8,795$ МэВ у никеля ${}^{62}_{28}\text{Ni}$, наиболее стабильного из всех ядер. Высокая энергия связи ядра железа объясняет широкую распространённость железа во Вселенной.

У тяжёлых элементов удельная энергия связи нуклонов уменьшается из-за возрастания кулоновского отталкивания протонов. Нуклоны взаимодействуют ядерной силой лишь с ближайшими соседями (короткодействующие силы), а каждый протон в ядре взаимодействует электрической силой со всеми протонами ядра, то есть ядерные силы имеют свойство насыщения, а электрические – нет.

* Древний Египет, Вавилон и Древняя Греция не использовали отрицательных чисел. Впервые они были частично узаконены в Китае, а затем (примерно с VII века) и в Индии, где трактовались как долги (недостача) или признавались как промежуточный этап, полезный для вычисления окончательного, положительного результата. В Европе отрицательные числа долгое время называли «ложными», «мнимыми» или «абсурдными». Лишь в XVII веке, с появлением аналитической геометрии, отрицательные числа получили наглядное геометрическое представление на числовой оси. Полная и вполне строгая теория отрицательных чисел была создана только в XIX в. (Уильям Гамильтон и Герман Грассман).

Интересен также факт, что модуль энергии связи для изотопа водорода ${}^3_1\text{H}$ (трития) больше, чем для изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$. Это легко объяснить. Водород ${}^3_1\text{H}$ состоит из одного протона и двух нейтронов, поэтому в нём нет электрического отталкивания. А гелий ${}^3_2\text{He}$ состоит из двух положительно заряженных протонов и одного нейтрона, поэтому для гелия часть ядерного притяжения компенсируется электрическим отталкиванием, а значит, модуль энергии связи меньше, чем у водорода ${}^3_1\text{H}$.

Ядерные силы напоминают быстро убывающие с расстоянием силы межмолекулярного взаимодействия жидкости. *Удельная энергия связи молекул жидкости, кстати, тоже отрицательная.* Но она не зависит от общей массы воды, то есть удельная теплота парообразования (необходимая для преодоления энергии связи между молекулами и совершения работы по отодвиганию атмосферы) не зависит от того, с большой или маленькой капли испаряется вода.

Почему ядра атомов в стабильном состоянии имеют шарообразную форму? Это обусловлено центральной симметрией. На одинаковом расстоянии от центра ядра силовое равновесие нуклонов по всем направлениям должно быть одинаковым для устойчивости ядра.

Синтез и деление ядер. Энергия связи очень лёгких ядер, например ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_2\text{He}$, очень мала по сравнению с более тяжёлыми ядрами. Поэтому если сблизить лёгкие ядра до радиуса действия ядерных сил, то они устремятся друг к другу и соединятся в более прочное ядро, но с большей по модулю (отрицательной) энергией связи. При этом выделится большая энергия.

Энергетически выгодно также разбивать очень тяжёлые ядра на две почти равные части. Как видно из рис. 7, в этом случае удельная энергия связи осколков также возрастает (по модулю) и выделяется избыточная энергия.

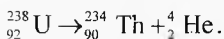
§ 28. Природа альфа-, бета- и гамма-распада

Итак, ядро атома состоит из протонов и нейтронов, которые обмениваются между собой виртуальными частицами пи-мезонами (пионами). А при естественном радиоактивном распаде из тяжёлого ядра вылетают α -частицы (ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$), β -частицы (электроны) и γ -кванты, которых там нет. Как ядра могут испускать частицы, которых в них нет?

Альфа-распад. Анализируя зависимость удельной энергии от числа нуклонов A в ядре, заметим, что удельная энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ и на каждый нуклон ядра урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, почти одинакова. Поэтому в тяжёлом ядре урана два протона и два нейтрона могут создать единую группу ${}^4_2\text{He}$, в которой будут обмениваться пионами в основ-

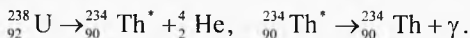
ном между собой. Тогда связь с остальной частью ядра будет слабой и появится вероятность того, что под действием электрической силы отталкивания группа ${}^4_2\text{He}$ вылетит за пределы притяжения ядерных сил, а там под действием только электрической силы оттолкнётся от ядра и разгонится до большой скорости.

Например, при α -распаде урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ образуется α -частица и ядро тория ${}^{234}_{90}\text{Th}$:

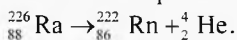


Гамма-распад. Если ядро тория после распада урана оказалось возбуждённым, то кинетическая энергия α -частицы равна 4,18 МэВ, а кинетическая энергия ядра тория при этом составит всего около 70 кэВ*.

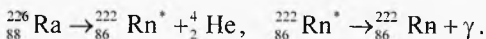
Однако нередко при α -распаде урана ядро тория оказывается возбуждённым. При этом α -частица получает кинетическую энергию 4,13 МэВ, а возбуждённое ядро тория ${}^{234}_{90}\text{Th}^*$ вскоре испускает γ -квант энергией 50 кэВ и переходит в основное состояние:



Более энергичные α -частицы вылетают при распаде радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Радий превращается в радон и α -частицу. Если ядро радона ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ оказывается в основном состоянии, то кинетическая энергия α -частицы равна 4,87 МэВ:



Если же ядро радона оказывается в возбуждённом состоянии ${}^{222}_{86}\text{Rn}^*$, то вскоре он излучает γ -квант энергией 186 кэВ и переходит в основное состояние:



Возможен также ступенчатый переход ядра из возбуждённого состояния в основное с испусканием нескольких γ -квантов.

Таким образом, γ -лучи представляют собой электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбуждённого состояния в более низкое энергетическое состояние.

Бета-распад. β -распад представляет собой самопроизвольное превращение ядра с испусканием электрона ${}^0_{-1}e$, а в некоторых случаях позитрона (антиэлектрона) ${}^0_{+1}e$.

При бета-минус-распаде один из нейтронов ядра превращается в протон с испусканием электрона. Заряд получившегося ядра в соответствии с законом сохранения заряда увеличивается на единицу. Казалось бы, практически вся энергия должна уноситься электроном:

* Это легко рассчитать, используя закон сохранения энергии и импульса.

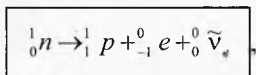
$$E_k = (m_n - m_p - m_e) \cdot c^2, \quad E_k = 783 \text{ кэВ}.$$

Однако опыты Чедвика, проведенные в 1914 г., показали, что кинетическая энергия электронов может быть любой в диапазоне от 0 до 783 кэВ.

На рис. 8 показано распределение энергии β -частиц (электронов). По оси абсцисс указана энергия электрона, а по оси ординат – доля электронов, обладающих этой энергией.

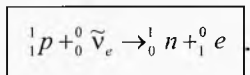
Это распределение энергии намекало на нарушение закона сохранения энергии при β -распаде. В 1931 г. австрийский физик Вольфганг Паули предположил, что при бета-распаде возникает ещё одна электрически нейтральная частица, которая приобретает импульс и уносит с собой остальную часть энергии. Итальянский учёный Энрико Ферми назвал её **нейтрино** (от итал. *neutrino* – «нейтрончик», уменьшительное от *neutrone* – нейтрон).

Значит, реакция распада нейтрона имеет вид:



где ${}_0^0\tilde{\nu}_e$ – антинейтрино электронное.

Нейтрино в течение четверти века оставалось гипотетической частицей. Но в 1956 г. в результате четырёхлетней серии наблюдений в США у ядерного реактора наконец удалось обнаружить взаимодействие антинейтрино с протоном, в результате которого образуется нейтрон и позитрон:



Позитрон ${}_1^0e$, появившийся в результате этой реакции, встретился с ядром водорода молекулы воды (имевшейся в установке в объёме 200 л), аннигилировал с электроном с испусканием двух γ -квантов, разлетающихся в противоположные стороны, которые зарегистрированы в слое жидкого сцинтиллятора объёмом 300 л, окружавшего сосуд с водой. Рожденный при реакции нейтрон ${}_0^1n$ после некоторого блуждания захватывается ядром кадмия, специально добавленного к воде. Из-за чего ядро кадмия излучило несколько γ -квантов, сигнализируя о реакции, вызванной появившимся нейтроном. Эти γ -кванты регистрировались жидким сцинтиллятором.

Возможно, нейтрино и антинейтрино имеют массу покоя, составляющую примерно $5 \cdot 10^{-5} m_e$ (в 20 000 раз меньше массы электрона). При оценке

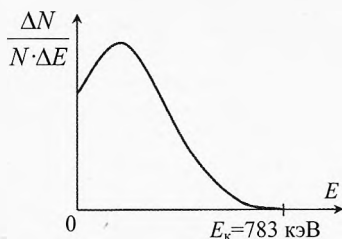


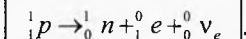
Рис. 8. Энергия электронов при распаде нейтрона



Вольфганг Паули
(1900–1958)

массы нейтрино и антинейтрино учёные сталкиваются с существенными экспериментальными трудностями, поскольку эти частицы не участвуют в сильном (ядерном) и электромагнитном взаимодействиях и их гравитационная масса очень мала.

Свободный протон стабилен, так как его масса (а значит и энергия покоя) меньше массы нейтрона. Однако при взаимодействии с другими частицами он может получить достаточно большую энергию, чтобы превратиться в нейтрон, позитрон и электронное нейтрино:



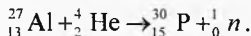
Позитрон ${}_0^0e$ — это античастица электрона ${}_0^0e$, одинаковой с ним массы и противоположным зарядом. При встрече электрона с позитроном происходит аннигиляция — превращение вещества и антивещества в γ -кванты электромагнитного поля. Впервые аннигиляцию наблюдали в 1934 г. Фредерик Жолио-Кюри совместно с французским физиком Жаном Тибо.

Существование позитрона впервые было предположено Полем Дираком в 1928 г. Экспериментально позитрон был открыт в 1932 г. американским физиком К. Д. Андерсоном при наблюдении космического излучения с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле.

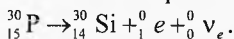


Жан Тибо
(1901–1960)

При облучении потоком α -частиц ядер алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$ они превращаются в ядра фосфора ${}_{15}^{30}\text{P}$. При этом испускаются свободные нейтроны:



Искусственно полученный изотоп фосфора оказался радиоактивным. Его ядро распадается с испусканием позитрона:



Последующие опыты по бомбардировке атомных ядер стабильных изотопов α -частицами, протонами, нейтронами и другими частицами показали, что искусственные радиоактивные изотопы могут быть получены практически у всех элементов.

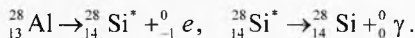
Нестабильными по отношению к электронному β^- -распаду оказываются ядра, в которых число нейтронов заметно больше числа протонов.

Изотопы с избытком протонов над числом нейтронов в ядре испытывают позитронный β^+ -распад.

Гамма-излучение при бета-распаде. Бета-распад, как и альфа-распад, может сопровождаться излучением γ -квантов.

В тех случаях, когда часть энергии при β -распаде идёт на возбуждение образовавшегося в результате реакции ядра, это возбуждённое ядро вскоре освобождается от избытка энергии, испуская один или несколько γ -квантов, энергия которых может достигнуть нескольких МэВ. Гамма-излучение как при α -распаде, так и при β -распаде обладает дискретным энергетическим спектром.

Пример электронного β -распада (рис. 9а)



Пример позитронного β -распада (рис. 9б):

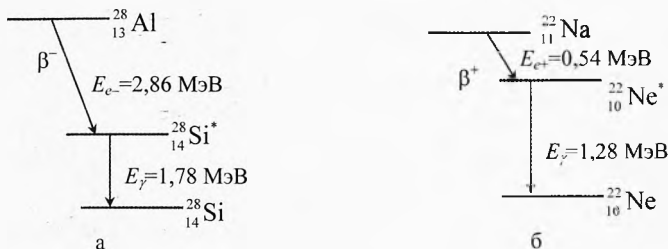
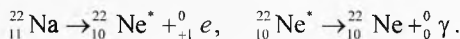


Рис. 9. Электронный и позитронный β -распады

§ 29. Радиоактивные изотопы в природе

Явление радиоактивности широко распространено в природе. Более половины элементов таблицы Менделеева имеют изотопы. Естественный распад конкретного изотопа может являться очередным звеном длинной серии ядерных превращений. Промежуточные в серии дочерние ядра нестабильны, поэтому они продолжают распадаться до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

Например, стабильные изотопы свинца образуются при трёх естественных радиоактивных сериях (семействах), начинающихся с материнских ядер урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ (с периодом полураспада 700 миллионов лет), урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ (с периодом полураспада 4,5 миллиарда лет) и тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ (с периодом полураспада 14 миллиардов лет). Неудивительно, что за время существования Земли (около 5 млрд лет) эти изотопы распались лишь частично.

В сериях постоянно рождаются и короткоживущие изотопы. Поэтому все их можно найти в наличии и сейчас, и в будущем. Период полураспада для этих серий приведён в таблице 2.

Таблица 2. Период полураспада серий урана и тория

Начальный изотоп	Период полураспада серии	Конечный (стабильный) изотоп
$^{235}_{92}\text{U}$	$0,713 \cdot 10^9$ лет	$^{207}_{82}\text{Pb}$
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$ лет	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$^{232}_{90}\text{Th}$	$14,1 \cdot 10^9$ лет	$^{208}_{82}\text{Pb}$

Серия радиоактивных превращений урана $^{238}_{92}\text{U}$ приведена на рис. 10, где по оси абсцисс откладывается зарядовое число Z , а по оси ординат – число нейтронов N в ядре.

При α -распаде и число протонов Z , и число нейтронов N уменьшаются на две единицы.

При β -распаде число протонов Z увеличивается на единицу, а число нейтронов N на единицу уменьшается.

Для каждого элемента промежуточного превращения на рисунке указан период полураспада.

В процессе изучения этой серии распадов было обнаружено, что изотоп ^{214}Bi может испытывать не только α -распад (99,98%), превращаясь в ^{210}Tl , но и β -распад (0,02%), переходя в изотоп ^{214}Po . Это явление получило название разветлённого распада, или радиоактивной вилки.

Уран, торий и члены их радиоактивных семейств, а также радиоактивный изотоп $^{40}_{19}\text{K}$ играют серьёзную роль в геологических процессах. Внутренние области Земного шара сильно разогреты. На каждый километр вглубь Земли температура повышается в среднем на 30°C . На глу-

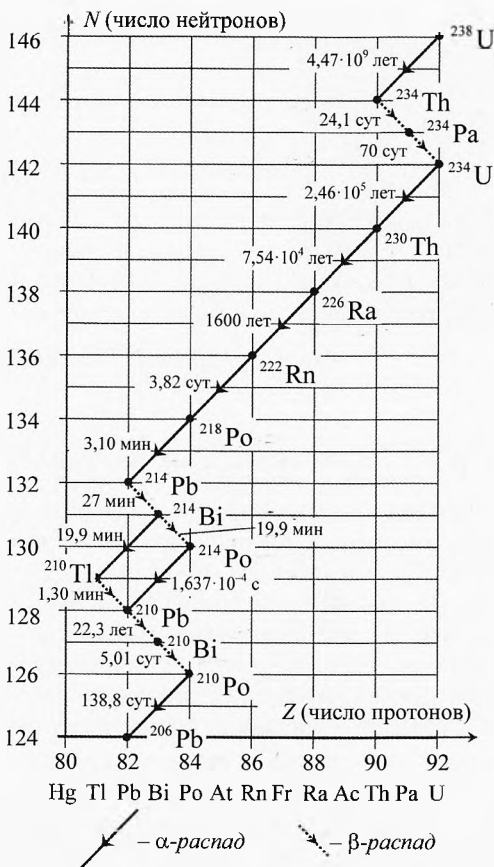


Рис. 10. Серия радиоактивных превращений урана

боинах Земли температура понижается в среднем на 30°C . На глу-

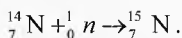
бине 100 км температура поднимается до 3000 К. Общий поток тепла, излучаемый Землей за счёт собственных источников (радиоактивного распада), составляет $1,2 \cdot 10^{21}$ Дж/год. Процессы горообразования, движения материков, извержения вулканов и землетрясения связаны с наличием разогретых внутренних слоёв Земли и в конечном счёте обусловлены естественной радиоактивностью земных пород.

Естественные радиоактивные изотопы встречаются всюду: в воздухе, воде, почве, тканях растений, животных, продуктах питания и в человеческом организме.

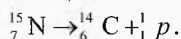
В человеке и животных в наибольшем количестве содержатся радиоактивные изотопы калия и углерода. В природном калии на долю радиоактивного изотопа $^{40}_{19}\text{K}$ приходится 0,012% с периодом полураспада 1,23 млрд лет. В одном грамме природного калия происходит примерно 1900 β -распадов в минуту. В 1 кг хлеба, содержащем 1–1,5 г калия, за 1 мин происходит около 2000–3000 β -распадов.

Радиоактивность углерода в биологических тканях обусловлена присутствием радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$. Период полураспада этого изотопа составляет 5570 лет. Он образуется в верхних слоях земной атмосферы под действием потока быстрых заряженных частиц из космоса.

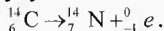
Ядро изотопа $^{14}_7\text{N}$ поглощает нейтрон:



Затем из образовавшегося ядра $^{15}_7\text{N}$ вылетает протон:



Бета-минус радиоактивный изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$ усваивается из воздуха растениями в составе углекислого газа. С пищей он попадает в ткани человека и животных. В 1 грамме углерода биологического происхождения происходит 15,3 β -распадов в минуту.



После гибели организма, животного или спиленного дерева пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся количество $^{14}_6\text{C}$ уменьшается за счёт радиоактивности.

Используя закон радиоактивного распада, можно определить, когда погиб организм. Радиоуглеродный метод геохронологии позволяет надёжно определять возраст от 1 000 до 50 000 лет.

Основным источником радиоактивности в атмосфере является радиоактивный газ радон и продукты его распада. Радон возникает в результате α -распада радия. Так как радий содержится в небольших количествах практически во всех почвах, повсюду из почвы в атмосферу выделяется радон.

Естественные радиоактивные изотопы имеются также в воде, пище и тканях человеческого организма. Но их наличие в природе во много раз

меньше тех количеств, которые могут представлять опасность для здоровья человека.

Органы чувств человека не способны ощущать ни слабые, ни смертельные дозы ионизирующих излучений. Поэтому важно изучать их свойства и влияние на человека, создавать приборы, сигнализирующие человеку о грозящей опасности от ионизирующих излучений.

§ 30. Свойства ионизирующих излучений

В веществе быстрые заряженные частицы взаимодействуют с электронными оболочками и атомными ядрами, вызывая возбуждение и ионизацию атомов. Проходя вблизи ядер, заряженные частицы тормозятся и излучают рентгеновское тормозное излучение. Возможны упругие и неупругие соударения с ядрами атомов.

Частицы, обладая большой массой, при столкновении с электронами лишь немного отклоняются, сильно ионизируют среду и быстро теряют энергию. Например, α -частицы с энергией 4 МэВ пробегают в воздухе всего 2,5 см. Листом бумаги они полностью поглощаются.

β -частицы обладают значительно большей проникающей способностью. От β -частиц с энергией 2 МэВ полностью защищает слой алюминия толщиной 3,5 мм.

При облучении α и β -частицами плотная одежда поглощает большую часть β -частиц и совсем не пропустит α -частицы. Однако при попадании внутрь с пищей, водой и воздухом, а также на кожу α и β -частицы могут причинить человеку большой вред.

Нейтроны не взаимодействуют с электронными оболочками атомов, но при столкновении с ядрами атомов они могут выбивать из ядер заряженные частицы, которые возбуждают и ионизируют атомы среды. От них хорошая защита из водородосодержащих веществ, например парафина.

γ -кванты взаимодействуют в основном с внутренними электронными оболочками атомов, производя ионизацию среды. В воздухе γ -кванты пролетают сотни метров, а в твёрдых телах – десятки сантиметров. С увеличением плотности среды длина их пробега уменьшается. От γ -излучения лучшая защита – слой свинца.

Потоки гамма-квантов и нейтронов – наиболее проникающие из излучений. Поэтому при внешнем облучении они малоопасны.



Стефан Грей
(1666–1736)

Поглощённая доза ионизирующего излучения равна энергии излучения, поглощённой одним килограммом вещества данного тела:

$$D = \frac{E}{m}, \quad [D] = 1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Это универсальная мера воздействия на вещество любого вида излучения. В СИ за единицу поглощённой дозы излучения принят *грей* (Гр) в честь английского физика Стефана Грея (1666–1736).

Один грей равен поглощённой дозе излучения, когда одному килограмму тела передается энергия ионизирующего излучения один джоуль.

Мощность дозы излучения равна отношению поглощённой дозы к промежутку времени, за который оно произошло:

$$\dot{D} = \frac{D}{t}, \quad [\dot{D}] = \frac{\text{Гр}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$

Единица измерения – грей в секунду (Гр/с).

Относительная биологическая эффективность. При одной и той же дозе поглощённого излучения разные виды излучений вызывают не одинаковый биологический эффект в организме. Для его учёта вводится *коэффициент относительной биологической активности* (КОБА), или *коэффициент качества* k .

Коэффициент качества рентгеновского и γ -излучения принимается равным единице. С ним сравниваются биологическая активность остальных излучений. Коэффициенты качества ионизирующих излучений приведены в таблице.

Таблица 3. Коэффициент качества КОБА

Ионизирующее излучение	Коэффициент качества КОБА k , Зв/Гр
Рентгеновское и γ -излучение	1
β -частицы (электроны)	1–1,5
Тепловые нейтроны (0,025 эВ)	3
Нейтроны с энергией 0,5 МэВ	10
Нейтроны с энергией 5 МэВ	7
Протоны	10
α -частицы	20

Для оценки биологической активности ионизирующих излучений вводится специальная величина *эквивалентная доза* H .

Эквивалентная доза поглощённого излучения равна произведению дозы поглощённого излучения и коэффициента качества:

$$H = D \cdot k, \quad [H] = \text{Зв}.$$

Единица измерения – зиверт (Зв). Один зиверт равен эквивалентной дозе, при которой доза поглощённого рентгеновского или гамма-излучения равна одному грею. Единица зиверт введена в честь шведского радиофизика Рольфа Зиверта, основоположника науки о защите от радиоактивного излучения.

Эквивалентная доза определяет уровень опасности облучения живого организма. Среднее значение эквивалентной дозы излучения, получаемой человеком из-за естественного радиационного фона, составляет около 2 мЗв/год. Половина этой дозы приходится на радон и продукты его распада. Человек подвергается также небольшим, как правило, облучениям от искусственных источников, в основном рентгеновского излучения при медицинских обследованиях. При прохождении аналоговой (плёночной) флюорографии доза колеблется от 0,5 до 0,8 мЗв. При цифровой флюорографии органов грудной клетки доза составляет от 0,02 до 0,025 мЗв. Средняя эквивалентная доза, получаемая человеком в год в промышленно развитых странах, равна половине дозы естественного фона, то есть 1 мЗв. В сумме с естественным фоном получается 3 мЗв.

Большие дозы облучения вредны для человека. Острое поражение проявляется в течение нескольких дней и обнаруживается у человека, начиная примерно с 0,5–1,0 Зв. При такой дозе могут появляться сбои в работе кровеносной системы. При дозе в 3–5 Зв около 50% облученных умирают в течение 1–2 месяцев от лучевой болезни. Однако малые дозы облучения на уровне естественного радиационного фона безвредны для человека.

Предельно допустимая доза (ПДД) облучения для лиц, профессионально связанных с использованием источников ионизирующих излучений, составляет 50 мЗв за год. В качестве ПДД для систематического облучения населения установлена норма 5 мЗв за год, то есть 0,1 ПДД.

Многочратно повторенные опыты показали, что небольшие дозы облучения, сравнимые с уровнем естественного фона, стимулируют развитие растений и животных, в одном ряду с которыми находится человек. Так что не будем бояться смотреть телевизор и обследоваться в современных рентген-кабинетах.



Рольф Максимилиан
Зиверт (1896–1966)

§ 31. Методы регистрации ионизирующих излучений

Метод фотоэмульсий. Явление радиоактивности было открыто А. Беккерелем по действию ядерных излучений на фотопластинку. Это явление применяется и в настоящее время для исследований в области физики элементарных частиц и космических излучений.

Заряженная частица большой энергии при движении в слое эмульсии ионизирует атомы и создаёт скрытое изображение вдоль траектории своего движения. После проявления появляется изображение следов первичной частицы и всех заряженных частиц, возникших в эмульсии в результате ядерных взаимодействий с первичной частицей. По толщине следа фотоэмульсии и его длине можно определить заряд частицы и её энергию.

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки частиц получаются очень короткими (порядка 10 мкм для α -частиц, испускаемых радиоактивными элементами).

Метод фотоэмульсий позволяет регистрировать падающие излучения в течение длительного времени. Поэтому можно регистрировать редкие явления.

Информации получается много, но обрабатывать её непросто. Лаборатория, в которой производится эксперимент, для более быстрой обработки разрезает пластинку с фотоэмульсией на фрагменты, которые отсылаются родственным лабораториям на первичную обработку. Каждый фрагмент разрезается на очень тонкие слои порядка 1 мкм. Затем по срезам восстанавливается пространственная структура треков частиц, попавших на фотоэмульсию.

Газоразрядный счётчик Гейгера–Мюллера. После метода фотоэмульсий для ионизирующих излучений был изобретён газоразрядный счётчик Г. Гейгером вместе с Резерфордом в 1908 г. Позже в 1928 году Гейгер усовершенствовал его совместно с немецкими физиками Вальтером Мюллером. Газоразрядный счётчик Гейгера–Мюллера – это один из важнейших приборов для автоматического счёта частиц. Хорошие счётчики позволяют регистрировать 10 000 и более частиц в секунду с помощью пересчётных устройств.

Газоразрядный счётчик состоит из катода (металлической или стеклянной трубки, внутренняя поверхность которой покрыта металлическим слоем) и анода (тонкой проволоки, расположенной по оси трубки) (рис. 11). Трубка заполнена газом (обычно аргоном). Заряженная частица, пролетая в газе, ионизирует атомы. Электрическое поле напряжением порядка 500 В между катодом и анодом ускоряет электроны до энергии, необходимой для ионизации газа. Возникает лавина несамостоятельного разряда, видимая (если баллон прозрачный) даже невооруженным глазом. В цепи проходит импульс тока, в том числе через резистор, который регистрируется считывающим устройством. До пролёта частицы всё напряжение от источника сосредоточено между катодом и анодом. Как только пойдёт ток, основная часть напряжения перераспределится на резистор, а малое оставшееся напряжение между нитью и катодом не сможет поддерживать разряд и он пре-

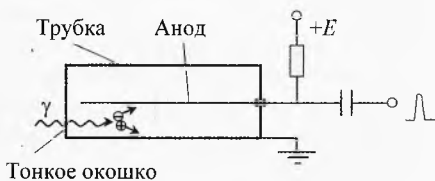


Рис. 11. Газоразрядный счетчик

кратится. Таким образом, счётчик снова готов к регистрации других частиц. Длительность импульса составляет несколько микросекунд.

Счётчики Гейгера–Мюллера регистрируют практически все влетающие в него электроны. А для регистрации фотонов катод покрывают материалом, из которого гамма-кванты выбивают электроны, которые в электрическом поле трубки создают лавину. Вследствие малой ионизирующей способности регистрируются всего 1 из 100 гамма-квантов. Для регистрации альфа-частиц в трубке делают «окошко», прозрачное для альфа-частиц.

Сцинтилляционные счётчики. Устройство простейшего прибора, предназначенного для регистрации отдельных α -частиц – *спинтарископа*, – представлено на рис. 12. Основными деталями спинтарископа являются экран (3), покрытый слоем сульфида цинка, и короткофокусная лупа (1). Альфа-радиоактивный препарат помещают на конце стержня (2) примерно напротив середины экрана. Расстояние от радиоактивного препарата до экрана составляет 1–2 мм. При падении α -частицы в кристалл сульфида цинка возникает вспышка света, которую можно зарегистрировать при наблюдении через лупу.

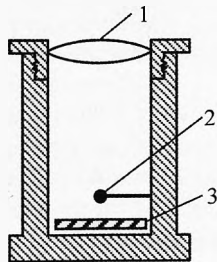


Рис. 12. Спинтарископ

Процесс преобразования кинетической энергии быстрой заряженной частицы в энергию световой вспышки называется *сцинтилляцией*. В современных сцинтилляционных счётчиках регистрация световых вспышек производится с помощью приборов, в которых за счёт явления фотоэффекта энергия световой вспышки преобразуется в импульс электрического тока, который усиливается и затем регистрируется. Используя спектр амплитуд электрических импульсов на выходе счётчика, можно изучать энергетический спектр исследуемого излучения.

Камера Вильсона. Счётчики позволяют регистрировать факт прохождения частицы и фиксировать некоторые её характеристики. Наиболее наглядная и точная информация о процессах микромира получается с помощью камеры Вильсона и пузырьковой камеры. В них заряженная частица оставляет трек, наблюдаемый визуально или фотографируемый.

Шотландский физик Чарлз Вильсон показал в 1897 г., что при определённых условиях каждый заряженный ион становится центром конденсации паров воды, так что его присутствие становится видимым для глаза. Исходя из этого, он изобрёл в 1912 г. прибор для наблюдения и фотографирования следов (треков) заряженных частиц – камеры Вильсона, за что удостоен Нобелевской премии (1927 г.).

В сосуде с плоской стеклянной крышкой (рис. 13) находится воздух с насыщенными парами спирта. При быстром (адиабатном) расширении воздух в камере охлаждается, пар становится пересыщенным (переохлажденным). Если в этот момент в камере пролетает заряженная частица, например

α -частица, вдоль её траектории образуется цепочка ионов, которые становятся центрами конденсации пересыщенного пара, образуется трек, аналогично следу за реактивным самолетом в небе. При освещении трек становится видимым на чёрном фоне и фотографируется.



Чарлз Томсон Риз
Вильсон (1869–1959)

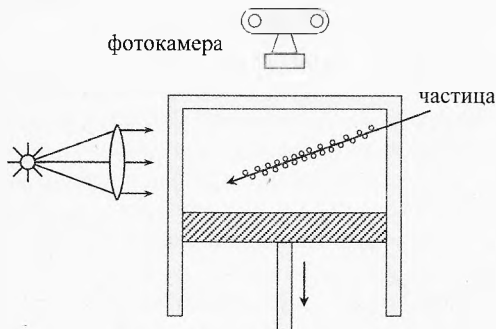


Рис. 13. Камера Вильсона

Если камеру поместить в магнитное поле (идея П. Л. Капицы и Д. В. Скобельцина), то треки частиц искривляются. Радиус кривизны зависит от массы частицы, заряда и скорости. Зная магнитную индукцию \vec{B} , можно определить отношение заряда к массе.

С помощью камеры Вильсона хорошо наблюдать процессы с частицами относительно небольших энергий. Из-за малой плотности рабочего вещества камеры (пар) проследить длинную цепь событий нельзя.

Пузырьковая камера. Для регистрации процессов с частицами больших энергий была изобретена пузырьковая камера, в которой рабочим веществом является жидкость (жидкий водород, пропан и др.). Эта жидкость



Дональд Артур Глазер (1926–2013)

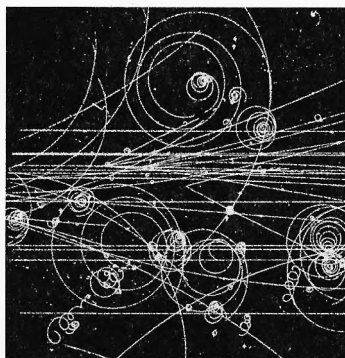


Рис. 14. Треки частиц

находится под большим давлением, предохраняющим её от закипания. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение примерно 0,1 с находится в неустойчивом состоянии. Для закипания ей нужны центры парообразования. Эти центры создаёт пролетающая заряженная частица в виде цепочки ионов, на которых образуются пузырьки пара, составляющие трек частицы (рис. 14).

Изобрёл пузырьковую камеру американский физик Д. А. Глазер в 1952 г., за что удостоен Нобелевской премии (1960 г.).

Подготовка пузырьковой камеры довольно трудоёмка. Ещё более трудна обработка информации, полученной с её помощью. Сначала фотографии треков просматривают и отбирают самые интересные. Затем изображение преобразуют в серию электрических импульсов по аналогии с телевизионным сигналом. В дальнейшем анализ проводится автоматически с помощью электронно-вычислительных машин. И после этого на изучение каждой фотографии затрачивается много времени. Поэтому обнаружить очень редкие события в мире элементарных частиц с помощью пузырьковой камеры довольно трудно. Напомним, что время работы самой камеры – 0,1 с, а время подготовки камеры и обработки результатов многократно больше.

Хлеб науки довольно кропотливый и нелёгкий. Среди учёных практически нет очень богатых людей, в том числе и в США. Наградой им служит в основном радость познания. По меткому выражению «ученые – это люди, удовлетворяющие свое любопытство за счёт государства».

Черенковский счётчик. Работая с 1932 г. под руководством С. И. Вавилова, П. А. Черенков исследовал люминесценцию растворов урановых солей под действием γ -лучей. В 1934 г. он обнаружил, что наряду с обычной люминесценцией, вызванной γ -лучами, возникает ещё длительное свечение (излучение Вавилова–Черенкова). В 1936 г. он установил направленность этого излучения. В 1937 г. советские физики И. Е. Тамм и И. М. Франк разработали теорию этого эффекта. Все трое были удостоены Нобелевской премии 1958 г.



Павел Алексеевич
Черенков (1904–1990)



Илья Михайлович
Франк (1908–1990)



Игорь Евгеньевич
Тамм (1895–1971)

Действие черенковского счётчика основано на принципе, существенно отличающемся от вышеописанных счётчиков. При движении частицы в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде*, возникает слабое свечение.

Для объяснения происхождения этого свечения рассмотрим ряд последовательных положений электрона, движущегося с постоянной скоростью v по прямой BA (рис. 15).

Каждую точку траектории заряженной частицы следует считать источником вторичной электромагнитной волны, возникающей в момент прохождения через неё электрона. Так как скорость электрона больше скорости света в данной среде ($v > c_s$), то эти волны появляются только позади электрона.

На рисунке изображены вторичные волны в виде окружностей разных радиусов в тот момент, когда электрон находится в точке A . Огибающая вторичных волн, согласно принципу Гюйгенса – есть волновой фронт, представляющий собой коническую поверхность**. Этот конус движется вперед со скоростью электрона. Угол раствора конуса определяется соотношением:

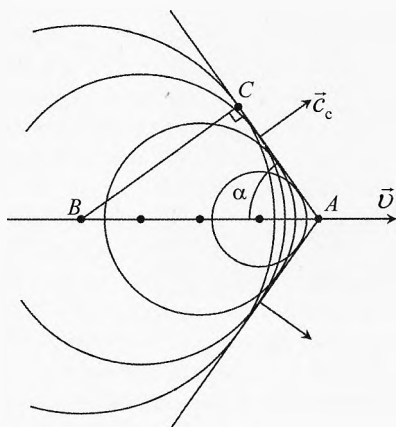


Рис. 15. Излучение Вавилова–Черенкова

$\sin \alpha = \frac{BC}{BA} = \frac{c_s t}{vt} = \frac{c_s}{v}$.

Этот эффект используется для регистрации элементарных частиц, улавливая с помощью чувствительного фотоумножителя излучение, возникающее в газе, жидкости или прозрачном твёрдом теле.

$$\sin \alpha = \frac{BC}{BA} = \frac{c_s t}{vt} = \frac{c_s}{v}.$$

Черенковские счётчики пригодны только для регистрации частиц с релятивистскими скоростями. По углу между направлением движения частицы и направлением излучения можно с точностью до десятых долей процента определить скорость частицы.

Черенковские счётчики пригодны только для регистрации частиц с релятивистскими скоростями. По углу между направлением движения частицы и направлением излучения можно с точностью до десятых долей процента определить скорость частицы.

* Частица не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Но движение со скоростью, большей скорости света в среде не противоречит теории относительности.

** Это явление является оптическим эквивалентом ударной волны, которую вызывает в атмосфере сверхзвуковой самолёт.

Распространённое представление о том, что на больших глубинах в океане царит полный мрак, так как свет с поверхности туда не доходит, является ошибочным. В результате распада радиоактивных изотопов в океанской воде, в частности, калия-40, даже на больших глубинах вода слабо светится из-за описанного здесь эффекта Вавилова–Черенкова. Существует гипотеза, что большие глаза нужны глубоководным созданиям затем, чтобы видеть при столь слабом освещении.

Ионизационная камера применяется для измерения доз ионизирующих излучений. Она является простейшим газонаполненным детектором и представляет собой систему из двух или трёх электродов, объём которой заполнен газом ($\text{He} + \text{Ar}$, $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_2$, Ne). Ионизационная камера может быть выполнена в виде плоского или сферического конденсатора. Напряжение (обычно сотни вольт) подбирается так, чтобы свободные заряды, образованные при ионизации газа пролетающей частицей, успевали достичь электродов без рекомбинации.

Ионизационные камеры бывают интегрирующие и импульсные. В интегрирующих камерах при больших потоках частиц импульсы сливаются, и регистрируется ток, пропорциональный среднему энерговыделению.

В импульсных камерах регистрируются отдельные импульсы от каждой ионизирующей частицы. Импульсные камеры обычно трёхэлектродные (рис. 16). Рабочим объёмом служит пространство между катодом и сеткой. Образовавшиеся в результате ионизации электроны под действием

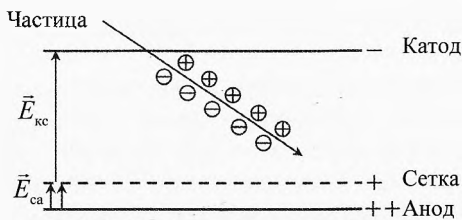


Рис. 16. Ионизационная камера

электрического поля между катодом и сеткой $E_{\text{кc}}$ движутся по направлению к сетке, проходят её под действием поля $E_{\text{са}} > E_{\text{кc}}$ и собираются на аноде. Наиболее подвижные электроны собираются за время 10^{-6} с. Положительные ионы, время сбора которых на три порядка больше, за это время остаются практически на месте. Сетка экранирует анод от индукционного воздействия положительных ионов.

Временное разрешение ионизационной камеры определяется временем подлёта зарядов к аноду. Таким образом, при регистрации импульса тока от электронов временное разрешение ионизационной камеры будет достигать 10^{-6} с.

Если частица полностью останавливается в объёме камеры, то по величине собранного заряда (количеству электронов, пришедших на анод) легко определить энергию частицы. Эта энергия равна произведению числа электронов N на среднюю энергию, необходимую на образование частицей одной пары электрон–ион (для газа 30–40 эВ). Разбивая анод на несколько частей, можно получить информацию о длине трека.

Искровая камера – трековый детектор заряженных частиц, в котором трек (след) частицы образуется цепочкой искровых электрических разрядов вдоль траектории её движения.

Искровая камера (рис. 17) обычно представляет собой систему параллельных металлических электродов, пространство между которыми заполнено инертным газом. Расстояние между пластинами от 1–2 см до 10 см.

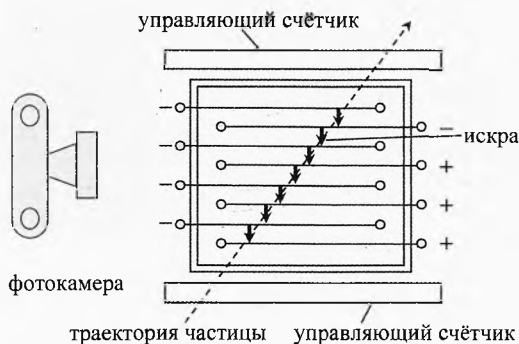


Рис. 17. Искровая камера

Широко используются проволочные искровые камеры, электроды которых состоят из множества параллельных проволочек. Внешние управляющие счётчики фиксируют факт попадания заряженной частицы в искровую камеру и инициируют подачу на её электроды короткого (10–100 нс) высоковольтного импульса чередующейся полярности так, что между двумя соседними электродами появляется разность потенциалов 10 кВ. В местах прохождения заряженной частицы между пластинами за счёт ионизации ею атомов среды возникают свободные носители зарядов (электроны, ионы), что вызывает искровой пробой (разряд). Разрядные искры строго локализованы. Они возникают там, где появляются свободные заряды, и поэтому воспроизводят траекторию движения частицы через камеру. Отдельные искровые разряды направлены вдоль электрического поля (перпендикулярно электродам). Совокупность этих последовательных разрядов формирует трек частицы. Этот трек может быть зафиксирован либо оптическими методами (например, сфотографирован), либо электронными. Пространственное разрешение обычной искровой камеры 0,3 мм. Частота срабатывания 10–100 Гц. Искровые камеры могут иметь размеры порядка нескольких метров.

Существуют и другие детекторы ионизирующих излучений.

В заключение заметим, что система приборов для регистрации явлений, наблюдаемых в экспериментах в современных ускорителях, стоят порою не меньше самого ускорителя.

§ 32. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции

Рождение пары: электрон, позитрон. В 1933 году Ирен и Фредерик Жолио-Кюри впервые зафиксировали факт превращения гамма-кванта в электрон и позитрон. Они поместили металлическую (свинцовую) пластинку в камеру Вильсона, находящуюся в магнитном поле. Гамма-квант, ударившись о пластину, породил пару: электрон и позитрон. В магнитном поле они полетели в противоположные стороны с одинаковыми радиусами кривизны (рис. 18). Уникально, что неведомый объект материи гамма-квант превращается в частицу вещества – электрон и частицу антивещества – позитрон.

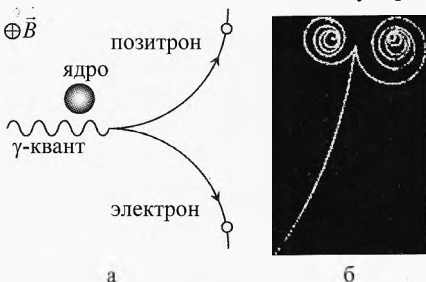
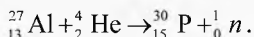


Рис. 18. Рождение электрона и позитрона

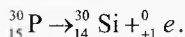
Искусственная радиоактивность. В 1934 году они же открыли

явление искусственной радиоактивности, т.е. получение радиоактивных изотопов химических элементов. Они бомбардировали фольгу из алюминия быстрыми альфа-частицами. В результате пластина излучала не электроны, а позитроны. Они решили тщательно исследовать это явление. Поместив алюминиевую фольгу вблизи источника альфа-частиц, подвергли её облучению в течение нескольких минут. Затем удалили источник и с помощью счётчика Гейгера обнаружили, что фольга стала радиоактивной. Она испускала позитроны в течение некоторого времени. Значит, в пластине появились радиоактивные ядра, которые затем испытывали β^+ -распад.

Сначала ядра Al захватывают α -частицы и превращаются в ядра фосфора $^{30}_{15}\text{P}$ с испусканием нейтрона:



Полученный искусственно изотоп фосфора радиоактивен. В отличие от естественного $^{31}_{15}\text{P}$ он распадается с испусканием позитрона:



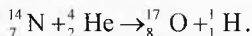
За открытие искусственной радиоактивности супруги Ф. и И. Жолио-Кюри удостоены Нобелевской премии по химии (1935 г.).

Впоследствии было получено около тысячи радиоактивных изотопов. А число естественных радиоактивных изотопов не превышает 40.

Для каждого химического элемента сейчас известно по несколько радиоактивных изотопов, полученных искусственно. Причём все трансурановые элементы (с порядковым номером более 92) получены с помощью искусственной радиоактивности.

Ядерные реакции – это превращение атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции происходят, когда частицы приближаются друг к другу настолько, что попадают в зону действия ядерных сил. Первую ядерную реакцию осуществил Резерфорд в 1919 году. Он бомбардировал α -частицами азот, наблюдая в камере Вильсона. Всего одна из 50000 α -частиц, испущенных препаратом, захватывалась ядром азота с последующим испусканием протона:



На рис. 19 показана одна из фотографий этого процесса. Видна характерная «вилка» – разветвление трека. Короткий след принадлежит ядру кислорода, а длинный – протону.

Для осуществления ядерных реакций создаются пучки заряженных частиц в ускорителях. Заряженные частицы разгоняются электрическим полем, двигаясь по замкнутым орбитам. На круговых участках орбит они удерживаются с помощью магнитного поля. В современных ускорителях электроны или ядра атомов разгоняются от десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт.

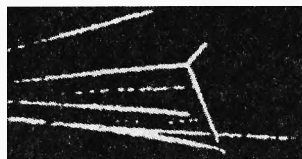
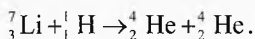
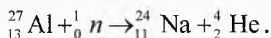


Рис. 19. Превращение азота в кислород

Первая ядерная реакция на быстрых протонах осуществлена в 1932 году, в ней удалось расщепить ядро лития на две α -частицы:



Ядерные реакции на нейтронах. Открытие нейтрона дало новый импульс в исследовании ядерных реакций. Поскольку у нейтрона нет электрического заряда, то они могут беспрепятственно проникать в атомные ядра и вызывать их изменение. Например, если нейтрон влетит в ядро алюминия, то образуется изотоп натрия и ядро гелия (α -частица):



Великий итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми нейтронами (с энергией в несколько МэВ), но и медленными (десятые доли эВ). Причём медленные нейтроны во многих случаях более эффективны, чем быстрые (более вероятно вступают в реакции с данной мишенью). Поэтому быстрые нейтроны целесообразно замедлять. Эффективно замедляет нейтроны вода.

§ 33. Энергетический выход ядерных реакций

Ядерные реакции, как и химические, сопровождаются изменением кинетической энергии продуктов реакции по сравнению с исходными компонентами, вступающими в реакцию. Если при химической реакции продукты реакций нагреваются по сравнению с исходными компонентами, то реакция называется экзотермической, т.е. происходит с выделением тепла (например, гашение извести), а если охлаждаются, то реакция называется эндотермической.

Аналогично при ядерных реакциях, если кинетическая энергия продукта реакции больше кинетической энергии частиц, вступающих в ядерную реакцию, то энергетический выход Q положительный, а если меньше – отрицательный.

Энергетический выход ядерной реакции равен изменению кинетической энергии продуктов реакции по сравнению с кинетической энергией частиц, вступивших в реакцию:

$$Q = E_{\text{кин.пр}} - E_{\text{кин.исх}} \quad (4)$$

Запишем закон сохранения энергии для ядерной реакции, а именно, сумма кинетической энергии продуктов реакции $E_{\text{кин.пр}}$ и энергии покоя продуктов реакции $E_{\text{п.пр}}$ равна сумме кинетической энергии исходных компонентов $E_{\text{кин.исх}}$ и энергии покоя исходных компонентов $E_{\text{п.исх}}$:

$$\begin{aligned} E_{\text{кин.пр}} + E_{\text{п.пр}} &= E_{\text{кин.исх}} + E_{\text{п.исх}}, \\ \Rightarrow E_{\text{кин.пр}} - E_{\text{кин.исх}} &= E_{\text{п.исх}} - E_{\text{п.пр}}. \end{aligned}$$

Сравнивая с формулой (4), получим, что энергетический выход ядерной реакции

$$Q = E_{\text{п.исх}} - E_{\text{п.пр}}.$$

Под энергией покоя мы понимаем энергию тела в собственной системе координат, где оно покоится, в соответствии с уравнением Эйнштейна $E_{\text{п}} = mc^2$. Значит,

$$Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}}) \cdot c^2 \quad (5)$$

Энергетический выход ядерной реакции равен произведению квадрата скорости света в вакууме и разности масс исходных компонентов и продуктов реакции.

Энергетический выход положителен (энергия выделяется), когда масса исходных компонентов больше массы продуктов реакции, и отрицательна в

противном случае. Другими словами, если энергия покоя уменьшается в результате реакции, то кинетическая энергия возрастает.

Изменение массы системы частиц при ядерной реакции обусловлено изменением энергии связи.

Процессы, происходящие при ядерных реакциях, очень сложны, но энергетический выход вычислить можно довольно просто благодаря великой формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Для этого необходимо только записать уравнение реакции, знать массы всех компонентов реакции и вычислить энергетический выход по формуле (5).

Пример 7. Определить энергетический выход реакции

${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$, если атомная масса изотопа лития $m_1 = 7,01601$ а.е.м., водорода $m_2 = 1,00783$ а.е.м., гелия $m_3 = 4,00260$ а.е.м.

Решение. В условии указаны массы атомов, а не ядер. Из них бы надо вычесть массы электронов. Но при вычислении энергетического выхода массы электронов входят дважды с разным знаком, так что вычитать их не будем.

$$Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}}) \cdot c^2 = (m_1 + m_2 - 2m_3) \cdot c^2$$

$$Q = (7,01601 + 1,00783 - 2 \cdot 4,00260) \cdot (1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 =$$

$$= 2,785 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \cdot \frac{1 \text{ эВ}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 17,4 \text{ МэВ.} \leftarrow$$

Ответ. Энергетический выход положителен и составляет 17,4 МэВ. Энергия выделяется за счёт уменьшения массы продуктов реакции.

Пример 8. Определить энергетический выход реакции

${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$, если атомная масса изотопа лития $m_1 = 7,01601$ а.е.м., гелия $m_2 = 4,00260$ а.е.м., бора $m_3 = 10,01294$ а.е.м., водорода $m_4 = 1,00783$ а.е.м.

Решение. $Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}}) \cdot c^2 = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4) \cdot c^2 = -2,0 \text{ МэВ.} \leftarrow$

Ответ. Энергетический выход отрицателен и составляет -2,0 МэВ. Энергия поглощается. То есть кинетическая энергия исходных компонентов была больше кинетической энергии продуктов реакции.

§ 34. Цепные ядерные реакции

В 1934 г. Ф. Жолио-Кюри высказал идею о возможности использования энергии ядерных реакций в практических целях, если удастся осуществлять цепные ядерные реакции.

В 1938 г. учёные Франции, Германии, Англии провели опыты по бомбардировке нейтронами тяжёлых ядер, в результате которых были обнаружены ядра середины таблицы Менделеева. В 1939 г. австрийский физик и



Лиза Мейтнер
(1878–1968)



Отто Роберт Фриш
(1904–1979)

радиохимик Лиза Мейтнер* и её племянник Отто Роберт Фриш дали верную интерпретацию, заключающуюся в том, что при попадании нейтрона в тяжёлое ядро урана происходит деление ядра урана на две примерно равные части. Поскольку в дочерних относительно лёгких ядрах оказывается избыток нейтронов, то вероятен вылет из них нескольких нейтронов.

В том же году французские физики Ф. Жолио-Кюри, Ганс Халбан и Л. Н. Коварский обнаружили, что при делении одного ядра урана на два осколка освобождается 2 или 3 нейтрона и выделяется около 200 МэВ энергии. На долю кинетической энергии разлетающихся осколков приходится около 90% этой энергии. Остальная энергия уносится освободившимися нейтронами, которые могут вызвать деление других ядер урана. В результате может возникнуть цепная ядерная реакция.

Почему ядро урана может разделиться при попадании в него нейтрона? Как между молекулами газов, жидкостей и твёрдых



Фредерик Жолио-Кюри, Ганс фон Халбан (1908–1964),
Лев Николаевич Коварский (1907–1979)

* Мейтнер заметила, что процесс ядерного деления может породить цепную реакцию и привести к большим выбросам энергии. Это заявление вызвало сенсацию в научной среде. Знания, при помощи которых можно было создать оружие невероятной силы, могли оказаться в немецких руках. Американские учёные убедили Альберта Эйнштейна написать предупреждающее письмо Президенту США Франклину Рузвельту, после чего был создан проект Манхэттен по разработке ядерного оружия. Будучи по убеждениям пацифисткой, Мейтнер отказалась работать в этом проекте, заявив: «Я не буду делать бомбу!» Но было поздно – бомбу смогли сделать и без неё.

тел действуют силы межмолекулярного притяжения и отталкивания, так и между нуклонами в ядре действуют ядерные силы притяжения и отталкивания, которые во много раз больше сил межмолекулярного взаимодействия.

Но кроме ядерных сил между протонами в ядре действуют силы электрического отталкивания. Причём каждый протон отталкивается от всех остальных протонов в ядре. А силами ядерного взаимодействия каждый нуклон взаимодействует только со своими соседями. Ядерные силы обладают свойствами насыщения из-за того, что их взаимодействие очень сильно уменьшается с увеличением расстояния.

Баланс этих сил таков, что при попадании быстрых и медленных нейтронов ядро урана-235 становится неустойчивым и делится на 2 части с освобождением 2-х или 3-х нейтронов (рис. 20).

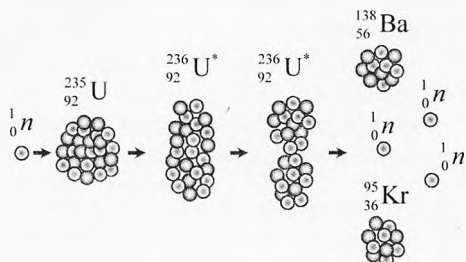
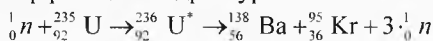
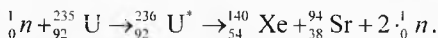


Рис. 20. Деление ядра урана

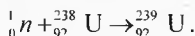
Типичный пример реакции с ядром урана-235:



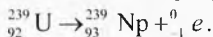
или



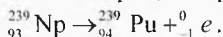
Ядро же урана-238 при попадании в него нейтрона не делится:



Значит, оно крепче ядра урана-235. Но оно становится β^- радиоактивным, с периодом полураспада 23 мин и превращается в нептуний.



Нептуний, в свою очередь, тоже β^- радиоактивен с периодом полураспада около двух суток. Испуская электрон, он превращается в плутоний.



Плутоний обладает двумя замечательными особенностями: он относительно стабилен. Его период полураспада около 24000 лет, и он, как ${}_{92}^{235}\text{U}$, делится под действием медленных нейтронов. Значит, в реакторе на медленных нейтронах может воспроизводиться ядерное горючее из ${}_{92}^{238}\text{U}$. В таком реакторе при сгорании одного килограмма ${}_{92}^{235}\text{U}$ воспроизводится 0,6–0,7 килограмма горючего ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. То есть со временем реактор будет работать с уменьшающейся мощностью. Поэтому большая часть урана-238 в конечном счёте идёт в радиоактивные отходы.

В естественном уране изотоп ^{235}U составляет 0,72%, а изотоп ^{238}U – 99,275%. Поэтому один из путей осуществления цепной реакции – это разделение изотопов и получение в большом количестве ^{235}U .

Второй путь – воспроизводство горючего, превращение ^{238}U в ^{239}Pu , что используется в реакторах на быстрых нейтронах. В реакторах такого типа используется обогащенный $^{235}_{92}\text{U}$ (не менее 15% от всей массы урана). Их называют реакторами-размножителями. Реакторы на быстрых нейтронах могут воспроизводить до 1,5 кг $^{239}_{94}\text{Pu}$ при сгорании 1 кг урана-235.

Серьёзным недостатком реакторов-размножителей являются возможность использовать полученный плутоний для военных целей.

Коэффициент размножения нейтронов. Скорость цепной реакции деления ядер характеризуется коэффициентом размножения нейтронов.

Коэффициент размножения нейтронов равен отношению числа нейтронов в теле в данном поколении цепной реакции к их числу в следующем поколении (рис. 21):

$$k = \frac{N_{i+1}}{N_i},$$

где N_i – число нейтронов в i -том поколении, а N_{i+1} – в следующем за ним.

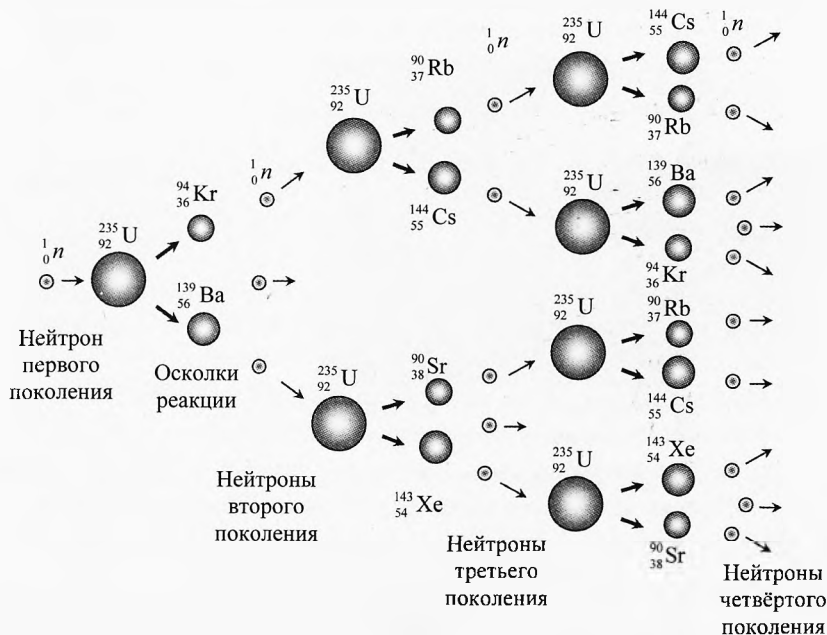


Рис. 21. Размножение нейтронов

При $k = 1,00000$ реакция протекает стационарно, число нейтронов в активной зоне остается неизменной.

Если $k < 1$, то реакция затухает.

Если $k > 1$, то скорость реакции нарастает.

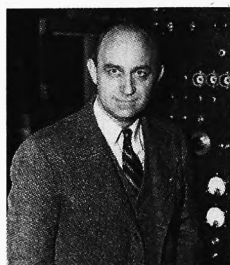
В ядерных реакторах осуществляется управляемая цепная ядерная реакция. Для этого коэффициент размножения с высокой точностью поддерживают равным единице. Если k достигнет значения 1,01, то развивается неуправляемая реакция, приводящая к взрыву.

Критическая масса. В атомных бомбах в момент взрыва осуществляется неуправляемая цепная реакция с $k > 1$. Но для того, чтобы произошёл взрыв, необходима так называемая критическая масса образца ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Дело в том, что при попадании нейтрона (из атмосферы) в изделие из чистого урана-235 малого размера возникает цепная неуправляемая реакция, но нейтроны скоро выйдут за пределы активной зоны (из изделия обратно в атмосферу) и реакция прекратится.

На открытом пространстве для тела шарообразной формы из урана-235 критическая масса составляет 47 кг (диаметр 17 см). Если же установить отражающие стенки, то критическая масса значительно уменьшается. В артиллерийских снарядах с ядерной начинкой, где осуществляется сжатие ядерного вещества за счёт взрыва порохового заряда, критическая масса уменьшается до нескольких сот граммов.

§ 35. Ядерный реактор



Энрико Ферми
(1901–1954)

Управляемые цепные реакции деления ядер осуществляются в ядерных реакторах. Впервые управляемая цепная реакция деления ядер была осуществлена в 1942 г. в США под руководством итальянского физика Энрико Ферми.

Цепная реакция с коэффициентом размножения нейтронов $k = 1,0006$ длилась 28 минут, после чего реактор был остановлен.

В Советском Союзе первый ядерный реактор был запущен в 1946 г. под руководством академика И. В. Курчатова.

В настоящее время в мире работает около тысячи ядерных реакторов различного типа и назначения.

Принципиальная схема ядерного реактора приведена на рис. 22.

Таблетки диоксида урана располагаются в активной зоне в топливных стержнях (1), называемых теплопроводящими элементами (ТВЭЛ).

Наиболее эффективное деление $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{239}_{94}\text{Pu}$ происходит под действием медленных нейтронов (при малой скорости нейтрона больше вероятность встречи с тяжёлым ядром).

Но вторичные нейтроны, образующиеся при делении ядер, являются быстрыми. Их кинетическую энергию нужно уменьшить в десятки миллионов раз. Для этого их замедляют, вводя в активную зону замедлитель (2). В качестве замедлителя обычно используется обычная вода (H_2O) и тяжёлая вода (D_2O). В воде много протонов, близких по массе с нейтронами.

При лобовом столкновении движущегося шара, например бильярдного, с неподвижным налетающий шар останавливается, а изначально неподвижный приобретает его скорость. В случае нелобового столкновения энергия движущегося шара уменьшается частично. Если же маленький шар упруго сталкивается с тяжёлым шаром, то маленький шар отскакивает практически без потери энергии.

Аналогичная картина происходит при торможении нейтронов водой. Для уменьшения энергии нейтрона с 3 МэВ до 0,025 эВ, требуется в среднем 18 столкновений с протонами (ядрами водорода в молекулах воды).

Хорошим замедлителем также считается графит, ядра которого не поглощают нейтронов. Для уменьшения утечки нейтронов и увеличения коэффициента размножения активную зону окружают оболочкой (3), отражающей нейтроны.

Скоростью цепной реакции управляют с помощью передвигаемых в активной зоне управляющих стержней (4), изготавливаемых из кадмия, карбида бора — материалов, сильно поглощающих нейтроны. Чем глубже погружаются управляющие стержни в активную зону, тем больше поглощается нейтронов. В случае нештатной ситуации предусмотрено автоматическое быстрое опускание стержней, что, например, спасло в Чернобыле от ядерного взрыва.

Для защиты обслуживающего персонала от потока нейтронов и γ -квантов предусмотрена радиационная защита (5). Быстрые нейтроны замедляются водородосодержащей стенкой «нейтростоп» толщиной 6 см, а затем поглощаются слоем из тяжёлых элементов. От радиации γ -квантами используется бетон с железным наполнителем и соединениями бора.

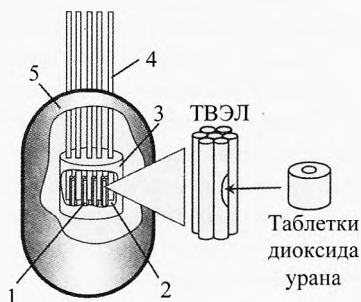


Рис. 22. Ядерный реактор



Игорь Васильевич
Курчатov (1903–1960)

§ 36. Термоядерные реакции

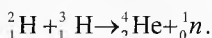
Большая энергия выделяется не только при делении тяжёлых ядер, но и при синтезе лёгких ядер. Для соединения ядер нужно их приблизить на расстояние примерно 2 фм, где начинают действовать ядерные силы притяжения. Но этому мешают кулоновские силы отталкивания протонов. Лёгкие ядра дейтерия и трития нужно разогнать до таких скоростей, чтобы они могли достаточно сблизиться. Для этого нужно нагреть дейтериево-тритиевую мишень до температуры в десятки миллионов кельвин. Рассматриваются два основных способа осуществления термоядерной реакции.

1. Это лазерный термояд, когда мишень (стеклянный шарик, внутри которого находится смесь дейтерия с тритием) попадает в точку, где сфокусированы импульсные потоки 140 лазеров. Благодаря чему происходит быстрый нагрев мишени.

2. Управляемую термоядерную реакцию синтеза гелия из тяжёлых изотопов водорода можно осуществить, нагревая плазму путём пропускания электрического тока через неё. Для удержания горячей плазмы (которая может прожечь любые оболочки) от соприкосновения со стенками камеры предложено использовать Тороидальные Камеры с Магнитными Катушками (ТОКАМАКи).

На экспериментальной установке ТОКАМАК-10 российским физикам удалось нагреть плазму до температуры 13 миллионов кельвин.

Установлено, что меньше всего энергии для реализации реакции синтеза по сравнению с энергией, выделяемой во время реакции, требуется для смеси двух изотопов водорода, дейтерия и трития:



Вычислим энергию, выделяемую при соединении одного ядра дейтерия с ядром трития.

$$m_2 = 2,01353 \text{ а.е.м.}, \quad m_3 = 3,0155 \text{ а.е.м.},$$

$$m_3 = 4,0015 \text{ а.е.м.}, \quad m_4 = 1,00866 \text{ а.е.м.}$$

Энергетический выход ядерной реакции:

$$Q = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4)c^2,$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= (2,01353 + 3,0155 - 4,0015 - 1,00866) \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \times \\ &\times (2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \approx 2,815 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = 17,6 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

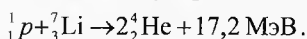
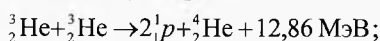
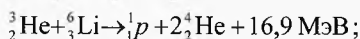
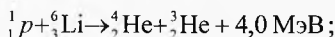
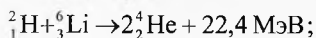
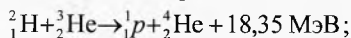
При синтезе одного киломоля гелия $\nu = 1$ кмоль (число молекул $N = 6 \cdot 10^{26}$, масса 4 кг), выделится энергия:

$$Q = Q_1 \cdot N = 2,815 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \cdot 6 \cdot 10^{26} \approx 1,7 \cdot 10^{15} \text{ Дж}.$$

Это в 20 раз больше энергии атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму. В тротиловом эквиваленте эта энергия эквивалентна взрыву 400 000 тонн тротила*. Недостаток этой реакции – выход нежелательной нейтронной радиации, а также высокая стоимость трития, 1 кг которого в настоящее время стоит около 30 млн долларов.

Возможны и некоторые другие реакции. Выбор топлива зависит от многих факторов – его доступности и дешевизны, энергетического выхода, лёгкости достижения условий, требующихся для реакции термоядерного синтеза (в первую очередь температуры), необходимых конструктивных характеристик реактора и т.д.

«Безнейтронные» реакции. Наиболее интересны так называемые безнейтронные реакции, так как порождаемый термоядерным синтезом нейтронный поток (например, в реакции дейтерий–тритий) уносит значительную часть мощности и порождает наведенную радиоактивность в конструкции реактора. Реакция дейтерия с гелием-3 является перспективной, в том числе и по причине отсутствия нейтронного выхода:



В настоящее время (2016 г.) управляемый термоядерный синтез ещё не осуществлён в промышленных масштабах. Окончание строительства международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) на юге Франции в 60 км от Марселя, отложено с 2016 до 2025 г.

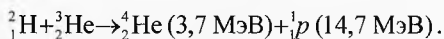
В настоящее время контролируемая термоядерная реакция осуществляется путём столкновения дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$ с выделением гелия ${}^4_2\text{He}$ и «быстрого» нейтрона:



Однако при этом большая часть (80 %) выделяемой кинетической энергии приходится именно на нейтрон. В результате столкновений осколков с другими атомами эта энергия преобразуется в тепловую. Помимо этого, быстрые нейтроны создают значительное количество радиоактивных отходов.

В отличие от этого, синтез дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и гелия ${}^3_2\text{He}$ почти не производит радиоактивных продуктов:

* **Тротиловый эквивалент** – мера энерговыделения, выраженная в количестве тротила (тринитротолуола), выделяющем при взрыве такое же количество энергии. 1 грамм тротила выделяет 1000 термохимических калорий или 4184 джоуля.



Это позволяет использовать более простые и эффективные системы преобразования кинетической энергии в реакции синтеза, такие как магнетогидродинамический генератор. Но осуществить её в многократно труднее, чем реакцию дейтерия с тритием.

Стоимость электроэнергии в сравнении с традиционными источниками. Критики указывают, что вопрос о рентабельности ядерного синтеза в производстве электроэнергии остаётся открытым. Себестоимость производства электроэнергии с использованием термоядерного реактора будет, вероятно, наиболее высокой в сравнении с традиционными источниками.

Отдельно стоит вопрос стоимости исследований. Страны Евросоюза тратят около 200 млн евро ежегодно на исследования, и прогнозируется, что пройдет ещё несколько десятилетий, пока промышленное использование ядерного синтеза станет возможным. Сторонники неядерных источников считают, что было бы целесообразней направить эти средства на внедрение возобновляемых источников энергии.

Несмотря на распространённый оптимизм (с первых исследований в начале 1950-х годов в СССР) существенные препятствия между пониманием процессов ядерного синтеза, технологическими возможностями и практическим использованием ядерного синтеза до сих пор не преодолены. Неясным является даже то, насколько может быть рентабельным производство электроэнергии с использованием термоядерного синтеза. Хотя наблюдается постоянный прогресс в исследованиях, учёные то и дело сталкиваются с новыми проблемами. Например, проблемой является разработка материала, способного выдержать нейтронную бомбардировку, которая по оценке должна быть в 100 раз (!) интенсивнее, чем в традиционных ядерных реакциях.

Мы, авторы книги, считаем, что в XXI веке термоядерных электростанций на Земле не будет, но при этом напомним старую истину: многие дела считались невозможными, пока они не были совершены.

§ 37. Атомная энергетика

Ядерные реакторы используются преимущественно в качестве силовых установок на надводных кораблях, подводных лодках и атомных электростанциях (АЭС).

Принцип работы атомной электростанции. Ядерное горючее содержится в металлических трубках, называемых тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ) в форме таблеток (рис. 22). При делении ядер стенки трубок нагреваются. Вода, используемая чаще всего в качестве теплоносителя, нагревается стенками ТВЭЛов до температуры 300°C под давлением около 100 атмосфер (рис. 23). С помощью насосов она выводится из активной зоны реактора и поступает в парогенератор, где нагревает воду второго контура, превращая её в

пар. Водяной пар с температурой 230°C под давлением 30 атмосфер направляется на лопатки паровой турбины. Паровая турбина вращает ротор электрогенератора. Пар конденсируется и охлаждается третьим контуром воды, которая используется затем для бытовых нужд. Таким образом, на атомной электростанции используется три разных контура с водой, чтобы исключить выход радиоактивных излучений за пределы электростанции.

Первая атомная электростанция в мире была построена в Советском Союзе в подмосковном Обнинске и запущена 26 июня 1954 г. Её мощность составляла всего 5 МВт. Она была оснащена уран-графитовым канальным реактором с водяным теплоносителем. Инициатором её создания и руководителем

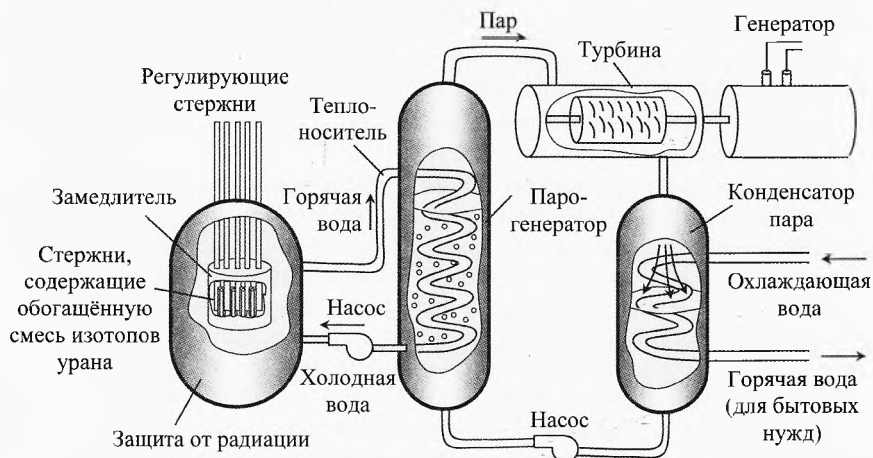


Рис. 23. Атомная электростанция

был академик И. В. Курчатов. Идеи конструкции её активной зоны были предложены им совместно с профессором С. М. Фейнбергом. Главным конструктором стал академик Н. А. Доллежал. Станция проработала безаварийно 50 лет. В настоящее время на её базе создан музей ядерной энергетики.

В России на долю АЭС приходится 17% выработки электроэнергии страны. Всего в России 10 АЭС, на которых задействовано 35 энергоблоков. Суммарная мощность российских АЭС составляет 25,5 ГВт.



Савелий Моисеевич
Фейнберг
(1910–1973)



Николай Антонович
Доллежал
(1899–2000)










В европейской части РФ доля атомной энергетики в общем балансе региона составляет 30%, а на северо-западе страны почти 40%. До 2030 года планируется построить 40 новых энергоблоков. Доля АЭС в выработке электроэнергии должна возрасти в России до 25%.

Атомная энергетика в мире. 31 страна мира производит электроэнергию на 194 атомных электростанциях (440 энергоблоков). Общая установочная мощность всех АЭС в мире составляет 374 ГВт. На долю трёх стран: США, Франции и Японии – приходится 56% всех установочных мощностей АЭС.

Таблица 4. Атомная энергетика по странам в 2010 г.

Страна	Мощность, МВт	Доля от электроэнергетики	Кол-во станций	Кол-во блоков
 Аргентина	935	5,91%	2	2
 Армения	375	39,42%	1	2
 Бельгия	5 927	51,16%	2	7
 Болгария	1 906	33,13%	1	2
 Бразилия	1 884	3,06%	1	2
 Великобритания	10 137	15,66%	9	19
 Венгрия	1 889	42,10%	1	4
 Германия	20 490	28,43%	12	17
 Индия	4 391	2,85%	5	20
 Испания	7514	20,09%	6	8
 Канада	12 569	15,07%	5	18
 Китай	11 058	1,82%	4	14
 Мексика	1 300	3,59%	1	2
 Нидерланды	482	3,38%	1	1
 Пакистан	425	2,60%	2	3
 Россия	22 693	17,09%	10	32
 Румыния	1 300	19,48%	1	2
 Словакия	1 816	51,80%	2	4
 Словения	688	37,30%	1	1
 Хорватия		8,00%		
 США	101 240	19,59%	66	104
 Тайвань	4 927	19,30%	3	6
 Украина	13 107	48,11%	4	15
 Финляндия	2 716	28,43%	2	4
 Франция	63 130	74,12%	19	58
 Чехия	3 678	33,27%	2	6
 Швейцария	3 263	38,01%	4	5
 Швеция	9 298	38,13%	3	10
 ЮАР	1 800	5,18%	1	2
 Южная Корея	18 698	32,18%	5	21
 Япония	44 102	29,21%	17	50
Итого в мире	374 093	16%	194	440

Таблица 5. Производство электроэнергии в 2010 г.

Место	Страна	Производство электроэнергии	
		ГВт·ч в год	МВт
1	 США	4 325 900	493 500
2	 КНР	4 206 500	479 879
3	 Япония	1 145 300	130 656
4	 Россия	1 036 800	118 278
5	 Индия	922 200	105 205
6	 Канада	629 900	71 859
7	 Германия	621 000	70 844
8	 Франция	573 200	65 391
9	 Республика Корея	497 200	56 721
10	 Бразилия	484 800	55 306
11	 Великобритания	381 200	43 487
12	 Испания	300 400	34 270
13	 Италия	298 200	34 019
14	 Мексика	270 000	30 802
15	 ЮАР	268 100	30 585
16	 Китайская Республика	247 000	28 178
17	 Австралия	245 300	27 984
18	 Иран	226 100	25 794
19	 Саудовская Аравия	214 000	24 413
20	 Турция	210 200	23 980
21	 Украина	187 900	21 436
22	 Индонезия	166 400	18 983
23	 Польша	157 400	17 956
24	 Таиланд	156 400	17 842
25	 Швеция	155 400	17 728
26	 Египет	143 500	16 371
27	 Аргентина	128 500	14 659
28	 Норвегия	124 500	14 203
29	 Венесуэла	116 700	13 313
30	 Малайзия	116 200	13 256
Итого в мире		20 000 000	2 281 605

Ещё 20% энергии производят Россия, Южная Корея, Германия, Украина и Канада. Следует отметить, что на втором месте по производству энергии на АЭС занимает Франция, установочная мощность 63 ГВт, что составляет 74% от всей вырабатываемой в стране энергии (на 19 АЭС, 58 энергоблоках).

Годовое потребление электроэнергии в мире в 2010 году составило около 20 триллионов кВт·ч. Это эквивалентно средней потребляемой мощности около 2 280 ГВт. Значит, средневзвешенная доля атомной энергетики в мире оставляет около 16%.

§ 38. Проблемы и перспективы энергетики

Особенности обогащения урана. Природный уран состоит из трёх изотопов: ^{238}U (99,275%), ^{235}U (0,720%) и ^{234}U (0,006%). Перед использованием в ядерных реакторах на тепловых нейтронах его необходимо обогатить по изотопу ^{235}U до 4–5% путём разделения изотопов.

Соединения урана превращают в газ, который за счёт мельчайшей разности в массе изотопов (всего 3 нейтрона на каждое ядро!) разделяется в очень сложных обогащающих установках двух типов: газовых диффузорах и газовых центрифугах.

Обогащение урана в СССР и в странах Запада начиналось с газодиффузионной технологии. Но в конце 1940-х годов у СССР катастрофически не хватало энергии и советские учёные вынуждены были искать альтернативную менее энергоёмкую и более производительную технологию. Эту задачу удалось решить с помощью центрифуг. В дальнейшем в условиях Холодной войны каждая технология стала развиваться по отдельности – диффузия на Западе, а центрифуги – в СССР. Поэтому Запад узнал об успехах СССР лишь в 1990-е годы, когда в рамках контроля за процессом разоружения обе стороны частично раскрыли информацию. Тогда и выяснилось, что Россия обладает значительно более производительным и экономичным процессом. Ликвидировать этот разрыв западные компании и страны не смогли до сих пор.

В итоге газодиффузное обогащение оказалось более чем в 20 раз энергозатратным, нежели обогащение на центрифугах.

В 1993 г. Россия и США подписали соглашение ВОУ-НОУ (или «Мегатонны в мегаватты»), которое предусматривает необратимую переработку и продажу российского оружейного ВОУ (высокообогащенного урана, около 90% по изотопу ^{235}U) в НОУ (низкообогащенный уран, 4–5%) предназначенный для использования в качестве топлива для атомных электростанций США. Соглашение рассчитано на 20 лет – до 2013 года, и предусматривает переработку 500 тонн накопленного во времена СССР оружейного урана, что соответствует 20 000 уничтоженных ядерных боеголовок. Боеголовка условно принята содержащей 25 кг урана, на самом деле речь, идёт об «эквиваленте» – по факту разбавляется и отгружается просто оружейный уран из советских запасников.

В результате этой программы российская обогащательная отрасль не только осталась на плаву, но и получила гарантированный сбыт своего топлива в США.

Благодаря дешёвому российскому урану собственная Американская обогащательная промышленность по факту пришла в глубокий кризис.

Программа ВОУ-НОУ закончилось в 2013 году. Всего в рамках программы было вывезено 14446 тонн НОУ. Дальнейшая работа по поставкам российского урана на американский рынок осуществляется в рамках отдельных уже полностью коммерческих соглашений.

До конца 1970-х годов пока уран был дешёвым (на старых, хороших месторождениях) хвосты западных заводов уходили в отвалы на уровне 0,20% содержания ^{235}U . В 1980-е годы в хвосты стали складывать уран с остаточным содержанием 0,30% ^{235}U . В 1990-е годы, с массовым появлением на западном обогащательном рынке российских центрифуг, для которых хвосты с содержанием изотопа ^{235}U в 0,20–0,30% были ещё и «ого-го каким сырьём», Запад вообще предпочёл на своих газодиффузионных заводах ограничиться незначительным обогащением, складывая в «хвост» уран с содержанием ^{235}U в 0,35%.

Это не только поднимало энергетику газодиффузионных заводов, которая по сути снимала «сливки», но и позволяло очень сильно экономить их мощность, одновременно повышая их производительность.

Дошло до того, что в 1990-е и первую половину 2000-х 15% мощности российского обогащенного комплекса просто занималось перемалыванием западных «хвостов», подчищая рынок вторичного урана за газодиффузионными заводами и перерабатывая старые западные отвалы.

Добыча и обогащение урана – это мировой «тяни-толкай». К примеру, можно получить природный уран по \$40 за килограмм из богатой ураном руды где-нибудь в Канаде. И обогатить его на газодиффузионном заводе в США по \$70 за килограмм.

А можно добыть уран по \$80 за килограмм из бедных руд, где урана доли процента. Но вот обогатить такой уран можно будет только на российских центрифугах (по \$20 за килограмм), потому что на газодиффузионном заводе он получится сверхдорогим. И в итоге это получится дешевле, чем богатая ураном руда, переработанная на газодиффузионном заводе.

В настоящее время около 35% урана обогащается на диффузорах, а 65% – на центрифугах.

Влияние крупных аварий на АЭС. Производство топлива для энергоустановок и работа самих энергоустановок любых видов не обходится без человеческих жертв и вреда для здоровья людей. Мы слышим, как гибнут шахтёры, добывающие уголь. А тепловые электростанции, работающие на угле, являются самыми грязными в экологическом отношении.

Экологические выбросы электростанции существенно различаются при использовании разных нефтепродуктов. К примеру, Чебоксарская ТЭЦ-2, расположенная в городе, до 90-х годов работала на мазуте и в течение года выбрасывала по 100 кг токсичных отходов в атмосферу на каждого жителя города и его окрестностей. В начале 90-х годов её перевели работать на природный газ. Количество вредных выбросов уменьшилось в 15 раз!

Атомные электростанции не требуют транспортировки большого количества топлива и не загрязняют окружающую среду во время работы. Люди на них практически не гибнут при работе в штатном режиме. Но есть два основных «но». Во-первых, это проблема безопасного захоронения ОЯТ (отходов ядерного топлива) и радиоактивных конструкций АЭС, отработавших свой срок.

Второе основное «но» – это аварии на атомных электростанциях. В результате Чернобыльской аварии большое количество людей было переселено в другие места жительства. Много людей получили лучевые заболевания. Во многих областях Украины, Белоруссии и России из-за радиоактивного заражения местности (в первую очередь изотопами стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$ и цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$ с периодом полураспада около 30 лет) растут радиоактивно зараженные ягоды, овощи, фрукты и потребляющая их фауна, в том числе люди.

После этой аварии Россия не решила строить новые АЭС из-за протеста народа. Увеличение мощностей в России ныне осуществляется постройкой новых энергоблоков на существующих ранее АЭС, построенных при социализме.

Главная причина аварии на Чернобыльской АЭС – это человеческий фактор и «русское авось». Повторение подобной трагедии в России практически невозможно, ибо после неё разработаны новые системы управления, дублирующие друг друга, что позволило исключить человеческий фактор.

Несомненно, что другие страны тоже улучшают уровень безопасности работы АЭС. Тогда почему же грянула ещё большая авария в Японии (!?) на АЭС «Фукусима-1»? В марте 2011 г. в результате сильнейшего в Японии землетрясения три работающих энергоблока были остановлены действием аварийной защиты. Однако спустя час из-за последовавшего за землетрясением цунами было прервано электроснабжение, необходимое для охлаждения остановленных реакторов.

Да, это самая старая АЭС в Японии, построенная ещё американцами в 1966–1971 гг. Но как можно было построить насосы (работающие на электричестве) под землёй (!), которые качают воду в контуры АЭС. Цунами их накрыло, они отключились, и начала развиваться трагедия. Ведь, даже заглушив цепную ядерную реакцию, невозможно сразу прекратить выделение тепла, поскольку радиоактивные осколки деления дают немалую (несколько процентов) тепловой мощности ещё длительное время. И реактор необходимо продолжать охлаждать.

Атомная электростанция находится у берега. А разве не известно было, что в Японии цунами не редкость? Поэтому строить их надо, как церкви, на высоком месте.

Выводы из этой трагедии мировое сообщество сделает серьёзные. Практически мгновенной оказалась реакция Германии (которую мы особо уважаем за то, что она утилизирует (перерабатывает) 97% бытовых и промышленных отходов). Так вот, Германия, занимающая пятое место в мире по выработке энергии на АЭС (доля атомной энергии в которой составляет более 28% от всей производимой энергии в стране), приняла решение до 2022 г. постепенно прекратить производство электроэнергии на АЭС. В 2011 г. Германия закрыла половину АЭС, уменьшив суммарную мощность АЭС с 20,5 ГВт до 12 ГВт.

Этот пример подтолкнет к разработке восполняемых альтернативных источников энергии. Так с 2000 по 2011 гг. производство электроэнергии в Германии за счёт ветряных электростанций увеличилось с 6,5 до 28 ГВт, а с 2005 по 2011 гг. на солнечных батареях пиковая мощность выработки электроэнергии увеличилась с 2,5 до 25 ГВт. Несмотря на то, что эта мощность превышает выработку энергии на АЭС (половина из которых уже закрыта к 2012 году), появились новые проблемы: практически все ветровые электростанции Германии расположены на побережье Северного и Балтийского морей, а основные промышленные потребители, наиболее остро пострадавшие от вывода из сети атомной мощности, – наоборот, в южной части Германии. Кроме того, альтернативные источники энергии невозможно контролировать на предмет выдачи постоянной мощности в общегерманскую сеть, ибо мощность ветряных установок сильно зависит от погоды, а мощность солнечных батарей колеблется каждые сутки от нуля до максимального значения. Результатом такого изменения в производстве электрической энергии явилась огромная нагрузка на германскую распределительную сеть, что привело к пятикратному увеличению количества аварий (с 39 за зиму 2010/2011 гг. до 197 аварий за зиму 2011/2012 гг.). Так что резкое изменение структуры энергетики страны проходит весьма болезненно.

Атомная энергетика остаётся пока единственной отраслью, способной в экономических масштабах заместить традиционную тепловую энергетику. Гидроэнергетика ограничена наличием водных ресурсов, в нетрадиционной энергетике пока нет технологий, способных составить реальную конкуренцию. И поэтому с чисто экономической точки зрения нет оснований говорить об отказе от ядерных планов. Но существует фактор общественного мнения, когда развитие атомной энергетики становится элементом политики и за отказ от её развития политиче-

ские партии набирают дополнительные очки на выборах. От этого последнего фактора будет зависеть будущее атомной энергетики.

Не удивительно, что Япония, имевшая почти треть электрогенерации за счёт ядерных реакторов, после Фукусимской аварии закрыла почти все АЭС, многие из которых построены в 1970-х годах, и в настоящий момент времени имеет на ходу всего 2 реактора из 54!

Перспективы развития ядерной энергетики. В отличие от Японии и Германии Китай намерен наращивать мощности мирного атома. Так по состоянию на 2016 год Китай имеет 34 действующих промышленных ядерных реактора, размещённых на 14 АЭС, суммарной мощностью 29,4 ГВт. Также 21 блок находится в стадии строительства и 32 запланировано. Китай собирается увеличить число ядерных реакторов до 110 к 2030 году и стать одним из крупнейших в мире потребителей атомной энергии. Согласно проекту плана 13-й пятилетки (2016–2020) Китай выделит 500 миллиардов юаней (78 миллиардов долларов) на строительство атомных станций с использованием своих ядерных технологий, прибавляя от шести до восьми атомных реакторов ежегодно, начиная с 2016 года.

С одной стороны это проявление озабоченности по поводу качества воздуха и глобального потепления. АЭС выдвигается как альтернатива угольных электростанций в Китае. А с другой стороны, из-за бурного роста экономики страны ей катастрофически не хватает энергии.

Будучи одним из крупных импортёров нефти Китай получает из неё всего 18% энергии страны.

Согласно планам Китая в энергетике к 2020 году около 6% будет в ядерной энергетике (для сравнения, у США вырабатывается 19% электроэнергии). И ещё около 3,5% – в ветряных и солнечных электростанциях, из которых лишь 2/3 будут подключены к общим энергосетям, а оставшиеся будут снабжать электроэнергией сильноудалённые китайские районы.

Однако основой электрогенерации в Китае и в 2010 году (75%), и в 2020 году (65%) останется экологически грязный уголь. Пик добычи угля в Китае ожидается в 2025–2027 гг. При этом, китайцы смогут добывать около 5 триллионов тонн угля в год.

Бурно развивающаяся Индия по состоянию на апрель 2016 года, имеет 21 действующий промышленный ядерный реактор суммарной мощностью 5,3 ГВт. Также в стране строится 6 новых реакторов, общей мощностью около 4,3 ГВт.

Россия к 2017 г. планирует ввести дополнительно к уже имеющимся мощностям и взамен выбывающих ещё 9,2 ГВт атомной генерации на уже строящихся энергоблоках. К 2020 году, возможно, введёт в эксплуатацию ещё 5 ГВт атомной генерации дополнительно на АЭС, которые находятся на стадии проектирования.

Кроме того, Россия также ведёт уникальный проект по созданию плавучих атомных электростанций малой мощности. Плавучая станция может использоваться для получения электрической и тепловой энергии, а также для опреснения морской воды. В сутки она может выдать от 40 до 240 тысяч тонн пресной воды. Установленная электрическая мощность каждого реактора – 35 МВт, тепловая мощность – 140 гигакалорий в час. Срок эксплуатации станции составит минимум 36 лет.

Энергетическая эффективность. Производство электроэнергии различными видами электростанций приводит к различной энергетической эффективности, то есть отношению полученной полезной энергии к энергии, затраченной на строительство и эксплуатацию электростанции, на добычу и утилизацию топлива, и т.д.

Так гидроэлектростанции выдают в 40–200 раз больше энергии, чем требуют на её постройку и обслуживание. Энергетическая эффективность АЭС составляет

40–60 (при использовании центрифуг) и 10–24 (при использовании диффузного обогащения), у ветряных установок она составляет 6–50, у угольных электростанций – 7–34, у природного газа – 6–26, у солнечных элементов – 4–10.

Энергетическая эффективность является одним из определяющих факторов в энергетической политике страны наряду с экологичностью и безопасностью технологий, а также с доступностью источников энергии в данном регионе (топлива, ветра, солнечного света, рек и т.п.)

§ 39. Угроза ядерной войны

Атомная бомба. Первый взрыв устройства, которое можно назвать атомной бомбой, был осуществлён на полигоне США в 1944 году. На учёных и военных он произвёл ошеломительное впечатление, участвовавший на испытаниях Эн-рико Ферми воскликнул: «Какой замечательный физический эксперимент!».

Первые атомные бомбы для военного применения были изготовлены в США в 1945 году. Военные США решили провести «эксперимент» в японском городе Хиросима 6 августа с повторением через три дня в Нагасаки. Для чистоты «эксперимента» они не бомбили два эти города обычными авиабомбами в течение длительного времени. При взрыве бомбы, которую сбросили на Хиросиму, в результате цепной реакции разделились ядра урана общей массой 1 кг. При этом освободилось $8,4 \cdot 10^{13}$ Дж энергии, что эквивалентно взрыву 20 000 тонн тротила.

Эффект от уничтожения двух японских городов оказался столь внушительным (количество погибших составило от 90 до 166 тысяч человек в Хиросиме и от 60 до 80 тысяч человек – в Нагасаки), что уже 66 лет на Земле не происходит очень кровопролитных войн.

В тысячи раз ещё более мощным оружием является термоядерная бомба. В ней атомная бомба служит лишь «запалом», а основная энергия выделяется при реакции термоядерного синтеза гелия (из дейтерия и трития), а также в результате деления ядер урана-238 быстрыми нейтронами, которые образуются при термоядерном синтезе:

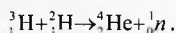


Рис. 24. Ядерный гриб над Хиросимой

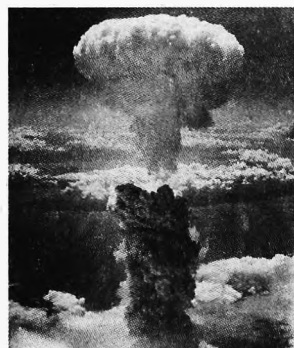


Рис. 25. Ядерный гриб над Нагасаки

Поскольку для исходных компонентов: дейтерия, трития и урана-238 – критической массы не существует, то ограничения мощности для термоядерной бомбы нет. В Советском Союзе были разработаны технологии для термоядерных бомб от 1 Мт до 600 Мт (!).

30 октября 1961 года СССР произвёл первый взрыв водородной бомбы АН602 (она же «Царь-бомба», она же «Кузькина мать»). Эту бомбу разрабатывали с 1954 по 1961 год А. Д. Сахаров, В. Б. Адамский, Ю. Н. Бабаев, Ю. А. Трутнев и другие. Это самое мощное взрывное устройство за всю историю человечества составило примерно 58 Мт тротилового эквивалента (рис. 26). Это в 2000 раз мощнее бомбы, взорвавшейся над Хиросимой.



Андрей Дмитриевич
Сахаров (1921–1989)



Виктор Борисович
Адамский (1923–2005)



Юрий Николаевич
Бабаев (1928–1986)



Юрий Алексеевич
Трутнев (р. 1927)

Ядерный гриб взрыва поднялся на высоту 67 км, диаметр его двухъярусной «шляпки» достиг (у верхнего яруса) 95 км. Излучение могло вызвать ожоги третьей степени на расстоянии до 100 км. Ударная волна, возникшая в результате взрыва, три раза обогнула земной шар, свидетели почувствовали удар и смогли описать взрыв на расстоянии тысячи километров от его центра. Масса бомбы составляла 26,5 т. Она была сброшена на парашюте с самолёта Ту-95В в Северном ледовитом океане у Новой Земли.



Рис. 26. «Кузькина мать»

Бомба была взорвана в разгар Карибского кризиса для устрашения США. Этот взрыв нагнал столько страха, что очень поспособствовал уменьшению угрозы термоядерной войны.

Общие запасы ядерного оружия составляют около 50000 бомб. Общая мощность этого оружия соответствует взрыву примерно 15 млрд тонн тротила, то есть приблизительно по 2,5 т на каждого жителя Земли. Это так много, что ядерная война между двумя странами угрожает гибелью всему человечеству. Во время холодной войны ходила шутка: Советскому Союзу предлагали взорвать всё своё ядерное оружие на своей территории – вы погибнете быстро и легко, а западный мир будет погибать мучительно и долго.

В результате ядерного конфликта может наступить ядерная ночь, т.к. дым от многочисленных пожаров закроет всю атмосферу, и температура на суше может понизиться на 30–40 градусов из-за того, что большая часть света не будет доходить до Земли. Не меньшую опасность для людей представляет радиоактивное заражение местности. Взрыв 500 термоядерных бомб мощностью по 20 Мт в тротиловом эквиваленте может сделать непригодной для жизни человека всю сушу.

А каковы будут масштабы психических заболеваний трудно себе представить. Так что борьба за мир и сокращение оружия массового уничтожения: ядерного, химического и биологического – чрезвычайно актуальна. К настоящему моменту уничтожено всё тактическое ядерное оружие, уменьшаются запасы стратегического ядерного оружия. Довольно серьёзная задача – нераспространение ядерного оружия. Некоторые страны стремятся в «ядерный клуб», хотя туда их не зовут. В последние годы появилось ядерное оружие в Индии и Пакистане. На этом пути находятся Северная Корея и Иран. Возможно, уже создано ядерное оружие в Израиле. Расползание по миру ядерного оружия увеличивает вероятность региональных и глобального конфликтов. С другой стороны для страны, у которой есть ядерное оружие и технология его производства, оно является мощнейшим сдерживающим фактором от военного вторжения со стороны других стран.

§ 40. Мероприятия по ситуации «Атомная тревога»

В качестве лирического отступления представим Вам отрывок из *художественной книги* Михаила Веллера «Б. Вавилонская», которая вызвала большой резонанс у критиков и читателей.

Для служебного пользования
ИНСТРУКЦИЯ

Штабы Гражданской обороны Москвы. Отделения служб. МЧС Руководства пожарных, аварийных, спасательных и медицинских служб

§ 1. Предварительные сведения.

1.1. Наиболее вероятное время нанесения ядерного удара по Москве – около 18 часов по московскому времени. Это обусловлено тем, что:

а) 10 часов утра по вашингтонскому времени позволяют подготовить и проинформировать удар в течение рабочего утра соответствующих силовых структур, не привлекая преждевременно повышенного внимания наших разведок к активности ведомств возможного противника в нерабочее время;

б) все виды городской и междугородной связи в конце рабочего дня перегружены, и координация экстренных оборонительных мер затруднена;

в) внимание дежурных служб именно в это время снижается;

г) значительная часть населения находится в дороге между местами работы и проживания, что дополнительно затрудняет координацию мер и действий;

д) транспортные артерии парализованы пробками, а находящиеся в них население в первую очередь не защищено перед поражающими факторами.

1.2. Наиболее вероятная мощность термоядерного боеприпаса – от 2 до 10 мегатонн. Сверхмощность боеприпаса ограничивается возможностями средств доставки и обусловлена большой площадью мегаполиса Москвы, сосредоточением в нём центральных разведывательно-оборонных подразделений и предприятий, а по его периметру – пояса ракетных и авиационных комплексов прикрытия, но в первую очередь – высокой защищенностью убежищ президентского и правительственного аппаратов и служб управления Министерства обороны, являющихся основной целью.

1.3. Наиболее вероятное время от момента сигнала оповещения «Атомная тревога!» до момента поражающего удара:

а) порядка 14 минут при запуске ракетноносителей наземного базирования с территории американского континента;

б) порядка 7 минут при запуске ракетноносителей с морских ракетноносцев подводного базирования, занимающих позиции в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане.

Это соответствует полётному времени баллистических ракет, движущихся в надатмосферном пространстве по баллистическим траекториям со скоростью порядка первой космической, то есть 7,9 км/с, или около 28 000 км/ч. Практически в боевых условиях возможно предусмотреть некоторые сбои и задержки связи, что может сократить время оповещения реально до нескольких минут.

§ 2. Сигнал «Атомная тревога!» подается голосом по всем каналам теле- и радиовещания, а также дублируется гудками железнодорожных локомотивов и плавсредств – один длинный гудок и два коротких, повторяющихся несколько раз.

§ 3. Лица, обеспеченные по своему должностному положению убежищами, немедленно начинают действовать согласно эвакуационному плану на случай атомной тревоги под руководством уполномоченных гражданской обороны, или комендантов зданий, или руководителей коллективов, или самостоятельно. Действовать следует без паники, организованно, без малейших промедлений. Любые проявления паники должны незамедлительно пресекаться любыми возможными средствами, вплоть до применения силы и оружия.

Не более чем через 6 минут (либо ранее по приказу старшего по убежищу, убедившемуся в наличии в убежище приписанных групп в полном составе) после первого сигнала оповещения все входы в убежище должны быть перекрыты и блокированы по боевому режиму, невзирая на случаи не успевших укрыться в них и количество оставшихся снаружи. Попытки препятствовать закрытию входов со стороны любых лиц без исключения должны незамедлительно подавляться любыми средствами вплоть до применения оружия.

§ 4. По сигналу «Атомная тревога!» лица, не обеспеченные убежищами, действуют самостоятельно в зависимости от того, где они в данный момент находятся, без промедления и паники принимая все необходимые меры по защите и укрываясь от факторов ядерного поражения. Действовать следует спокойно, грамотно, оценивая конкретные условия своего местопребывания, голосом и действием побуждая окружающих следовать своему примеру и вселяя в них уверенность. В первую очередь необходимо позаботиться о безопасности детей и женщин, а также лиц пожилого возраста.

4.1. Если в доме есть подвал, следует укрыться в подвале. Щели в дверях надо заткнуть любой тканью, её можно намочить. С собой полезно взять небольшой запас питьевой воды.

4.2. Находясь в здании, лучше укрыться в закрытом помещении – внутреннем коридоре, ванной, кладовой – которое отделено от наружных стен дополнительной перегородкой и не имеет окон. Также полезно заткнуть дверные щели и запастись водой.

4.3. В помещении с окном лягте на пол ногами к наружной стене, прикрыв голову руками. Выберите место внизу или сбоку окна, чтобы свет падал на вас как можно меньше. Лучше укрыться от света за тяжёлым предметом – шкафом, диваном, столом.

4.4. Находящимся на улицах следует немедленно укрыться в зданиях, хотя бы в их подъездах, или применить другие естественные убежища, к которым относятся:

- а) метрополитен – наилучшее из всех возможных убежищ;
- б) любые подвальные помещения, котельные, подземные гаражи;
- в) канализационные колодцы и тоннели любых подземных трасс;
- г) фундаменты и нижние помещения новостроек;
- д) подземные переходы и автомобильные тоннели;
- е) склады, подземные туалеты и т.д.

4.5. Находясь в общественном наземном транспорте, следует немедленно покинуть его и укрыться (см. выше).

4.6. Находясь в автомобиле, следует немедленно покинуть его и укрыться (см. выше). При нахождении автомобиля в тоннеле следует остановиться в нём. При невозможности покинуть автомобиль в уличной пробке или отсутствии поблизости укрытий следует лечь на пол между сидений и прикрыть голову руками, защитившись от излучения извне.

4.7. При невозможности укрыться в каком-либо помещении лягте на землю у здания под стеной, противоположной центру города, где будет находиться эпицентр взрыва. Постарайтесь выбрать закрытый со всех сторон двор-колодец или узкий проход между зданий.

4.8. При нахождении в парковой зоне в отдалении от возможных укрытий определите толстое дерево, или холм, или канаву, или любую неровность местности, или памятник, и лягте ногами к нему, лицом от центра города, где будет находиться эпицентр взрыва. Это предохранит вас от теплового излучения, являющегося основным поражающим фактором.

4.9. Все входы в метрополитен по сигналу оповещения закрываются немедленно. Любые проявления паники среди населения или попытки противодействовать немедленному закрытию входов подавляются незамедлительно сотрудниками станционных пикетов милиции соответствующими средствами вплоть до применения оружия на поражение. Вместе с тем:

а) все эскалаторы переключаются на спуск; после схода всех граждан на платформы станций все эскалаторы останавливаются;

б) персонал станций переключает энергопитание всего оборудования на аварийное в экономичном режиме;

в) поезда со станций не отправляются; поезда, находящиеся в туннелях на перегонах, продолжают движение до ближайшей станции и остаются на ней или в пределах возможной близости;

г) поезда, оказавшиеся в перегонах на открытом пространстве, должны достичь входов в туннели и по возможности углубиться в них.

§ 5. В ясную безоблачную погоду в светлое время суток приближение снижающейся боеголовки может быть определено по белому инверсионному следу, подобному следу от самолета на большей высоте, дугообразно снижающемуся из верхних слоев атмосферы в направлении центра Москвы с большой скоростью. Помните: звук подлетающей и снижающейся боеголовки не будет слышен вследствие её сверхзвуковой скорости.

§ 6. При точности современных средств наведения эпицентр взрыва расположится в пределах Бульварного кольца, ориентируясь на район Кремль–Лубянка–Арбат.

§ 7. В Москве следует ожидать наземного взрыва. Это несколько уменьшает радиус общего поражения по сравнению с надземным взрывом, но увеличивает силу сейсмической волны, что ведёт к грунтовым подвижкам типа тектонических возмущений характера сходного с землетрясением большой мощности в верхних слоях, приводя к раздавливанию и разрушению даже значительно заглубленных сооружений повышенной степени прочности в радиусе десяти-пятнадцати километров.

§ 8. Тепловой поражающий фактор.

8.1. В эпицентре взрыва возникает световая вспышка, по яркости многократно превосходящая наблюдаемый солнечный свет. В течение 0,03–0,04 с вспышка оформляется в ослепительную светящуюся сферу 1,5–2 км в диаметре, с температурой 10–20 млн°С. Она покрывает центр города в радиусе Бульварное Кольцо–Кремль–Полянка, причём всё, входящее в это пространство, мгновенно перестает существовать, переходя в плазменное состояние.

8.2. В радиусе 3–4 км мгновенно испаряются и испепеляются все объекты органического происхождения, непосредственно открытые прямому тепловому излучению взрыва (неукрытые люди, животные, растения, деревянные части строений, обращённые в сторону взрыва). Плавятся, испаряются, мгновенно сгорают асфальтовые дорожные покрытия, металлические ограды, кровли и части конструкций зданий, бетонные и кирпичные стены, в т. ч. с каменной и керамической облицовкой, как открытые прямому тепловому излучению взрыва, так и укрытые на глубину до нескольких метров. Все вещества, как органические укрытые, так и неорганические термостойкие, в радиусе Садового Кольца непосредственно вслед за моментом взрыва сгорают в течение нескольких секунд с температурой в десятки тысяч градусов.

8.3. В радиусе 20–25 км вспыхивают все обращённые в сторону взрыва и доступные прямому тепловому излучению деревянные, пластиковые, окрашенные поверхности, растения, прогорают металлические крыши, оплавляются бетон, кирпич, стекло, металл, камень; сгорают оконные рамы, испаряются стёкла, плавятся провода, загорается асфальт. Зона активного пожара мгновенно охватывает город в пределах внутри МКАД. За пределами МКАД возникает кольцевой лесной

пожар. Возгораются полностью застроенные массивы и лесопарковые зоны. Водоемы Москва-реки и Яузы испаряются, вскипает верхний слой Химкинского водохранилища.

Помните: прямое лучевое тепловое воздействие продолжается от долей секунды до нескольких секунд и даже до нескольких десятков секунд в зависимости от мощности взрыва и распространяется только по прямой, то есть любое препятствие между вами и взрывом, в тени которого вы окажетесь, может сохранить вам жизнь в ситуации достаточного удаления от эпицентра взрыва.

§ 9. Поражающий фактор ударной волны.

9.1. Действие ударной воздушной волны начинается непосредственно в момент взрыва и следует вслед за тепловым излучением, однако отставая от его мгновенного воздействия по мере удаления от эпицентра взрыва чем дальше, тем на больший промежуток времени. Во второй зоне поражения скорость воздушной ударной волны достигает 1–5 тыс. м/с, т.е. всё в этой зоне, причём уже подвергнувшееся тепловому воздействию, сносится мощнейшим взрывом по направлению от эпицентра к периферии, превращаясь в выровненную поверхность измельчённых обломков, горящих с высокими температурами (т. н. «сдувание ландшафта»). Измельчённые горящие обломки веществ, находившиеся между радиусами Бульварного и Садового Кольца, выбрасываются ударной волной по расширяющейся концентрической окружности в зону три.

9.2. В третьей зоне, то есть в пределах Москвы внутри МКАД, скорость ударной волны несколько снижается, особенно у самой поверхности, однако продолжает оставаться выше сверхзвуковой, то есть до 300–500 м/с на границе МКАД, что обуславливает мгновенное разрушение всех наземных строений, как высотных, так и малоэтажных. Раскалённые и горящие части поверхностей, обращённых к эпицентру, перемешиваясь при сносе с прочими материалами, дают т.н. «огненный ковер» с температурой, обеспечивающей горение металлов и плавление керамик. В процессе прохождения ударной волны отдельные части и детали движутся в воздухе со скоростями порядка артиллерийских снарядов, усугубляя процесс разрушения всего, что возвышается над поверхностью. Все насаждения вырываются, вода из всех водоемов «выдавливается».

9.3. Ближайшие за МКАД леса, населенные пункты и аэропорты также подвергаются полному или преимущественному уничтожению, частичному или полному разрушению и сгоранию.

9.4. Внутри всей поражённой зоны возникает область резко пониженного атмосферного давления вследствие как выгорания в воздухе кислорода, так и концентрического «раздвигания» воздушных масс. Вследствие этого вскоре после прохода ударной волны возникает «обратная ударная волна», направленная к эпицентру. Она характеризуется значительно меньшей скоростью, соизмеримой со скоростью обычного урагана, но приносит на всю площадь загорания массы свежего кислорода, что создаёт эффект «кузнечных мехов», создавая т.н. «огненный шторм» на всей площади поражения. Зона в пределах МКАД уподобляется разровненной поверхности раскалённых углей в топке.

§ 10. Сейсмическое воздействие наземного взрыва вызывает «эффект землетрясения» с уплотнением и сдвиганием поверхностных слоёв. Все подземные сооружения метрополитена в пределах Кольцевой линии и ближайших за ней станций разрушаются и заваливаются полностью. Все бомбоубежища в пределах Садового Кольца разрушаются полностью. Все подвальные помещения в черте МКАД разрушаются полностью. Все канализационные и вентиляционные подзем-

ные сооружения в пространстве «Проспект Мира», «Зоопарк», «Серпуховская», «Площадь Ильича» раздавливаются, разрушаются и заваливаются. Все входы и выходы из метро, вентиляционные шахты, запасные и служебные выходы заваливаются, или раздавливаются, или полностью блокируются слоем раскалённой массы на поверхности.

§ 11. Внешняя картина взрыва выглядит обычно и характерно для термоядерного взрыва большой мощности. Белая плазменная сфера, накрывающая, подобно двухкилометровому колпаку, центр Москвы и превышающая вчетверо по высоте Останкинскую телебашню, через несколько секунд начинает тускнеть, задерживаться багровой дымной пеленой и отделяется от поверхности, «всплывая» вверх. Горящий город «ложится» во все стороны, как круг домино, покрывается клубящимся дымом, и потоки дыма и огня устремляются от периферии круга МКАД к поднимающейся сфере, образуя характерную «ножку гриба», которая расширяется вниз до пределов зоны поражения, сужаясь вверх к сфере, которая окутывается облаком «шляпки гриба». Клубящийся дым у подножия гриба достигает километровой высоты, диаметр «ножки» сужается до восьмисот-тысячи метров под «шляпкой». «Гриб» продолжает подниматься, и, хотя подъём выглядит медленно вследствие его гигантских размеров, через три-пять минут высота его достигает 25–35 км. При взрыве большой мощности эта картина может стоять до нескольких часов.

§ 12. Сам пожар, не дающий возможности начать какие бы то ни было спасательные работы, может продолжаться, с учётом поражённой площади мегаполиса Москвы, до нескольких суток.

§ 13. Высокий радиационный фон не позволит начинать какие бы то ни было спасательные работы в мегаполисе ранее, чем через 15–20 суток, за исключением спецопераций особой важности. Проведение любых спасательных операций следует считать целесообразным в зоне не ближе 5–10 км за линией МКАД.

§ 14. Воронка в эпицентре взрыва представляет из себя кратер диаметром порядка 2 км и глубиной в центре до 200–300 м. Его поверхность представляет из себя стекловидную массу толщиной до 10–12 м.

Вторая зона поражения представляет собой сравнительно ровную поверхность, покрытую слоем стекловидной спекшейся массы толщиной 0,3–0,9 м.

Третья зона поражения представляет собой бугристую поверхность, в значительной части покрытую стекловидной спекшейся массой толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Испытания подобных боеприпасов, проводимые как СССР, так и США и Францией, с надёжностью показали, что попытки проведения любых спасательных работ в указанных радиусах не имеют реальных оснований. Поражение открытой и укрытой живой силы, техники и строений достигает 100%. Спасательные работы следует сосредоточить на отселение и оказание помощи людям, оказавшимся вне пределов зоны непосредственного поражения, за пределы 100-километровой зоны.

Мегаполис Москва следует считать потерянным безвозвратно, какое-либо использование его территории в ближайшее десятилетие абсолютно невозможно.

Примечание. Напомним, что это был отрывок из художественной книги, поэтому не стоит воспринимать всё написанное буквально. Однако данный рассказ показывает масштабы разрушений, которые могли бы быть в случае ядерного взрыва.



Упражнения

1 В сосуде было $m_0 = 40$ г этого изотопа ртути $^{190}_{80}\text{Hg}$. Сколько примерно его останется через $t = 1$ час, если период полураспада изотопа равен $T = 20$ мин?

2 Изотоп тория $^{232}_{90}\text{Th}$ испытал четыре последовательных α -распада. Какой изотоп образовался?

3 Ядро таллия $^{210}_{81}\text{Tl}$ испытал три последовательных электронных β -распадов и один α -распад. Какое ядро получилось?

4 В медный контейнер массой $m = 0,5$ кг помещён препарат активностью $A = 1,7 \cdot 10^{11}$ Бк, который испускает α -частицы энергией $E = 5,3$ МэВ. За какое время температура контейнера повышается на $\Delta T = 1$ К? Считать, что энергия всех α -частиц идёт на нагревание контейнера. Теплоёмкостью препарата и другими потерями пренебречь. Удельная теплоёмкость меди $c = 385$ Дж/(кг·К).

5 В результате какого распада радиоактивный изотоп натрия $^{22}_{11}\text{Na}$ превращается в изотоп магния $^{22}_{12}\text{Mg}$?

6 Поглощается или выделяется энергия при образовании ядра атома дейтерия ^2_1H из покоившихся протона и нейтрона?

7 Бериллий $^{12}_4\text{Be}$ в результате β -распада переходит в радиоактивный изотоп бора $^{12}_5\text{B}$, который затем превращается в стабильный изотоп углерода $^{12}_6\text{C}$. На рис. 27 график изменения числа атомов одного из этих изотопов с течением времени. Какой это изотоп?

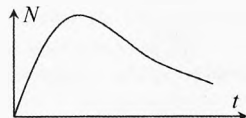


Рис. 27. Число атомов изотопа

8 Активность образца с радием составляет $A = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (за время $\tau = 1$ с образец испускает $N = 3,7 \cdot 10^{10}$ α -частиц). Определить импульс α -частицы, если за $t = 1$ ч выделяет энергию $E = 100$ Дж. Энергией отдачи ядер, γ -излучением и релятивистскими эффектами пренебречь.

9 Определить энергетический выход реакции $^{15}_7\text{N} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^4_2\text{He}$, если энергия связи у ядер азота $E_{\text{св}1} = 115,494$ МэВ, углерода $E_{\text{св}3} = 92,163$ МэВ, гелия $E_{\text{св}4} = 28,296$ МэВ.

10 Определить энергетический выход реакции $^{15}_7\text{N} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^4_2\text{He}$, если масса атома азота $m_1 = 15,0001089$ а.е.м., водорода $m_2 = 1,0078250$ а.е.м., углерода $m_3 = 12,0000000$ а.е.м., гелия $m_4 = 4,0026033$ а.е.м.

11 Определить энергетический выход реакции $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$, если удельная энергия связи ядра лития $\Delta E_{\text{уд}1} = 5,6$ МэВ/нуклон, у гелия $\Delta E_{\text{уд}2} = 7,075$ МэВ/нуклон.

12 В физике элементарных частиц в электронвольтах часто выражается не только энергия, но и масса элементарных частиц. Определить коэффициент пересчёта атомной единицы массы ($m_1 = 1$ а.е.м.) в электронвольты.

13 Определить энергетический выход реакции, которую осуществил Резерфорд. В 1919 г. он бомбардировал α -частицами азот: $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$.

Поглощается или выделяется энергия в этой реакции? Масса атома азота $m_1 = 14,003074$ а.е.м., атома гелия $m_2 = 4,002603$ а.е.м., атома кислорода $m_3 = 16,999133$ а.е.м., атома водорода $m_4 = 1,007825$ а.е.м.

14 α -частица вылетает из радиоактивного ядра и попадает в однородное магнитное поле индукцией $B = 1$ Тл. Определить скорость частицы, если в магнитном поле она движется по дуге окружности радиусом $R = 0,5$ м.

15 Воздух, находящийся при нормальных условиях, облучается рентгеновским излучением. Найти число пар ионов, образовавшихся при данном излучении в объёме $V = 1$ мм³ воздуха, если экспозиционная доза излучения $X = 0,1$ Р. Рентген – внесистемная единица экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, определяемая по их ионизирующему действию на сухой воздух. При облучении воздуха при н.у. дозой в $X_0 = 1$ Р в каждом $V_0 = 1$ см³ образуется такое количество положительных и отрицательных ионов, что суммарный заряд каждого знака равен единице заряда СГСЭ ($q_0 = (1/3) \cdot 10^{-9}$ Кл).

16 После аварии Чернобыльской АЭС в некоторых местах до сих пор регистрируется гамма-излучение с мощностью экспозиционной дозы $X = 160$ микро-рентген в час. Определить, во сколько раз это превосходит предельно допустимую дозу для населения. Экспозиционной дозе $X_0 = 1$ Р соответствует поглощённая доза $D_0 = 8,8$ мГр.

17 При облучении каждый грамм живой ткани поглотил $N = 10^8$ α -частиц с энергией $E = 5,2$ МэВ. Определить эквивалентную дозу облучения, учитывая, что для α -частиц коэффициент качества равен $k = 20$.

18 Однозарядные ионы изотопа цезия с массой $m = 133$ а.е.м. разгоняются в электрическом поле при напряжении $U = 2000$ В и движутся в однородном магнитном поле масс-спектрографа (рис. 26). Определить радиус окружности, по которой движутся ионы, если индукция магнитного поля $B = 0,25$ Тл.

19 В масс-спектрографе с индукцией магнитного поля $B = 0,25$ Тл в электрическом поле при напряжении $U = 2000$ В разгоняются однозарядные ионы изотопов калия с массами $m_1 = 39$ а.е.м. и $m_2 = 41$ а.е.м. На каком расстоянии друг от друга будут находиться на фотопластинке образованные ими линии спектра?

20 Чем отличаются ядра ${}^2_1\text{X}$, ${}^3_1\text{Y}$ и ${}^3_2\text{Z}$? К каким химическим элементам относятся? Совпадают ли их химические свойства?

21 Вычислить удельную энергию связи нуклонов в ядре атома урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, если масса атома равна $m_a = 238,050788$ а.е.м.

22 Какое ядро образуется в результате электронного бета-распада ядра изотопа меди ${}^{66}_{29}\text{Cu}$?

23 Какое ядро образуется в результате позитронного бета-распада ядра изотопа брома ${}^{80}_{35}\text{Br}$?

24 Период полураспада ядер изотопа йода ${}^{131}_{53}\text{I}$ равен $T = 8$ сут. Сколько радиоактивных ядер этого изотопа останется в образце через $t = 80$ сут, если начальная масса равна $m_0 = 40$ г?

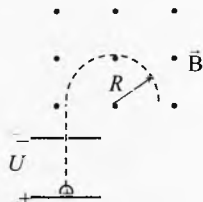


Рис. 28. Масс-спектрограф

25 Один грамм углерода животного или растительного происхождения испускает 15 бета-частиц в минуту за счёт радиоактивного распада ядер изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$. Оценить период полураспада этого изотопа, если известно, что 13 атомов данного изотопа приходится на 10^{13} атомов других изотопов углерода?

26 При делении одного ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$ освобождается энергия порядка $Q_1 = 200$ МэВ. Вычислить энергию, освободившуюся при делении $m = 3$ кг урана. Какой груз можно поднять на высоту $h = 10$ км за счёт этой энергии?

27 Вычислить удельную теплоту «сгорания» урана $^{235}_{92}\text{U}$, если при делении одного ядра освобождается энергия порядка $Q_1 = 200$ МэВ. Сравнить её с удельной теплотой сгорания нефти $q_n = 43$ МДж/кг.

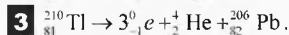
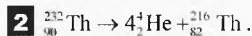
28 Вычислить суточный расход урана-235 в ядерном реакторе с тепловой мощностью $P = 3$ ГВт. Сколько нефти потребовалось бы сжигать в сутки для получения такой же мощности? Удельная теплота сгорания нефти $q_n = 43$ МДж/кг.

29 Сколько урана-235 нужно израсходовать для получения такого же количества энергии, которое вырабатывает крупнейшая в мире Саяно-Шушинская ГЭС за сутки? Мощность этой ГЭС $P = 6,4$ ГВт. КПД АЭС около $\eta = 40\%$.

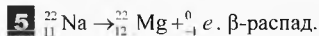
30 Мировое потребление энергии составляет $Q = 5 \cdot 10^{20}$ Дж в год. Сколько дейтерия в секунду потребовалось бы сжигать в термоядерных реакторах для обеспечения всех современных энергетических потребностей человечества? Энергетический выход реакции $Q_1 = 17,6$ МэВ.

Решения, указания и ответы для самоконтроля

1 $m = m_0 \cdot 2^{-t/T} = 40 \cdot 2^{-60/20} = 40 \cdot 2^{-3} = 5$ (г).



4 $A = \frac{\Delta N_{\text{расп}}}{\Delta t}$, $Q = \Delta N_{\text{расп}} \cdot E$, $Q = cm\Delta T$; $\Rightarrow \Delta t = \frac{cm\Delta T}{A \cdot E} = 22$ мин 15 с.



6 Выделяется.

7 Изотоп бора $^{12}_5\text{B}$.

8 $p_1 = mv$, $m \approx 4$ а.е.м., $E = E_1 \cdot N \cdot \frac{t}{\tau}$, $E_1 = \frac{mv^2}{2}$; $\Rightarrow p = \sqrt{\frac{2m \cdot E \cdot \tau}{N \cdot t}} = 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

9 $E_{\text{св}2} = 0$. По закону сохранения энергии: $E_{\text{кин,лр}} + E_{\text{св,лр}} = E_{\text{кин,сх}} + E_{\text{св,сх}}$. По определению: $Q = E_{\text{кин,лр}} - E_{\text{кин,сх}}$. Значит, $Q = E_{\text{св,сх}} - E_{\text{св,лр}}$.

Обратим внимание, что на самом деле энергия связи – отрицательная величина, но в условии задачи она дана по модулю, значит, $E_{\text{св,сх}} = -115,494$ МэВ, $E_{\text{св,лр}} = -92,163$ МэВ – $28,296$ МэВ = $-120,459$ МэВ.

Итак, $Q = (-115,494 \text{ МэВ}) - (-120,459 \text{ МэВ}) = 4,965$ МэВ. Энергия выделяется.

Если бы мы подставили энергию связи, как положительную величину в каждом случае, то получили бы неверный отрицательный ответ.

$$\mathbf{10} \quad Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}}) \cdot c^2 = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4) \cdot c^2 = 4,965 \text{ МэВ. Энергия выделяется.}$$

$$\mathbf{11} \quad Q = 4 \cdot \Delta E_{\text{уд2}} + 4 \cdot \Delta E_{\text{уд2}} - 7 \cdot \Delta E_{\text{уд1}} = 17,4 \text{ МэВ. Энергия выделяется.}$$

$$\mathbf{12} \quad Q = mc^2 = (1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг}) \cdot (299792458 \text{ м/с})^2 = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

$$\text{Так как } 1 \text{ эВ} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Дж, то } 1 \text{ Дж} = \frac{1 \text{ эВ}}{1,602177 \cdot 10^{-19}}.$$

$$\text{Тогда } Q = 1,4924 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1 \text{ эВ}}{1,602177 \cdot 10^{-19}} = 931,5 \text{ МэВ. } k = \frac{Q}{m} = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$$

Итак, телу массой 1 а.е.м. соответствует энергия 931,5 МэВ.

13 Масса продуктов реакции $m_3 + m_4 = 18,006958$ а.е.м. больше массы исходных частиц $m_1 + m_2 = 18,005677$ а.е.м. на $\Delta m = 0,001281$ а.е.м., значит энергия поглощается, то есть кинетическая энергия исходных частиц была больше кинетической энергии продуктов реакции: $Q = -\Delta m \cdot \frac{931,5 \text{ МэВ}}{\text{а.е.м.}} = -1,2 \text{ МэВ.}$

$$\mathbf{14} \quad ma_n = F_n, \quad a_n = \frac{v^2}{R}, \quad F_n = qvB, \quad q = 2e, \quad m \approx 4 \text{ а.е.м.}; \Rightarrow v = \frac{2e \cdot B \cdot R}{m} = 24 \text{ Мм/с.}$$

$$\mathbf{15} \quad N = \frac{X}{X_0} \cdot \frac{q_0}{e} \cdot \frac{V}{V_0} = 2,08 \cdot 10^5 \text{ пар ионов.}$$

$$\mathbf{16} \quad \text{Коэффициент качества для гамма-излучения } k = 1 \text{ Зв/Гр. Эквивалентная доза за час } H = D \cdot k = X \cdot \frac{D_0}{X_0} \cdot k = 160 \cdot 10^{-6} \text{ Р} \cdot \frac{8,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}}{1 \text{ Р}} \cdot 1 \frac{\text{Зв}}{\text{Гр}} = 1,408 \cdot 10^{-6} \text{ (Зв). Тогда}$$

за год эквивалентная доза равна $H_{\text{год}} = 12,34 \text{ мЗв}$. Это в 2,5 раза больше ПДД для населения (5 мЗв/год).

$$\mathbf{17} \quad H = D \cdot k, \quad D = E_N/m, \quad E_N = E \cdot N; \Rightarrow H = k \cdot E \cdot N/m = 1,66 \text{ (Зв).}$$

$$\mathbf{18} \quad U \cdot e = \frac{m v^2}{2}, \quad ma_n = F_n, \quad m \cdot \frac{v^2}{R} = eBv; \Rightarrow R = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2mU}{e}} = 30 \text{ (см).}$$

$$\mathbf{19} \quad U \cdot q = \frac{m v^2}{2}, \quad m \cdot \frac{v^2}{R} = qBv, \quad x = 2R_2 - 2R_1;$$

$$\Rightarrow x = \frac{2}{B} \cdot \sqrt{\frac{2U}{q}} (\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1}) = 8,15 \text{ (мм).}$$

20 Изотоп водорода (дейтерий) ${}^2_1\text{H}$ – один протон, один нейтрон. Изотоп водорода (тритий) ${}^3_1\text{H}$ – один протон, два нейтрона. Изотоп гелия ${}^3_2\text{He}$ – два протона, один нейтрон. Химические свойства зависят от заряда ядра, то есть от количества протонов, и совпадают у изотопов водорода ${}^2_1\text{H}$ и ${}^1_1\text{H}$.

$$\mathbf{21} \quad E_{\text{св.уд}} = (Z \cdot (m_p + m_e) + N \cdot m_n - m_A) \cdot c^2 / A, \quad Z = 92, \quad N = 146, \quad A = 238, \\ m_p + m_e = 1,007825 \text{ а.е.м. – масса протона и электрона (равна массе атома водорода),} \\ m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}; \Rightarrow E_{\text{св.уд}} = 7,6 \text{ МэВ/нуклон.}$$

$$\mathbf{22} \quad {}^{66}_{29}\text{Cu} \rightarrow {}^{66}_{30}\text{Zn} + {}^0_{-1}e, \text{ ядро изотопа цинка.}$$

$$\mathbf{23} \quad {}^{80}_{35}\text{Br} \rightarrow {}^{80}_{34}\text{Se} + {}^0_{+1}e, \text{ ядро изотопа селена.}$$

$$\mathbf{24} \quad N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}, \quad v_0 = \frac{N_0}{N_A}, \quad v_0 = \frac{m_0}{M}; \Rightarrow N = \frac{m_0}{M} \cdot N_A \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = 1,8 \cdot 10^{20}.$$

$$\text{25 } A = \frac{\Delta N_{\text{расп}}}{\Delta t}, A = \frac{N \cdot \ln 2}{T}, \frac{N}{N_{\text{общ}}} = \frac{13}{10^{13}}, N_{\text{общ}} = \frac{m}{M} \cdot N_A, \text{ где молярная масса}$$

углерода $M = 12$ г/моль, т.к. природный углерод почти на 99% состоит из изотопа $^{12}_6\text{C}$. Итак, $T = \frac{13 \cdot m \cdot N_A \cdot \Delta t \cdot \ln 2}{10^{13} \cdot M \cdot \Delta N_{\text{расп}}} = 5730$ (лет).

$$\text{26 } Q = Q_1 \cdot N, N = N_A \cdot m / M, M = 235 \text{ г/моль}, \Rightarrow Q = 2,46 \cdot 10^{14} \text{ Дж. } Q = m_r g h, \Rightarrow m_r = Q / (g h) = 2,5 \cdot 10^6 \text{ (т)}.$$

$$\text{27 } Q = Q_1 \cdot N, N = N_A \cdot \frac{m}{M}, Q = m \cdot q; \Rightarrow q = \frac{Q_1 \cdot N_A}{M} = 8,2 \cdot 10^{13} \text{ Дж/кг. } \frac{q}{q_n} = 1,9 \cdot 10^6.$$

$$\text{28 } Q = P \cdot t, Q = Q_1 \cdot N, N = N_A \cdot m / M, Q_1 = 200 \text{ МэВ}, M = 235 \text{ г/моль}, \Rightarrow m = M \cdot P \cdot t / (N_A \cdot Q_1) = 3,16 \text{ (кг). } Q = q_n \cdot m_n; \Rightarrow m_n = P \cdot t / q_n = 6000 \text{ (т)}.$$

$$\text{29 } \eta = \frac{P \cdot t}{Q}, Q = Q_1 \cdot N, N = N_A \cdot \frac{m}{M}, Q_1 = 200 \text{ МэВ}, \Rightarrow m = \frac{M \cdot P \cdot t}{\eta \cdot N_A \cdot Q_1} = 16,9 \text{ (кг)}.$$

$$\text{30 } {}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}. Q = Q_1 \cdot N, N = N_A \cdot \frac{m}{M}, M = 2 \text{ г/моль}; \Rightarrow \frac{m}{t} = \frac{M \cdot Q}{N_A \cdot Q_1 \cdot t} = 590 \text{ (т/год)} = 18,7 \text{ (г/с)}.$$

Глава 5. Элементарные частицы

Есть два способа жить: вы можете жить так, как будто чудес не бывает и вы можете жить так, как будто всё в этом мире является чудом.

Альберт Эйнштейн

§ 41. История вопроса

В первой трети XX века усилиями учёных Англии, Франции, Германии и др. было предсказано теоретически и доказано практически то, что атом состоит из ядра, в котором находятся протоны и нейтроны, а вокруг него вращаются электроны. Протоны, нейтроны и электроны считались элементарными частицами. К 1933 г. к ним добавили фотон и позитрон.

Термин «элементарная частица» от лат. *elementarias* – первоначальный, простейший, основной, то есть не имеющий внутренней структуры. Однако позже обнаружилось, что свободный нейтрон распадается (на протон, нейтрон и антинейтрино). Стало быть, он не является элементарной частицей. В 1937 г. в космическом излучении были обнаружены *мюоны* – частицы с отрицательным или положительным элементарным зарядом с массой, в 207 раз превышающей массу электрона.

Затем в 1947–1950 гг. были открыты *пионы* (пи-мезоны), с помощью которых взаимодействуют нуклоны в ядре. Масса заряженных (тоже элементарным зарядом) пионов равна массе 273 электронов, а нейтрального пиона – $264 m_e$.

Позже, по мере возрастания мощности ускорителей, создания новых детекторов элементарных частиц и усовершенствования методики эксперимента, было обнаружено около 400 элементарных частиц. Правда, большинство из них, за исключением протона, электрона и нейтрино, нестабильны. Если нейтрон в свободном состоянии может прожить десятки минут, то мюоны всего несколько микросекунд, заряженный пион – десятки наносекунд, а нейтральный пион менее одной фемтосекунды. Многие массивные частицы (гипероны) живут менее одной наносекунды.

Нейтроны распадаются на протон, электрон и антинейтрино, но удивительно, что они не являются его составными частями. Внутри нейтрона их нет, они рождаются в момент распада, поэтому нейтрон считается элементарной частицей. Аналогично ему в класс элементарных частиц попадает мюон, который распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu,$$

где $\bar{\nu}_e$ – антинейтрино электронное, ν_μ – нейтрино мюонное.

В настоящее время элементарными называют частицы, которые на современном уровне развития физики нельзя считать соединением более «простых» частиц, существующих в свободном состоянии.

Определённая таким образом элементарная частица, в процессе взаимодействия с другими частицами или полями, должна вести себя как единое целое.

Античастицы. В 1928 году французский физик П. Дирак разработал теорию движения электронов в атоме с учётом релятивистского эффекта. Из уравнения следовало, что оно справедливо как для частиц с отрицательным зарядом (электронов), так и для частиц с положительным зарядом. Данную предполагаемую частицу называли *позитроном* (от лат. *positivus* – положительный).

В 1932 г. американский физик К. Д. Андерсон экспериментально обнаружил позитроны в космических лучах (Нобелевская премия 1936 г.). Так была открыта первая античастица. Масса позитрона оказалась точно равна массе электрона. По всем своим свойствам он не отличается от электрона кроме знака заряда.

В дальнейшем было показано, что у всех элементарных частиц имеются античастицы. Оказалось, что все заряженные частицы существуют парами (принцип зарядового сопряжения). В 1955 г. был обнаружен антипротон ${}_{-1}^1\tilde{p}$, а в 1956 г. – антинейтрон ${}_{0}^1\tilde{n}$. Вместе с тем существуют истинно нейтральные частицы: фотон, пи-нуль-мезон и эта-мезон η^0 . Можно сказать, что у них нет античастиц или что эти частицы полностью совпадают со своими античастицами.

Является ли нейтрино истинно нейтральной частицей? Оказалось, что не совсем. Действительно, антинейтрино, выделяющееся при распаде нейтрона по схеме

$${}_{-1}^1n \rightarrow {}_{-1}^1p + {}_{-1}^0e + {}_{-1}^0\tilde{\nu}_e,$$

может захватываться протоном и образовать нейтрон и позитрон:

$${}_{-1}^0\tilde{\nu}_e + {}_{-1}^1p \rightarrow {}_{-1}^1n + {}_{-1}^0e.$$

Нейтроны с этим антинейтрино не взаимодействуют. Однако нейтрон взаимодействует с нейтрино ${}_{-1}^0\nu_e$ по схеме:

$${}_{-1}^0\nu_e + {}_{-1}^1n \rightarrow {}_{-1}^1p + {}_{-1}^0e.$$

Таким образом, электронное нейтрино и антинейтрино являются разными частицами, отличающимися только знаком спина (момента импульса).



Поль Адриен Морис Дирак (1902–1984)



Карл Дейвид Андерсон (1905–1991)

То есть нейтрино и антинейтрино электронное как бы вращаются в противоположных направлениях.

§ 42. Взаимные превращения частиц

В 1933 г. Ф. Жолио-Кюри экспериментально подтвердил предсказания П. Дирака, что при столкновении частицы с её античастицей происходит их исчезновение (аннигиляция от лат. *nihil* – ничто), они превращаются в два (редко в три) кванта. Например, при встрече электрона с позитроном возникает два γ -кванта

$${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow \gamma + \gamma.$$

При этом выполняются все законы сохранения: электрического заряда, энергии, импульса, момента импульса (спина). В том же году Ф. и И. Жолио-Кюри обнаружили обратный процесс – рождение электрон-позитронной пары при прохождении γ -кванта большой энергии вблизи атомного ядра:

$$\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e.$$

Из закона сохранения энергии следует, что энергия γ -кванта должна быть больше суммы энергии покоя электрона и позитрона (на величину их кинетической энергии):

$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 2 \cdot 0,511 \text{ (МэВ)} = 1,022 \text{ (МэВ)}.$$

Законы сохранения не допускают возможности появления одинаковых частиц. Поэтому возникновение частиц наблюдается только парами с античастицами.

Античастицы могут образовывать атомы. В атоме антигелия, вокруг отрицательно заряженного ядра, состоящего из двух антипротонов и двух антинейтронов, вращаются два позитрона. Физические свойства атомов из антивещества такие же, как и в соответствующих атомах из вещества (мы живём в мире в основном из вещества, а куда же делось антивещество?).

В таблице 5 (Элементарные частицы) представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с. Частицы в ней расположены группами в соответствии со свойствами.

Первая группа состоит из *фотона*, не имеющего массы покоя, за ним следуют *лептоны* – лёгкие частицы. Далее группа *адронов*, подразделяющихся на три подгруппы: *мезоны*, *нуклоны* и *гипероны*.

Спин лептонов и барионов равен $1/2$ (в единицах $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), спины мезонов равны нулю, а спин фотона равен единице (то есть \hbar). Частицы с полуцелым спином ($1/2, 3/2$) называются **фермионами**, а частицы с целым спином ($0, 1, 2$) – называются **бозонами**.

Электрические заряды частиц указаны в элементарных зарядах ($e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл), массы частиц – в массах электрона $m_e \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Таблица 5. Элементарные частицы

Частица	Символ	Масса		Время жизни, с	Спин, \hbar	Заряды			Изоспин	Странность, S	Преобладающая схема распада
		МэВ	m_e			Q	L	B			
Фотон	γ	0	0	∞	1	0	0	0	-	-	-
Лептоны	Нейтрино	ν	$\bar{\nu}$	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$1/2$	0	+1	0	-	-	-
	Электрон	e^-	e^+	∞	$1/2$	-1	+1	0	-	-	-
	Муон	μ^-	μ^+	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1/2$	-1	+1	0	-	-	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$1/2$	-1	+1	0	-	-	$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$
Адроны	Пй-мезоны	π^-	π^+	$273,2$	0	-1	0	0	1	+1	0
		π^0		$135,0$	0	0	0	0	1	0	0
	Ка-мезоны	K^-	K^+	$493,8$	0	-1	0	0	$1/2$	+1/2	+1
		K^0	\bar{K}^0	$498,0$	0	0	0	0	$1/2$	-1/2	+1
	Эта-мезон	η		$548,8$	0	0	0	0	0	0	0
		ρ	$\bar{\rho}$	$938,26$	$1/2$	+1	0	+1	$1/2$	+1/2	0
Барионы	Протон	p	\bar{p}	$1836,1$	$1/2$	0	0	-1	$1/2$	-1/2	0
	Нейтрон	n	\bar{n}	$1838,6$	$1/2$	0	0	0	$1/2$	-1/2	0
	Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	$2182,8$	$1/2$	0	0	+1	0	0	-1
		Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2328	$1/2$	+1	0	+1	1	+1	-1
	Сигма-гипероны	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2342	$1/2$	-1	0	-1	1	-1	-1
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333	$1/2$	0	0	+1	1	0	-1
	Кси-гипероны	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585	$1/2$	-1	0	-1	$1/2$	-1/2	-2
		Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572	$1/2$	0	0	-1	$1/2$	+1/2	-2
	Омега-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1675	$3/2$	-1	0	-1	0	0	-3
				$\sim 10^{-10}$							$\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0, \Lambda^0 + K^-$

§ 43. Фундаментальные взаимодействия

Весь мир состоит из материи, находящейся в непрерывном и разнообразном движении и взаимодействии. Всё многообразие взаимодействий материальных объектов сводится лишь к четырём фундаментальным взаимодействиям.

Фундаментальными называются взаимодействия, которые не могут быть сведены к другим более простым видам взаимодействия. Это – гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения, который открыл И. Ньютон в 1687 г. Гравитационные силы действуют между любыми телами. Однако в мире элементарных частиц гравитационные силы, как правило, незаметны. Закон всемирного тяготения управляет движением небесных тел от космической пыли до больших звёздных систем – галактик.

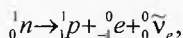
В электромагнитном взаимодействии участвуют любые электрически заряженные тела, а также фотоны (кванты электромагнитного поля). Электромагнитные силы обеспечивают существование атомов и молекул. Они определяют свойства твёрдых, жидких тел, газа и плазмы.

Сильное взаимодействие испытывают адроны. Оно проявляется на малых расстояниях, порядка 1 фм или 10^{-15} м. На таких расстояниях сильное взаимодействие в 10–100 раз превышает электромагнитное. Ядерные силы обеспечивают существование атомных ядер. Они являются типичным примером сильного взаимодействия.

Лептоны и фотоны в сильном взаимодействии не участвуют.

В слабом взаимодействии участвуют любые элементарные частицы, кроме фотонов. Радиус действия слабых сил примерно 10^{-3} фм, или 10^{-18} м. То есть они проявляются на расстояниях, в тысячу раз меньших, чем сильное взаимодействие.

Слабое взаимодействие проявляется в β -распаде нейтрона:



в распаде мюона на электрон и два нейтрино:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{или} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

а также в распаде заряженного пиона на мюон и нейтрино:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \text{или} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

Обменное взаимодействие. В квантовой физике взаимодействия рассматриваются как результат обмена частицами. Так, ковалентная связь (например, между атомами в молекуле азота N_2) является результатом того, что

атомы обмениваются валентными электронами, объединяющимися на незаполненных энергетических уровнях электронных оболочек. Аналогично фундаментальные взаимодействия рассматриваются как следствие обмена специфическими частицами. Эту идею выдвинули в 1934 г. советские физики-теоретики И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко.

Электромагнитное взаимодействие есть следствие обмена *фотонами* между электрически заряженными частицами.

Ядерные силы – следствие обмена пионами между нуклонами. Сильное взаимодействие вообще есть следствие обмена особыми квантами – *глюонами*. Слабое взаимодействие есть следствие обмена массивными частицами – *векторными бозонами* W^+ , W^- и Z^0 . Существование этих бозонов было предсказано в 1957 г. Экспериментально они были обнаружены в 1983 г. на запущенном в Женеве ускорителе, где сталкивались встречные пучки протонов и антипротонов с энергией каждой из частиц 270 ГэВ.

Согласно теории обменного взаимодействия, гравитация также является результатом обмена квантами гравитационного поля – *гравитонами*. Согласно теории, у гравитонов нет массы покоя, а их спин равен $2\hbar$, однако до сих пор экспериментально такие частицы не обнаружены. В 2015 году зарегистрированы гравитационные волны, а не отдельные гравитоны.

§ 44. Лептоны

Термин «*лептон*» происходит от греч. *leptos* – тонкий, лёгкий. То есть лептоны – это частицы с небольшой массой по сравнению с массой нуклона. Но в 1975 г. открыли тау-лептон (таон), масса которого почти вдвое больше массы протона. Оказалось, что суть лептонов не в массе, а в характере взаимодействия. Лептоны разделяются на три семейства: электрон e^- и его нейтрино ν_e ; мюон μ^- и его нейтрино ν_μ ; таон τ^- и его нейтрино ν_τ . У всех лептонов есть античастицы: позитрон e^+ и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$; плюс-мюон μ^+ и мюонное антинейтрино $\bar{\nu}_\mu$; плюс-таон τ^+ и таонное антинейтрино $\bar{\nu}_\tau$.

Нейтрино имеют ненулевую массу, но эта масса крайне мала. На данный момент известно, что масса нейтрино меньше $5,5 \cdot 10^{-7} m_e$.

Запишем реакцию распада тау-лептонов (слабое взаимодействие):

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad \text{или} \quad \tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau,$$

$$\tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\tau \quad \text{или} \quad \tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau.$$

Мюон и таон неустойчивы, т.к. их масса (и энергия покоя) больше, чем у самого лёгкого лептона – электрона. Поэтому, родившись, они быстро превращаются в более стабильные частицы по вышеприведённым схемам.

Для характеристики слабых взаимодействий вводится величина – лептонный заряд L . Для лептонов он равен единице ($L = 1$), для антилептонов ($L = -1$), для других частиц ($L = 0$).

Алгебраическая сумма лептонных зарядов сохраняется до и после реакции (закон сохранения лептонного заряда).

Для каждого семейства лептонов вводится свой лептонный заряд: электронный L_e , мюонный L_μ и таонный L_τ . При всех слабых взаимодействиях, алгебраическая сумма лептонных зарядов остаётся неизменной:

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau = \text{const.}$$

Истинно элементарные частицы. В настоящее время отсутствуют какие-либо данные о наличии какой-либо структуры у лептонов. При любой энергии лептонов (достигающей в ускорителях сотен ГэВ) они участвуют в реакциях как цельные неделимые объекты. Значит, лептоны (на сегодняшний уровень развития науки и техники) являются истинно элементарными частицами.

§ 45. Адроны

Классификация адронов. Адроны (от греч. *hadros* – большой, сильный) – это частицы, участвующие во всех четырёх фундаментальных взаимодействиях.

Среди адронов наиболее известны и широко распространены нейтрон и протон. Протон является стабильной частицей, приписываемое ему время жизни в свободном состоянии не менее $2,9 \cdot 10^{29}$ лет настолько велико, даже по сравнению с возрастом галактик, что оценивать его нет смысла, поскольку невозможно вообразить. Время жизни свободного нейтрона составляет около 15 минут.

Все остальные адроны короткоживущие. Различают метастабильные адроны со временами жизни более 10^{-23} с, которые распадаются за счёт слабого и иногда электромагнитного взаимодействия, а также так называемые резонансы с временем жизни 10^{-23} – 10^{-24} с, которые распадаются в результате сильного взаимодействия.

В зависимости от размера спина, адроны делятся на мезоны с нулевым или целым спином (то есть бозоны) и барионы со спином $1/2$ (то есть фермионы). К барионам также относится омега-гиперон, спин которого равен $3/2$.

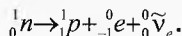
Барионы, в свою очередь, делятся на нуклоны и гипероны.

У каждой частицы есть соответствующая ей античастица. Лишь эта-нуль мезон полностью совпадает со своей античастицей, то есть является нейтральной.

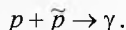
Закон сохранения барионного заряда. Оказалось, что кроме классических законов сохранения при любых взаимодействиях следует иметь в виду ещё один закон – закон сохранения барионного заряда. Всем барионам приписывается барионный заряд $B = 1$, антибарионам – барионный заряд $B = -1$. У мезонов и лептонов барионный заряд равен нулю.

При любых взаимодействиях алгебраическая сумма барионных зарядов сохраняется.

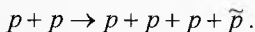
Например, при β -распаде нейтрона до реакции был один барион (нейтрон) и после реакции распада тоже один барион (протон):



При аннигиляции протона и антипротона барионный заряд этой системы частиц был равен $0 = 1 + (-1)$ и после аннигиляции тоже 0, т.к. у рождённых γ -квантов барионного заряда нет:



Если протон с энергией более 6 МэВ столкнётся с первоначально неподвижным протоном, то в результате реакции получится три протона и антипротон \bar{p} :



До столкновения барионный заряд системы: $B_0 = 1 + 1 = 2$ и после столкновения точно такой же: $B = 1 + 1 + 1 + (-1) = 2$.

В мире элементарных частиц существуют и другие законы сохранения. Например, закон сохранения странности. Все они вместе с рассмотренными выше законами ограничивают возможности превращения элементарных частиц. Они являются ориентирами, какие превращения возможны.

Интересно отметить, что при записи элементарных частиц можно (как и в алгебре) переносить члены уравнения на другую сторону, меняя знак, то есть при переносе частицы нужно писать на другой стороне её античастицу.

Кроме того, можно менять направление стрелки. Это значит, что каждая реакция при определённых условиях, может протекать как в прямом, так и в обратном направлении. Покажем это на примере реакции распада нейтрона. Запишем сначала ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}_e$. Теперь перенесём электрон e^- влево, при этом нужно поменять знак его заряда, то есть слева должен оказаться позитрон e^+ . Поменяем ещё направление стрелки ${}_0^1n + {}_{+1}^0e \leftarrow {}_1^1p + {}_0^0\bar{\nu}_e$. Но ведь это первая реакция с помощью, которой экспериментально открыли нейтрино (точнее, антинейтрино) в 1956 г.

Напишем её словами: антинейтрино сталкивается с протоном, и они превращаются в нейтрон и позитрон.

Подведём философский итог.

В мире элементарных частиц любые превращения возможны, которые не противоречат законам сохранения.

Таким образом, в мире элементарных частиц действует истинная демократия: разрешено всё, что не запрещено.

§ 46. Кварки

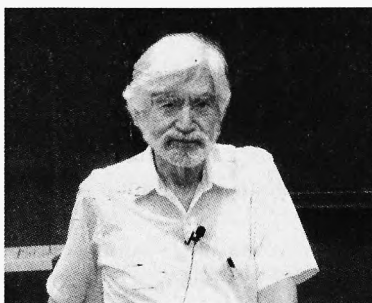
Во второй половине XX века учёные, стремясь узнать структуру нуклонов, бомбардировали их потоком электронов, разогнанных ускорителем до разных энергий. Измерения рассеяния электронов с энергией в десятки ГэВ показало, что внутри нуклонов (протона или нейтрона) большая часть объёма пуста (не правда ли, похоже на опыты Резерфорда 1906 г.), но имеются очень маленькие участки, от которых электроны отталкиваются. Эти участки называли партонами (от англ. *part* – часть). На основании этих опытов стало ясно, что адроны не являются истинно элементарными частицами. Были и другие соображения в том, что адроны состоят из каких-то частиц.

В 1964 г. американские учёные Мюррей Гелл-Манн (р. 1929) и Джордж Цвейг (р. 1937) независимо друг от друга выдвинули теорию кварков. Кварками называли предполагаемые «настоящие элементарные частицы», из которых состоят все адроны.

Сначала было предложено три кварка, *u*, *d*, *s*, названия которых происходят от английских слов *up* – вверх, *down* – вниз, *strange* – странный. Затем были обнаружены адроны, для объяснения свойств которых, пришлось предположить существование ещё трёх кварков *c*, *b*, *t* (от английских слов *charm* – очарование; *beauty* – прелесть, красота; *truth* – истина). Все шесть кварков располагают в виде трёх семейств (дуплетов) аналогично лептонным семействам. Спины всех кварков полуцелые, то есть равны $\hbar/2$.

У каждого кварка есть свой антикварк. Спин антикварков тоже равен $\hbar/2$. Все другие квантовые числа (например, электрический и барионный заряды) антикварков противоположны по знаку квантовым числам соответствующих кварков.

Электрические заряды кварков равны одной трети или двум третям элементарного заряда, то есть $\pm e/3$ или $\pm 2e/3$. В таблице 6 приведены основные характеристики кварков. В следующей таблице 7 показано, из каких кварков и как построены мезоны и барионы.



Джордж Цвейг (р. 1937)

Таблица 6. Характеристики кварков

Характеристика	Кварки		Антикварки	
Символ	u	d	\bar{u}	\bar{d}
	c	s	\bar{c}	\bar{s}
	t	b	\bar{t}	\bar{b}
Спин в единицах \hbar	1/2	1/2	1/2	1/2
Электрический заряд в элементарных зарядах	2/3	-1/3	-2/3	1/3
Барионный заряд	1/3	1/3	-1/3	-1/3

Таблица 7. Строение мезонов и барионов

Мезоны		Барионы			
Частица	Состав	Частица	Состав	Частица	Состав
π^+	$u\bar{d}$	p	uud	$\bar{\Sigma}^0$	$\{\bar{u}\bar{d}\}\bar{s}$
π^-	$\bar{u}d$	\bar{p}	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	Σ^-	dds
π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	n	udd	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{d}\bar{d}\bar{s}$
η^0	$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$	\bar{n}	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	Ξ^0	uss
K^+	$u\bar{s}$	Λ^0	$[ud]s$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{u}\bar{s}\bar{s}$
K^-	$\bar{u}s$	$\bar{\Lambda}^0$	$[\bar{u}\bar{d}]\bar{s}$	Ξ^-	dss
K^0	$d\bar{s}$	Σ^+	uus	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{d}\bar{s}\bar{s}$
\bar{K}^0	$\bar{d}s$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{u}\bar{u}\bar{s}$	Ω^-	sss
		$\bar{\Sigma}^+$	$\{\bar{u}\bar{d}\}s$	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{s}\bar{s}\bar{s}$

Цвета кварков. При изучении свойств атомов, ядер и элементарных частиц установлен один из фундаментальных законов физики.

В системе взаимосвязанных частиц не может находиться два и более фермиона (то есть частиц с полуцелым спином) с тождественными параметрами.

Этот закон называется **принципом запрета Паули**. Поскольку спины всех кварков полуцелые, то они подчиняются запрету Паули.

Но, как видно из последней таблицы, в составе многих барионов есть по два, а в некоторых все три одинаковых кварка. Например, омега-минус-гиперон состоит из трёх s -кварков (интересно, что существование этого гиперона было предсказано на основании теории кварков, и лишь позже он был обнаружен экспериментально).

Значит, все кварки, из которых состоит барион, должны отличаться каким-то параметром. Этот параметр называли «цветовым зарядом», или просто «цветом». Таких цветов оказалось три. Они, естественно, не имеют

прямого отношения к оптическому цвету, а лишь условно обозначают существование трёх типов специфических квантовых зарядов у кварков.

Обычно цветовые заряды называют красным, синим и жёлтым цветом кварков. «Цвета» антикварков соответственно: антикрасный, антисиний и антижёлтый. Оказывается, что, как и в оптике, смешение красного, синего и жёлтого цветов в определённой пропорции даёт белый (нейтральный) цвет. Так же и «цвета» кварков взаимно нейтрализуют при их сложении. Нейтрализуют друг друга цвет и антицвет, аналогично дополнительным цветам в оптике.

Адроны устроены так, что они оказываются «бесцветными» или «белыми». Это означает, что взаимодействие кварков «цветовыми зарядами» происходит только внутри адронов. Внутри адронов этот вид взаимодействия ненаблюдаем. То есть нельзя выделить из адрона отдельный кварк. Поэтому до создания теории кварков этот вид взаимодействия был неизвестным.

За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий, американский физик Гелл-Манн был удостоен Нобелевской премии (1969 г.).



Мюррей Гелл-Манн
(р. 1929)

✎ **Пример 1.** Определить электрический и барионный заряды, а так же спин протона и антипротона. Использовать таблицу характеристик кварков и таблицу строения барионов.

✎ **Решение.** Структура протона (рис. 1): $p = (uud)$.

Электрический заряд равен: $q_p = 2e/3 + 2e/3 + (-e/3) = +e$.

Барионный заряд: $B_p = 1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$.

Антипротон состоит из антикварков: $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$.

Электрический заряд: $q_{\bar{p}} = (-2e/3) + (-2e/3) + e/3 = -e$.

Барионный заряд $B_{\bar{p}} = (-1/3) + (-1/3) + (-1/3) = -1$.

В составе протона есть два кварка u . Но принцип Паули запрещает, чтобы в системе взаимосвязанных частиц были сразу два тождественных кварка. Однако *спин* (от англ. *spin* – *вертеть*[-ся], *вращение*) – *собственный момент импульса элементарных частиц, векторная величина*. Значит, спины двух u -кварков должны быть направлены противоположно друг другу.

Итак, спин протона (и антипротона) в единицах \hbar :

$$J_p = J_{\bar{p}} = 1/2 + (-1/2) + 1/2 = 1/2. \leftarrow$$

✓ **Ответ.** Электрический заряд протона $q_p = +e$, барионный заряд протона $B_p = +1$, спин протона $J_p = 1/2$. Электрический заряд антипротона $q_{\bar{p}} = -e$, барионный заряд $B_{\bar{p}} = -1$, спин $J_{\bar{p}} = 1/2$.

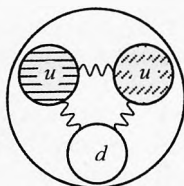


Рис. 1. Протон

§ 47. Глюоны

И всё-таки существуют ли кварки? И какими силами они удерживаются на расстоянии менее 1 фм, особенно если кварки одноимённо заряжены?

Предложена теория на основе обменного взаимодействия. Принципиальную роль в ней играет «цвет» кварков как особый квантовый заряд. Теория, описывающая взаимодействие кварков, называется квантовой хромодинамикой (от греч. *chroma* – цвет). Согласно ей, сильное взаимодействие между кварками осуществляется благодаря обмену глюонами (от англ. *glue* – клей) – безмассовыми частицами со спином 1, электрически нейтральными, но несущими цветовой заряд. Вводится 8 глюонов, каждый из которых состоит из цвета и антицвета. При испускании или поглощении глюона кварк меняет свой цвет, что обеспечивает притяжение между кварками.

Когда говорят, что атом состоит из ядра и электронов, а ядро из протонов и нейтронов, то предполагается, что эти частицы существуют в свободном виде и что, действуя на атом или ядро, эти частицы можно оттуда вырвать.

С кварками сложнее. Свободные кварки в природе не обнаружены. Никакими попытками не удалось освободить одиночный кварк. Объясняется это тем, что с увеличением расстояния между глюонами силы притяжения между ними возрастают. Поэтому оторвать кварки друг от друга очень трудно. Но неужели у современных ускорителей заряженных частиц не хватает сил разорвать эти связи?

Оказалось, что «снаряды» из современных ускорителей смогли разорвать глюонные связи между кварками. Но это не привело к появлению свободных кварков. Дело в том, что на разрыв связи между кварками затрачивается энергия намного больше необходимой для рождения пары «кварк-антикварк», то есть мезона. В результате вырывания кварка из элементарной частицы происходит рождение одной или нескольких пар «кварк-антикварк». Один из вновь рождённых антикварков соединяется с освобождённым кварком и образуется мезон, второй рождённый кварк возвращается цветовыми силами в исходную элементарную частицу. Состав частицы восстанавливается или меняется, но остаётся «белый». Свободный же кварк не образуется.

Сколько всего «истинных» элементарных частиц? Шесть названий кварков: *u, d, s, c, b, t*. У каждого есть антикварк. Итого: $6 \cdot 2 = 12$. У каждого кварка и антикварка три цвета: $12 \cdot 3 = 36$. Ещё 8 глюонов и 8 антиглюонов, всего 16. Прибавим сюда ещё 12 лептонов и фотон. Значит общее число самых элементарных частиц равно 57. Что будет дальше мы пока не знаем, но теория кварков вряд ли будет отменена в будущем. Дальнейшее развитие «причешет и пригладит» её. Возможно, появятся новые частицы. И, как в начале XX века, мы обнаружим, что микромир, как и мегамир (космос), бесконечен.



Упражнения

1 В результате аннигиляции электрон и позитрон исчезают, рождая два γ -кванта. Какова минимальная суммарная энергия этих γ -квантов.

2 При каком виде радиоактивного распада из атомного ядра вылетают электрон и антинейтрино?

3 Свободный пион (π^0 -мезон) с энергией покоя $E_0 = 135$ МэВ распадается на два γ -кванта, причём один из них распространяется в направлении движения пиона, а второй – в противоположном направлении. Энергия первого кванта на 10% больше, чем второго. Определить скорость пиона до распада. Считать, что она значительно меньше скорости света.

4 Покоящийся пион (π^0 -мезон) распадается на два γ -кванта. Импульс одного из образовавшихся γ -квантов равен $p_1 = 3,6 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с. Найти массу π^0 -мезона.

5 При аннигиляции электрона e^- и позитрона e^+ с энергией $E_e = 100$ МэВ каждая образуются два γ -кванта. Суммарный импульс частиц равен нулю. Определить импульс каждого γ -кванта?

6 Пи-нуль-мезон распадается на два одинаковых фотона, разлетающихся под углом 60° друг к другу. Найти энергию каждого из фотонов и энергию пиона до распада.

7 Время жизни заряженного пиона $\tau_z = 2,6 \cdot 10^{-8}$ с, нейтрального пиона – $\tau_n = 1,8 \cdot 10^{-16}$ с. Заряженный пион распадается за счёт слабого взаимодействия, нейтральный пион – за счёт электромагнитного взаимодействия. Какое из взаимодействий больше и во сколько раз?

Решения, указания и ответы для самоконтроля

1 $E = 2mc^2 = 1,64 \cdot 10^{-13}$ (Дж) = 1,02 (МэВ).

2 β^- -распад.

3 $E_0 + \frac{mv^2}{2} = E_1 + E_2$, $mv = \frac{E_1}{c} - \frac{E_2}{c}$, $E_0 = mc^2$, $E_1 = 1,1 \cdot E_2$;

$\Rightarrow v^2 - 42cv + 2c^2 = 0$; $v = c \cdot (21 \pm \sqrt{21^2 - 2}) = c \cdot 0,04767 = 1,43 \cdot 10^7$ (м/с).

4 $E_1 = E_2 = p_1 \cdot c$, $E = E_1 + E_2$, $E = mc^2$; $m = 2p_1/c = 2,4 \cdot 10^{-28}$ (кг).

5 $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$; $2E_e = 2E_\gamma$, $E_\gamma = p_\gamma \cdot c$; $\Rightarrow p_\gamma = E_e/c = 5,3 \cdot 10^{-20}$ (кг·м/с).

6 $E = 2E_\gamma$, $p = 2 \cdot p_\gamma \cdot \cos 30^\circ$, $E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 c^4$, $E_\gamma = p_\gamma \cdot c$, $m = 264m_e$;
 $\Rightarrow E = 2mc^2 = 270$ (МэВ); $E_\gamma = 135$ (МэВ).

7 $E_{\text{сл}} \cdot \tau_z \approx \hbar$, $E_{\text{эм}} \cdot \tau_n \approx \hbar$; $\Rightarrow E_{\text{эм}} = 1,4 \cdot 10^8 \cdot E_{\text{сл}}$.

Приложение. Основные формулы

1. Элементы теории относительности

Релятивистский закон преобразования скоростей при $\vec{v}_1 \parallel \vec{v}_2$: $\vec{v} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2}{1 + \frac{(\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2)}{c^2}}$.

Если $\vec{v}_1 \uparrow \vec{v}_2$, то $v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$. Если $\vec{v}_1 \uparrow \vec{v}_2$, то $v = \frac{|v_1 - v_2|}{1 - \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$.

Релятивистское замедление времени: $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, $\tau \geq \tau_0$.

Лоренцево сокращения длины: $l = l_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$, $l \leq l_0$.

Преобразования Лоренца: $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Релятивистский фактор Лоренца: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, $\gamma > 1$.

Релятивистский эффект Доплера: $v = v_0 \cdot \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta}$, $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta\right)$;

– если источник удаляется ($\theta = 0$), то: $v_{\text{отдаления}} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$, $v_{\text{отдаления}} < v_0$, $\lambda_{\text{отдаления}} = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$;

– если источник приближается ($\theta = 180^\circ$): $v_{\text{сближения}} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$, $v_{\text{сближения}} > v_0$, $\lambda_{\text{сближения}} = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$;

– поперечный эффект Доплера ($\theta = 90^\circ$): $v_{\perp} = v_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$, $v_{\perp} < v_0$, $\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Классический эффект Доплера (при $v \ll c$): $v = \frac{v_0}{1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta}$, $\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \frac{v}{c} \cdot \cos\theta)$, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \cdot \cos\theta$;

– если источник удаляется ($\theta = 0$): $v_{\text{сближения}} = v_0 \cdot \frac{c}{1 - v}$, $\lambda_{\text{сближения}} = \lambda_0 \cdot \frac{c - v}{c}$, $\frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$, $\Delta\lambda < 0$;

– если источник приближается ($\theta = 180^\circ$): $v_{\text{отдаления}} = v_0 \cdot \frac{c}{1 + v}$, $\lambda_{\text{отдаления}} = \lambda_0 \cdot \frac{c + v}{c}$, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$, $\Delta\lambda > 0$.

Энергия и импульс невещественной (безмассовой) частицы: $E = pc$, $E^2 - p^2 c^2 = 0$.

Энергия покоя вещественной частицы: $E_0 = mc^2$.

Энергия, импульс и масса вещественной частицы: $E^2 - p^2 c^2 = E_0^2$, $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$.

Энергия вещественной частицы: $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Импульс вещественной частицы: $\vec{p} = \frac{E \cdot \vec{v}}{c^2}$, $\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Релятивистская масса в трактовке 1-й половины XX в.: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Кинетическая энергия: $E_{\text{к}} = E - E_0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$. При $v \ll c$: $E_{\text{к}} \approx \frac{mv^2}{2}$.

Релятивистское уравнение движения тела: $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$ или $\Delta \left(\frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \vec{F} \cdot \Delta t$.

Общая масса системы: для не взаимодействующих частиц: $M = \sum m_i + \frac{E_{\kappa 0}}{c^2}$; для взаимодействующих

частиц: $M = \sum m_i + \frac{E_{\kappa 0} + W_0}{c^2}$.

Дефект массы системы частиц $\Delta m = M - \sum m_i$: для не взаимодействующих частиц: $\Delta m = \frac{E_{\kappa 0}}{c^2}$;

для взаимодействующих частиц: $\Delta m = \frac{E_{\kappa 0} - |W_0|}{c^2}$.

Изменение массы тела при изменении внутренней энергии: $\Delta m = \frac{\Delta U}{c^2}$, $\Delta U = \Delta m c^2$.

2. Фотоэффект. Кванты

Закон Столетова (падающий на фотокатод световой поток и ток насыщения): $I_{\kappa} = k \cdot \Phi$.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: $h\nu = A_{\kappa} + \frac{mv^2}{2}$, $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_{\kappa} + \frac{mv^2}{2}$.

Запирающее напряжение: $h \cdot \nu = A_{\kappa} + e \cdot U_{\kappa}$, $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_{\kappa} + e \cdot U_{\kappa}$; $e \cdot U_{\kappa} = \frac{mv^2}{2}$.

Красная граница фотоэффекта: $\nu_{\min} = \frac{A_{\kappa}}{h}$, $A_{\kappa} = h\nu_{\min}$, $A_{\kappa} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\max}}$.

Импульс фотона: $p = \frac{h\nu}{c}$, $p = \frac{h}{\lambda}$.

Энергия фотона (кванта электромагнитного излучения): $E = h\nu$, $E = pc$.

Правило Стокса (переизлучение при люминесценции): $h\nu_{\kappa} = h\nu - \Delta E$, $\nu_{\kappa} < \nu$, $\lambda_{\kappa} > \lambda$.

Эффект Комптона: $\Delta \lambda = 2\lambda \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$, где $\Lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,426 \cdot 10^{-12}$ (м).

Длина волны де Бройля: $\lambda_{\kappa} = \frac{h}{p}$, $\lambda_{\kappa} = \frac{h}{mv}$.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$, $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$.

Световое давление $p = (1 + A) \cdot w$, $p = (1 + A) \cdot \frac{j}{c}$, где w – средняя объёмная плотность энергии волны,

A – коэффициент отражения (альбедо) волны поверхностью.

Плотность потока излучения и средняя объёмная плотность энергии волны: $j = w \cdot c$.

3. Физика атома

Излучение (или поглощение) фотона электроном в атоме при переходе с уровня m на n :

$h\nu_{mn} = E_m - E_n$; $\nu_{mn} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, где $R \approx 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц – постоянная Ридберга.

Энергия системы ядро–электрон: $E = E_{\kappa} + E_{\epsilon}$; $E_{\epsilon} = -\frac{k \cdot e^2}{r}$, $E_{\kappa} = \frac{m_{\epsilon} v^2}{2}$, $E = -\frac{k \cdot e^2}{2r}$.

Правило квантования Бора для орбит электрона: $m_{\epsilon} v_n r_n = n \cdot \hbar$, где $n = 1, 2, 3...$

Правило квантования для системы из двух частиц: $m_1 v_1 r_1 + m_2 v_2 r_2 = n \cdot \hbar$, где $n = 1, 2, 3...$

Радиусы вращения электрона в водородоподобном атоме: $r_1 = \frac{\hbar^2}{m_{\epsilon} \cdot k \cdot e^2}$, $r_n = r_1 \cdot n^2$.

Энергия системы ядро-электрон: $E_1 = -\frac{k \cdot e^2}{2r_1}$, $E_1 = -\frac{m_e \cdot k^2 \cdot e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ}$; $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

Длина резонатора в лазере: $L = k \cdot \frac{\lambda}{2}$, где $k = 1, 2, 3 \dots$

4. Атомное ядро

Правило смещения при α -распаде: ${}^M_Z X \rightarrow {}^{M-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$.

Правило смещения при β -распаде: ${}^M_Z X \rightarrow {}^M_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$, ${}^M_Z X \rightarrow {}^M_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e$.

Правило смещения при γ -распаде: ${}^M_Z X^* \rightarrow {}^M_Z X + \gamma$.

Размеры атомных ядер: $R \approx r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$, $r_0 = 1,2 \text{ фм}$, A – массовое число.

Закон радиоактивного распада: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$, $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$.

Активность радиоактивного источника: $A = -\frac{\Delta N_{\text{расп}}}{\Delta t}$, $A = -\frac{dN}{dt}$, $A = \frac{N \cdot \ln 2}{T}$, $A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$.

Среднее время жизни ядра: $\tau_{\text{ср}} = \frac{T}{\ln 2} \approx 1,44 T$.

Постоянная распада: $\lambda = -\frac{dN}{N \cdot dt}$, $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$, $A = \lambda \cdot N$.

Дефект масс (уменьшение массы) ядра: $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_a$, $\Delta m > 0$.

Энергия связи ядра: $E_{\text{св}} = (m_a - Z \cdot m_p - N \cdot m_n) c^2$, $E_{\text{св}} = -\Delta m c^2$, $E_{\text{св}} < 0$.

Удельная энергия связи ядра: $E_{\text{св,уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$, $E_{\text{св,уд}} < 0$

Модуль энергии связи ядра: $|E_{\text{св}}| = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_a) c^2$, $|E_{\text{св}}| = \Delta m c^2$, $|E_{\text{св}}| > 0$.

Энергетический выход ядерной реакции: $Q = E_{\text{кйн,пр}} - E_{\text{кйн,исх}}$, $Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}}) c^2$.

Коэффициент размножения нейтронов в цепной реакции деления ядер: $k = \frac{N_{i+1}}{N_i}$.

Поглощенная доза ионизирующего излучения: $D = \frac{E}{m}$.

Мощность дозы излучения: $\dot{D} = \frac{D}{t}$.

Эквивалентная доза поглощенного излучения: $H = D \cdot k$.

Заряд ионов каждого знака при облучении воздуха при н.у. экспозиционной дозой излучения X

в объеме V : $q = q_0 \cdot \frac{X}{X_0} \cdot \frac{V}{V_0}$, где $V_0 = 1 \text{ см}^3$, $X_0 = 1 \text{ Р}$, $q_0 = (1/3) \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$.

Источники иллюстраций

Стр. 50, фото Гейзенберга: Deutsches Bundesarchiv / Wikimedia Commons

Стр. 60, фото слева: AleSpa / Wikimedia Commons, по лицензии CC BY-SA 3.0; *фото справа:* Raysonho @ Open Grid Scheduler / Grid Engine / Wikimedia Commons, на условиях лицензии CC BY-SA 3.0

Стр. 84, фото Фабриканта: личный фотоархив Л. М. Бибермана / ru.wikipedia.org, на условиях лицензии GNU Free Documentation License

Стр. 86, фото Таунса: Roy Kaltschmidt / en.wikipedia.org

Стр. 147, рис. 24–25: Wikimedia Commons, на условиях лицензии CC BY-SA 3.0

Стр. 148, фото Трутнева: Kremlin.ru; *рис. 26:* User: Croquant with modifications by User: Hex / Wikimedia Commons, на условиях лицензии CC BY-SA 3.0

Стр. 168: 和平奮鬥救地球 / Wikimedia Commons, на условиях лицензии CC BY-SA 4.0