

А. И. Абрамов

ИСТОРИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ



ОБНИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ФАКУЛЬТЕТ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

А. И. Абрамов

ИСТОРИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Рекомендовано УМО в области ядерных физики
и технологий в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений

Издание второе, исправленное

МОСКВА



URSS

ББК 22.383 22.3г 72.3
УДК 539.1 (03)

Абрамов Александр Иванович

История ядерной физики: Учебное пособие. Изд. 2-е, испр. — М.: КомКнига, 2006. — 232 с.

ISBN 5-484-00270-2

В настоящем пособии в краткой форме рассматривается история развития представлений об атомах с античных времен и до конца XX века. При этом основное внимание уделяется истории собственно ядерной физики, начавшейся с открытия французским физиком Беккерелем радиоактивного излучения. В приложениях приводятся краткие биографические сведения о выдающихся ученых, хронологическая таблица и подробная библиография.

Предназначается в качестве учебного пособия для студентов, изучающих курс ядерной физики, а также для всех читателей, интересующихся данным вопросом.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *О. Т. Грудзевич*;

доктор философских наук, профессор *В. А. Канке*;

доктор физико-математических наук, профессор *В. Г. Кириллов-Угрюмов*

Портреты ученых предоставлены сотрудниками ОГТУАЭ

В. Виноградовой и И. Гончаровой.

Издательство «КомКнига». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.

Подписано к печати 02.05.2006 г. Формат 60 × 90/16. Печ. л. 14,5. Зак. № 446.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, д. 11А, стр. 11.

ISBN 5-484-00270-2

© КомКнига, 2006

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете:
	http://URSS.ru
	Тел./факс: 7 (495) 135-42-16
URSS	Тел./факс: 7 (495) 135-42-46

3551 ID 31820



9 785484 002702 >

Оглавление

Предисловие	4
1. Атомистика от древнейших времен до конца XVIII века . .	5
2. От гениальных догадок к первым относительным измерениям (первая половина XIX века)	17
3. От относительных измерений к точным параметрам атома (вторая половина XIX века)	31
4. От внешних параметров атома к его строению (начало XX века)	48
5. От строения атома к строению атомного ядра (середина XX века)	91
6. От ядерной физики к ядерной технике (середина XX века)	127
7. И снова ядерная физика (вторая половина XX века)	141
8. Управляемый термоядерный синтез (энергетика XXI века)	177
9. Развитие теоретических представлений об атомном ядре (вторая половина XX века)	185
Заключение	193
Приложение 1. Краткие биографические сведения	194
Приложение 2. Хронологическая таблица	211
Литература	228

Предисловие

У каждой истории есть своя предыстория. У истории ядерной физики такой предысторией является история появления и развития представлений людей об атомах и молекулах — мельчайших частичках вещества, которых никто никогда не видел, но, тем не менее, люди не только догадались об их существовании, но и научились измерять их параметры с весьма высокой точностью. Без понимания логики развития человеческой мысли в этом направлении невозможно понять, как эта мысль проникла еще глубже в природу вещества и постигла внутреннее устройство и самих атомов, и отдельных их частей, главной из которых является атомное ядро. Поэтому мы начнем наше повествование с древнейших времен, когда величайшие мыслители древности начали искать ответ на вечный вопрос: из чего состоит весь мир, отдельные вещи и мы сами? И постепенно постараемся прийти к современному пониманию правильных ответов на эти вопросы.

Научные представления создаются и развиваются конкретными людьми — великими учеными и их последователями. Поэтому в данной книге значительное внимание уделяется описанию деятельности отдельных ученых и приводятся портреты многих из них, а в Приложении 1 даются краткие биографические сведения о наиболее выдающихся деятелях науки. В Приложении 2 помещена Хронологическая таблица, отражающая ход развития представлений об атоме и атомном ядре во времени. А список литературы поможет читателю получить более глубокие сведения о данном предмете.

Автор будет благодарен читателям этой книги за любые критические замечания и советы.

Атомистика от древнейших времен до конца XVIII века

Из чего состоит вещество? Над этим вопросом люди начали задумываться еще в глубокой древности. И поскольку никаких физических методов исследований, да и самой физики как науки, тогда не было и в помине, ответ на этот вопрос философы пытались найти путем логических размышлений. При этом такие размышления велись, как правило, по двум основным направлениям.

На первый взгляд только некоторые вещества (например древесина) имеют видимую глазом структуру. Большинство же других веществ, таких как вода, масло, металлы, воздух, воспринимаются как некие сплошные бесструктурные среды, которые можно до бесконечности разделять на части, и при этом каждая часть, как бы мала она ни была, сохраняет все основные свойства исходного вещества.

Но, с другой стороны, дробя вещество до бесконечности, мы в пределе приходим к точке. А может ли точка, как нечто, не имеющее ни размеров, ни массы, быть носителем индивидуальных свойств вещества? Чем точка, к которой мы приходим, дробя воду, может отличаться от точки, полученной от дробления свинца? Но если точка не может быть носителем определенных свойств, значит дробление вещества до бесконечности (при условии сохранения его свойств) невозможно. Отсюда следует, что любое вещество, например вода, должно состоять из мельчайших частичек, еще несущих в себе все основные свойства воды, но которые разделить на части с сохранением этих свойств уже невозможно.

Таких (или примерно таких) взглядов придерживались многие мыслители, жившие в различных странах Древнего мира и, в частности, в Древней Греции.

Взгляды древнегреческих мыслителей на строение вещества. Одним из родоначальников античной философии считается Фалес Милетский, живший на рубеже VII и VI вв. до н. э. в греческом городе Милете на западе современной Турции на берегу

Ионического моря. Все многообразие явлений и вещей в природе он сводил к единой первостихии — к воде, которая выступала в его взглядах как сплошная бесструктурная среда. Ученик Фалеса Анаксимандр (610–546 гг. до н. э.), автор первого известного философского трактата «О природе», придерживался аналогичных взглядов, только в качестве первоматерии у него фигурировало некое неопределенное вещество «апейрон». На греческом языке это слово означает «бесконечное», «беспредельное». В дальнейшем данное понятие использовалось Платоном и пифагорейцами в качестве синонима материи. Последователь Анаксимандра Анаксимен (585–524 гг. до н. э.) первоначально всего считал воздух, из сгущения которого возникают все вещи.

К северу от Милета находился другой город — Эфес. В нем жил еще один греческий философ — Гераклит (конец VI — начало V вв. до н. э.). Он считал, что первоначально всего является огонь, который есть также душа и разум (логос), путем сгущения из огня возникают все вещи. Гераклит был одним из родоначальников диалектики. Именно ему принадлежат утверждения о том, что все течет, все непрерывно изменяется; мир не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим.

Общим в воззрениях всех упомянутых философов, которых относят обычно к ионийской школе, было то, что они воспринимали вещество в качестве некоторой непрерывной бесструктурной субстанции, о природе которой, однако, у них не было единого мнения.

Но примерно в то же время в Греции жили и другие философы, придерживавшиеся иных точек зрения.

Одним из первых высказал идею о существовании неких «неразрушимых элементов» древнегреческий философ Анаксагор (500–428 гг. до н. э.). Он считал, что все вещи состоят из первичных мельчайших частиц — «семян», названных позднее Аристотелем «гомеомериями». Так кости состоят из маленьких костей, кровь — из множества кровяных капелек, огонь — из огней и т. д. Но Анаксагор не указывает на присутствие пустоты. Эти идеи были подхвачены другим философом Левкиппом (V в. до н. э.), который считается одним из основателей античной атомистики.

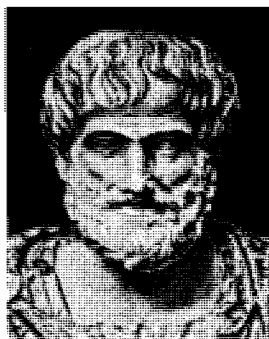
Взгляды Анаксагора и Левкиппа развил их ученик Демокрит (ок. 460–370 гг. до н. э.). Мельчайшие неделимые частички вещества

он называл *атомами* (греческое слово, означающее «неделимый»). Демокрит считал, что «ничего не существует, кроме атомов и пустого пространства. Атомы бесконечны в числе и бесконечно различны по форме. В вечном падении через бесконечное пространство большие, которые движутся скорее, ударяются в меньшие; возникающие при этом боковые движения и вращения суть начала образования миров. Бесконечные миры возникают и снова исчезают друг возле друга и друг после друга. Различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке. Качественного различия атомов не существует. Атомы не имеют „внутреннего состояния“: они действуют друг на друга посредством давления и удара. Душа состоит из мелких, гладких и круглых атомов, подобных атомам огня. Эти атомы — самые подвижные, и от их движения, проникающего через все тело, происходят явления жизни». Здесь материалистические представления о природе мира сочетаются с идеалистической концепцией души, но и душу Демокрит пытается трактовать с материалистических позиций.



Демокрит

Одним из величайших мыслителей древности был Аристотель (384–322 гг. до н. э.), который основную часть жизни провел в Афинах. Его многочисленные произведения практически по всем областям знания признавались и изучались даже в средние века христианскими богословами (хотя сам Аристотель был, естественно, язычником). Как бы объединяя воззрения ионийцев, Аристотель, вслед за Эмпедоклом, утверждал, что в основе мира лежат четыре первичных элемента — огонь, воздух, вода и земля, — которые в сочетании с четырьмя основными качествами — тепло, холод, сухость и влажность — образуют все разнообразие вещей видимого мира. Но в то же время Аристотель отдавал должное и взглядам атомистов: «Если же Вселенная не непрерывна, но, как говорят Демокрит и Левкипп,



Аристотель

представляет собой атомы, разграниченные пустотой, то у всех у них должно быть одно движение, так как атомы различаются фигурами, а природа у них одна». Возражая некоторым философам, утверждавшим, что деление любого тела можно проводить до бесконечности, Аристотель говорит: «Более основательно утверждение, что существуют неделимые тела». Таким образом, несмотря на очевидные противоречия, во взглядах Аристотеля четко прослеживается мысль о том, что все в природе состоит из неделимых атомов, и этим подводится как бы итог атомистическим представлениям древнегреческих философов.

Атомистика в Древнем Риме. Философские течения в Древнем Риме складывались под сильным влиянием учений греческих философов. Одним из проводников этого влияния был живший в Ита-



Эпикур

лии греческий философ Эпикур (341–270 гг. до н. э.). Учение Эпикура изложено в поэме «О природе вещей», написанной его последователем римским поэтом и философом Лукрецием Каром (94–51 гг. до н. э.). Вслед за Демокритом, как пишет Лукреций, Эпикур признавал существование атомов и пустоты и вечности материи, утверждая, что «из ничего не творится ничто по божественной воле». Говоря о ненаблюдаемости атомов, Лукреций обращается к читателю со словами: «Выслушай то, что скажу, и ты сам, несомненно, признаешь, что существу-

ют тела, которых мы видеть не можем». И далее приводит ряд примеров, подтверждающих эту мысль: распространение запахов, высыхание одежды («значит, дробится вода на такие мельчайшие части, что недоступны они совершенно для нашего взгляда») и другие. Атомы находятся в постоянном движении. Им «вовсе покоя нигде не дано в пустоте необъятной. Наоборот, непрерывно гонимые разным движеньем, частью далеко они отлетают, столкнувшись друг с другом», а в других случаях соединяются, образуя различные тела, или разъединяются, когда тела распадаются на части.

Атомистика Древнего Востока. Трудно предположить, что в Древнем мире существовали тесные связи и, как теперь говорят, происходил обмен информацией между Древней Грецией и Римом,

с одной стороны, и такими странами, как Индия и Китай, — с другой. Однако и в этих странах, по-видимому, независимо друг от друга, возникали атомистические представления о строении вещества. Так, например, появившееся в Индии в VI в. до н. э. учение «Вайшешика» утверждало, что все в природе состоит из вечных неделимых частиц или из их сочетаний; частицы различных веществ качественно различаются; они не воспринимаются непосредственно органами чувств и об их существовании можно узнать только путем логических умозаключений. Все это очень близко к представлениям греческих атомистов, но, в отличие от последних, в учении «Вайшешика» причиной движения частиц считается сверхъестественная сила — *адришта*. При этом многие восточные мудрецы считали, что частицы вещества соединяются и разъединяются под действием сил «любви» и «ненависти» (притяжения и отталкивания).

В Китае основные философские школы возникли в V–III вв. до н. э. Согласно взглядам основоположника древнего философского даосизма Лао-цзы, изложенным в трактате «Дао дэ цзин», все вещи состоят из мельчайших материальных частиц *ци*. Мир находится в постоянном движении и изменении и подчиняется единому закону — *дао*.

Таким образом, за сотни лет до новой эры в различных странах — Греции, Риме, Индии, Китае — возникали и развивались атомистические представления о строении вещества. Конечно, в ту пору высказывания мыслителей являлись лишь гениальными догадками, не подтвержденными никакими экспериментальными фактами; не приходится говорить и о том, что вопрос об измерении атомов тогда и не возникал. Нам лишь приходится удивляться тому, что поэма Лукреция Кара была написана столь давно — более чем за тысячу лет до крестовых походов и нашествия монголов на Киевскую Русь.

Очень важно отметить общее стремление древних мыслителей найти некое общее начало, первопричину, первичные элементы, из которых состоит весь мир. У одних это были единые субстанции (вода у Фалеса или апейрон у Анаксимандра), другие допускали наличие нескольких первоэлементов (Аристотель), атомисты искали такое начало в атомах, бесконечные сочетания которых образовывали все многообразие различных вещей и миров. Это стремление найти простое объяснение окружающего нас мира проходит крас-

ной нитью через всю историю развития атомистических представлений и в измененном виде существует в современной науке.

Однако передовым идеям античных философов не суждено было получить сразу дальнейшее развитие.

Эпоха Средневековья. После падения Западной Римской империи (476 г. н. э.) в Европе начались мрачные времена Средневековья. В обстановке общего застоя все лучшее, что было сделано передовыми мыслителями древности, было предано анафеме и забыто. Основной философской системой стала схоластика, для которой характерно соединение религиозно-догматических предпосылок с формально-логическими построениями. В качестве основного способа познания использовались диспуты, в ходе которых пытались установить истину путем бесконечных споров и ссылок на авторитеты. Правда, труды Аристотеля изучались средневековыми богословами, но из его учения выбиралось лишь то, что хоть как-то укладывалось в рамки религиозных представлений. Поэтому атомистика была практически полностью забыта. Зато махровым цветом разрослись различные псевдонауки, такие как алхимия и астрология, для которых характерны мистика и суеверия. Возникнув в Египте в III–IV вв. н. э., алхимия получила особенно широкое распространение в Западной Европе в XI–XIV вв. Как известно, основным устремлением алхимиков было найти способ превращения простых металлов в золото с помощью мифического «философского камня». В этом нашла отражение старая легенда о том, что искусство облагораживать металлы еще до потопа принесли на землю демоны. Следы этой легенды можно найти в Библии, но наиболее полно она представлена в неканонической Книге Еноха (главы 6–9). Позднее с помощью того же «философского камня» и различных эликсиров пытались найти путь к бессмертию. Эти шарлатанские цели отвлекали людей от истинно научных исследований, так что тут уж было не до атомов. Хотя кое-что полезное алхимики и изобрели, например, такие методики, как перегонку, возгонку, открыли ряд химических соединений и т. п. Поэтому можно сказать, что алхимия представляла собой странное сочетание полезных практических знаний (не потерявших своего значения и в наши дни) с совершенно извращенными измышлениями — верой в то, что на ход химических реакций влияет расположение звезд на небе, настроения добрых и злых духов и т. п.

Эпоха Возрождения. Ситуация начала меняться лишь в конце XV в., когда наступила эпоха Возрождения. Такие мыслители, как Николай Кузанский (1401–1464), Леонардо да Винчи (1452–1519), Николай Коперник (1478–1543), а в дальнейшем — Джордано Бруно (1550–1600), Галилей (1564–1642) и другие решительно выступили против засилья средневековой схоластической науки, за торжество нового научного мировоззрения. Этим они подготовили почву для возрождения и атомистических представлений.

Решающие удары схоластике были нанесены современниками Галилея Бэконом и Декартом. Фрэнсис Бэкон (1566–1626) был лордом-канцлером при дворе английского короля Якова I. Государственную деятельность он сочетал с занятиями философией и наукой. Ф. Бэкон по праву считается родоначальником английского материализма. В трактате «Новый органон» (1620) он провозгласил целью науки увеличение власти человека над природой и обращение от схоластических рассуждений к опыту. Он одним из первых вспомнил об атомах и часто приводил античных атомистов Анаксагора и Демокрита в качестве научных авторитетов. Происхождение тепла Бэкон объяснял «энергичным, сдерживаемым движением внутри маленьких частиц материи».

Другой ученый того времени Декарт (1596–1650) считал, что материя состоит из мельчайших частиц трех классов («элементов»). Наименьшие размеры и наибольшую подвижность имеют элементы огня, которые заполняют промежутки между всеми другими частицами. Второй элемент состоит из гладких частиц круглой формы — это воздух. Наиболее крупные и медленно движущиеся частицы составляют элемент земли. Свойства тел определяются подвижностью частиц и силами сцепления их друг с другом. Почти неподвижные сцепленные частицы образуют твердые тела. Жидкие тела, воздух и пламя состоят из подвижных легких частиц. Все частицы, участвуя в вихревом движении, в конечном итоге образуют все тела мира, в том числе Солнце, звезды и планеты. Высказывая эти материалистические идеи, Декарт в то же время признавал существование души и Бога (в этом состоял дуализм Декарта), однако, по его мнению, Бог со-



Декарт

здал мир, а затем «самоустранился», предоставив миру возможность изменяться по его собственным законам.

Таким образом, Бэкон и Декарт, рисуя разные картины мира и используя разные методы (Бэкон — индукцию, Декарт — анализ и дедукцию), делали общее дело — закладывали фундамент новой науки и новой философии.

В это же время происходит постепенный закат лженауки — алхимии. Выдающаяся роль в этом процессе принадлежит Роберту Бойлю, которого по праву считают «отцом» современной химии. От поисков «философского камня» химия обрела свой собственный предмет изучения и зарекомендовала себя подлинной наукой наряду с физикой и математикой. Роберт Бойль дал четкое определение химическим элементам, как неделимым компонентам материи. Он предвидел, что число известных людям элементов со временем возрастет и что некоторые элементы, которые его современники считают однородными, в результате более тщательных исследований окажутся соединениями.



Роберт Бойль

Наконец, Р. Бойль был соавтором первого газового закона Бойля—Мариотта. Интересно отметить, что начало науки о газах было заложено голландским алхимиком Гельмонтом (1577–1644), который ввел термин «газ», произведенный от немецкого слова *geist* — дух. Гельмонт первым обнаружил, что газы имеют массу. Этой же точки зрения придерживался и Р. Бойль, наблюдая, как при окислении различных веществ их масса увеличивается.

Начало Нового времени (XVII–XVIII вв.). Одним из величайших ученых Нового времени был английский физик и математик Исаак Ньютон (1643–1727). Он не только разработал дифференциальное и интегральное исчисления, заложил основы классической механики, открыл закон всемирного тяготения, но и развил корпускулярную теорию света. Согласно этой теории свет является потоком частиц (корпускул), причем различным цветам соответствуют корпускулы с разными свойствами, по-разному взаимодействующие с веществом. С помощью этой теории Ньютон объяснил прямолинейное распространение света, дисперсию света (разложение

на цветные составляющие), хроматическую aberrацию. В то же время, Ньютон обнаружил и некоторые явления (так называемые «кольца Ньютона»), которые не укладывались в рамки корпускулярных представлений, что привело его к гипотезе существования какого-то волнового движения, направляющего движение световых корпускул. Тем самым Ньютон впервые ввел в оптику дуалистическую теорию волн-корпускул, превосхитив современные представления о фотонах. Вещество по Ньютону также состоит из твердых, массивных, непроницаемых подвижных частиц, различающихся по массе и объему, но имеющих единую неизменную природу. «Изменения телесных вещей должны проявляться только в различных разделениях и новых сочетаниях и движениях таких постоянных частиц». Таким образом, Ньютон последовательно развивает атомистические представления своих предшественников от Демокрита до Декарта и дополняет их собственными идеями.



Исаак Ньютон

В начале XVIII в. немецкий химик Шталь создал теорию флогистона, который принимался за начало «горючести», гипотетическую составную часть веществ, которую они теряют при горении. Одно время теория флогистона пользовалась широким признанием, и в нее верили такие крупные ученые, как Кавендиш, Пристли, Шееле и др. Однако в конце того же века гипотеза флогистона была опровергнута трудами Лавуазье, показавшими роль кислорода в этом процессе. Признание роли химической реакции соединения кислорода с различными веществами в процессе горения — еще один шаг на пути становления и победы атомистических представлений.

В России последовательным сторонником атомизма был великий русский ученый М. В. Ломоносов (1711–1765). Он считал, что вещество состоит из «нечувствительных частиц» — корпускул. Эти частицы при контакте могут сцепляться друг с другом, образуя сложные тела. Внутреннее вращательное движение частиц есть причина теплоты; при этом частички горячих тел должны вращаться скорее, более холодных — медленнее. Чем быстрее вращаются частички, тем сильнее они отталкивают друг друга —



Михаил Васильевич
Ломоносов

этим объясняется плавление твердых тел и испарение жидких: «Из системы коловратного теплотворного движения явствует, что теплых тел частицы скорее вертятся и большею силою одна другую от себя отбивают... для того союзу оных частиц тем больше должно умалиться, чем больше в себе тело теплоты или жару имеет, и так до того разожжено быть может, что не токмо в жидкое претворяется, но и... в пар распушается». Ломоносов приходит к выводу о том, что «должна существовать наибольшая степень холода, состоящая в полном покое частичек, в полном отсутствии вращательного движе-

ния их». Тем самым он предвосхитил идею абсолютного температурного нуля. Другой вывод Ломоносова состоял в том, что тело не может передать соприкасающемуся с ним другому телу температуру выше той, которую само имеет. Лучистая теплота по Ломоносову заключается во вращательном движении частиц эфира, которым заполнено все пространство. Объясняя теплоту движением частиц, Ломоносов наносил сильнейший удар по господствовавшей до него теории теплорода, согласно которой наличием этой мифической жидкости в телах якобы обуславливалась степень их нагрева, а переливанием теплорода из нагретых тел в холодные объясняли явления теплопроводности.

Большим достижением Ломоносова была разработка им теории упругости воздуха. Он утверждал, что упругость воздуха «происходит от какого-то непосредственного взаимодействия атомов». Для такого взаимодействия атомы должны соприкасаться друг с другом. Однако большая сжимаемость воздуха говорит о наличии между его атомами больших расстояний. Выход из этого противоречия Ломоносов нашел, введя представление о временном контакте частиц: «Очевидно, что отдельные атомы воздуха, взаимно приблизившись, сталкиваются с ближайшими в нечувствительные моменты времени, и когда они находятся в соприкосновении, вторые атомы друг от друга отпрыгнули, ударились в более близкие к ним и снова отскочили; таким образом, непрерывно отталкиваемые друг от друга частыми взаимными толчками, они стремятся рассеяться друг от друга». Именно такие представления о мгновенном взаимо-

	Века	
	наша эра	до нашей эры
	XVIII	I
	XVII	II
	XVI	III
	XV	IV
	XIV	V
	XIII	VI
	XII	VII
	XI	
	X	
	IX	
	VIII	
	VII	
	VI	
	V	
	IV	
	III	
	II	
	I	
		I
		II
		III
		IV
		V
		VI
		VII

Ломоносов
 Ньютон
 Декарт
 Ф. Бэкон

Лукреций
 Кар
 Эпикур
 Аристотель
 Демокрит
 Анаксагор
 Гераклит
 Анаксимен
 Анаксимандр
 Фалес

Рис. 1. Периоды жизни величайших мыслителей древности

действию соприкасающихся молекул лежат в основе современной кинетической теории идеального газа. Поэтому Ломоносова вполне обоснованно можно считать основоположником кинетической теории газов.

Помимо разработки атомистических представлений о природе вещества, Ломоносовым очень много было сделано и в других областях естественных наук, истории и литературы, и только ранняя смерть от простудного заболевания в возрасте 54 лет помешала ему завершить многое из того, что было им начато или задумано.

Некоторые итоги. Итак, в результате гениальных догадок многих выдающихся мыслителей, живших в разные века, к концу XVIII в. представления об атомарном строении вещества прочно вошли в науку. Наглядное представление о том, сколько времени потребовалось на развитие атомистических представлений, дает рис. 1, на котором изображены интервалы жизни величайших мыслителей, начиная с VII в. до н. э. и кончая XVIII в. н. э. Однако это были именно догадки, во многом наивные («коловоротное» движение частиц у Ломоносова) и не подкрепленные прямыми экспериментами. Предполагая существование атомов, ученые ничего не знали об их количественных характеристиках — размерах, массах, скоростях движения и т. д. Поэтому неудивительно, что у учения об атомах были не только сторонники, но и противники, утверждавшие, что об атомах нечего рассуждать до тех пор, пока атомы не будут всесторонне изучены и измерены. Эту задачу ученым предстояло решить в следующем XIX в.

От гениальных догадок к первым относительным измерениям (первая половина XIX века)

Рационализм французских, английских и других философов конца XVIII в. привел к решительному повороту от догматического мышления к точным методам исследований, когда досужие размышления на основе априорных догм уступили место количественным исследованиям и точным измерениям. И это изменение методического подхода сразу же привело к ряду существенных результатов.

Закон постоянства состава. В самом начале XIX в. французский химик Пруст (Пру) установил, что каким бы путем ни было получено данное химическое соединение, массовый состав его оказывается всегда одним и тем же. Это говорило о том, что составные части сложного вещества не могут смешиваться, как попало, а всегда соединяются в одних и тех же пропорциях. Сейчас это утверждение кажется очевидным, однако Прусту пришлось в свое время выдержать многолетний спор с другим крупным ученым Бертолле, прежде чем его закон стал общепризнанным (Бертолле утверждал, что состав химических соединений не является постоянным). Закон Пруста был по существу первым экспериментальным фактом, подтверждавшим существование атомов. Ведь если вещества бесструктурны, непрерывны, то ничто не мешает им смешиваться в любых пропорциях, как, например, воде и спирту (но смесь воды и спирта — это не химическое соединение!). А одинаковость состава химических соединений прямо указывало на то, что вещества состоят из отдельных крупинок (атомов), которые могут соединяться друг с другом лишь определенными способами.

Появление понятия химического элемента. Как отмечалось выше, еще древнегреческие ученые пытались найти некоторые первичные вещества, из которых состоят все остальные вещества в при-

роде. В частности, Аристотель высказал предположение о том, что все в природе состоит из четырех первичных веществ, которые он и назвал элементами, — огня, воздуха, воды и земли. В дальнейшем различными учеными выдвигались и другие предположения на этот счет. Одна из первых попыток дать научное определение понятию «химический элемент» была предпринята Робертом Бойлем в 1661 г., о чем говорилось выше. В результате многочисленных химических исследований было установлено, что подавляющее число веществ можно путем химических реакций разложить на более простые вещества (или получить их при соединении этих более простых веществ между собой). Но некоторые вещества не удавалось разделить никакими способами. Такие вещества стали называть сначала «простыми веществами», а позже — «химическими элементами» (в действительности, это разные понятия, различие между которыми будет разъяснено ниже). Современные знаки химических элементов ввел в 1814 г. Берцелиус, взяв за основу первые буквы их латинских названий.

Закон эквивалентных весов. В начале XIX в. немецкий химик В. Рихтер установил закон эквивалентных весов, одна из формулировок которого гласит: *если ряд элементов в определенных весовых количествах соединяется с одной весовой частью какого-либо другого элемента (например водорода), то и между собой эти элементы соединяются в тех же весовых количествах.* Например, известно, что одна весовая часть водорода, соединяясь с тремя весовыми частями углерода, образует метан, а с восьмью частями кислорода — воду. Из сформулированного выше принципа следует, что в таком случае три весовые части углерода должны без остатка соединяться с восьмью частями кислорода. И такое соединение действительно существует — это хорошо известный нам углекислый газ. Таким образом, каждому элементу можно было приписать определенное число, выражающее его относительный вес в соединениях с другими элементами. Сначала эти числа называли соединительными весами, потом — эквивалентными весами и, наконец, просто эквивалентами, или химическими эквивалентами (*эквивалент* на латинском языке означает равноценный, равнозначный), а сформулированное выше утверждение получило название ~~закона эквивалентных весов~~. Из рассмотренных примеров следует, что за эквивалент водорода можно принять число 1, эквивалентом углерода считать число 3, эквивалентом кислорода — число 8 и т. д.

Грамм-эквивалент. Количество элемента, масса которого численно равна его эквиваленту, стали называть *грамм-эквивалентом* данного вещества. Понятие грамм-эквивалента на первых порах оказалось очень удобным, так как, беря исходные элементы в количествах, пропорциональных их грамм-эквивалентам, всегда можно быть уверенным в том, что реакция между ними пройдет до конца и никакого остатка при этом не получится. Так, например, один грамм-эквивалент водорода (1 г) без остатка соединяясь с одним грамм-эквивалентом кислорода (8 г), образует воду.

Закон кратных отношений. Следующий шаг был сделан в 1803 г. другим английским химиком Дальтоном, который установил, что *если два элемента, соединяясь друг с другом, могут образовывать несколько различных соединений, то количества одного элемента в этих соединениях, приходящиеся на одно и то же количество другого элемента, относятся друг к другу как небольшие целые числа*. Так, например, азот и кислород образуют пять соединений, данные по составу которых приведены в табл. 1. Легко заметить, что массовые части кислорода, приходящиеся в этих соединениях на одну массовую часть азота, относятся друг к другу как небольшие целые числа $1 : 2 : 3 : 4 : 5$. Другой пример: в воде и в перекиси водорода на одну весовую часть водорода приходится 8 и 16 весовых частей кислорода соответственно. Отсюда следует, что весовые количества кислорода в этих соединениях относятся друг к другу как $1 : 2$.



Джон Дальтон

Установив закон кратных отношений и сравнив его с законом постоянства состава Пруста, Дальтон заметил, что эти законы легко можно объяснить с позиций атомистической теории. В самом деле, если вещество состоит из неделимых атомов, то атом азота может соединиться только с одним или с двумя атомами кислорода, но не с половиной атома или с какой-нибудь другой его дробной частью. Значит, в каждой мельчайшей частичке химического соединения (такие частицы Дальтон назвал «сложными атомами») отношение масс входящих в ее состав атомов элементов должно быть вполне определенным. А так как все частички одного химического соединения совершенно одинаковы (закон постоянства

Таблица 1

Состав соединений кислорода с азотом

Соединение	Доли масс (%)		Отношения долей масс кислорода к азоту	Отношения чисел в предыдущей колонке к первому из них
	азот	кислород		
Закись азота	63,7	36,3	0,57	1
Окись азота	46,7	53,3	1,14	2
Азотистый ангидрит	36,9	63,1	1,71	3
Двуокись азота	30,5	69,5	2,28	4
Азотный ангидрит	25,9	74,1	2,85	5

состава), то, следовательно, и в любом куске взятого вещества отношение масс элементов будет таким же, как и в каждом «сложном атоме». Но для того, чтобы узнать, во сколько раз атом одного элемента тяжелее атома другого элемента, необходимо было знать точный состав «сложного атома». В самом деле, в воде на одну весовую часть водорода приходится восемь частей кислорода. Отсюда следует, что если «сложный атом» воды состоит из одного атома водорода и одного атома кислорода (НО), то атом кислорода в 8 раз тяжелее атома водорода. Если же в «сложном атоме» воды на один атом водорода приходится два атома кислорода, то атом кислорода всего в 4 раза тяжелее атома водорода. И, наконец, если в воде два атома водорода соединяются с одним атомом кислорода, то масса последнего оказывается в 16 раз больше массы атома водорода. Так как никаких сведений о составе «сложного атома» воды у Дальтона не было, то он принял за истину самое простое первое предположение и... ошибся!

Прежде чем говорить о том, как была установлена и исправлена эта ошибка, следует отметить, что Дальтон не считал возможным существование «сложных атомов» у элементов. Тепло Дальтон объяснял не движением атомов, а присутствием теплорода, который, якобы, окружает маленькие твердые атомы наподобие атмосфер. Взаимное отталкивание этих «атмосфер» при сближении атомов объясняет упругость газов. При таких взглядах газ воспринимался

как статическая структура, а не совокупность быстро движущихся молекул. Таким образом, в этом вопросе Дальтон сделал шаг назад не только по сравнению с Ломоносовым, но даже по сравнению с древнегреческими философами, которые считали, что атомы находятся в непрерывном движении (Левкипп, Демокрит). Однако большой заслугой Дальтона было введение в представления об атомах количественных соотношений. Развитие идей в этом направлении и предопределило дальнейшие успехи атомной физики.

Закон объемных отношений Гей-Люссака. В 1808 г. французский физик Гей-Люссак открыл закон, названный впоследствии его именем, согласно которому объемы вступающих в химические реакции газов относятся друг к другу и к объему образующихся газообразных продуктов как небольшие целые числа. Так, например, при химическом соединении двух литров водорода с одним литром кислорода получается два литра водяного пара. Простота отношений объемов вступающих в реакцию и образующихся газов наталкивала на мысль, что и здесь проявляется атомарная структура вещества. Но как именно?



Жозеф Луи Гей-Люссак

Шведский ученый Берцелиус попытался предположить, что в равных объемах газов содержатся равные количества *атомов*. Однако это предположение пришлось вскоре отбросить, так как в некоторых случаях оно явно противоречило опытным данным. В частности, если бы оно было верно, то при соединении одного объема водорода с одним объемом фтора получалось бы не два объема фтористого водорода (как на опыте), а только один.

Появление понятия «молекула». В 1811 г. итальянский ученый Авогадро заметил, что все становится на свои места, если ввести новое понятие — *молекула*. Это понятие стали применять к мельчайшим частичкам вещества, способным к самостоятельному существованию. Различие точек зрения Дальтона и Авогадро заключалось в том, что последний допустил существование «сложных атомов» (молекул) и у чистых элементов.

Вот теперь можно вернуться к различию понятий «простое вещество» и «химический элемент». Под химическим элементом

стали понимать совокупность всех неделимых атомов с одинаковыми химическими свойствами. Так химическими элементами являются водород, кислород, железо и многие другие вещества. Но согласно гипотезе Авогадро, атомы элементов тоже могут соединяться в молекулы, причем число атомов в таких молекулах может быть разным. Например, известно, что кроме обычного кислорода, молекулы которого состоят из двух атомов (O_2), существует



Амедео Авогадро

другая разновидность кислорода с тремя атомами в молекуле — озон (O_3), сильно отличающийся от обычного кислорода по химическим свойствам. Вот такие различные химические вещества, молекулы которых состоят из атомов одного элемента, и называют «простыми веществами». Во многих случаях различие между этими двумя понятиями столь тонкое, что о нем просто забывают.

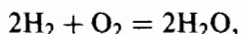
Закон Авогадро. Изучая свойства газов, Авогадро предположил, что *в равных объемах идеальных газов при одинаковых давлении*

и температуре содержатся одинаковые количества молекул. Это предположение в дальнейшем блестяще подтвердилось и получило название *закона Авогадро*. С его помощью Авогадро легко объяснил и закон Гей-Люссака, и протекание различных газовых реакций.

В дальнейшем было установлено, что ни в одной реакции из одного объема водорода не получается более двух объемов нового газообразного вещества. Отсюда следовало, что молекула водорода состоит именно из двух атомов, которые в ходе химической реакции могут разделиться и войти в состав двух новых молекул образующегося соединения. Аналогичный вывод можно было сделать и о молекулах азота, хлора, кислорода и некоторых других элементарных газов. Для того, чтобы подчеркнуть, что молекулы этих газов состоят из двух атомов, их стали обозначать символами соответствующих химических элементов с индексом «2» внизу: H_2 , N_2 , Cl_2 , O_2 и т.д.

Гипотеза Авогадро позволила объяснить протекание всех перечисленных выше реакций и исправить ошибку Дальтона, считавшего, как отмечалось выше, что состав воды выражается формулой HO . В самом деле, раз для получения воды на один объем кислорода надо брать два объема водорода, значит, при реакции одна молекула кислорода должна соединяться с двумя молекулами водорода

и реакция должна протекать следующим образом:



откуда два объема получающегося водяного пара следуют автоматически. Следовательно, правильным оказалось третье предположение в рассуждениях Дальтона, и масса атома водорода не в 8, а в 16 раз меньше массы атома кислорода. Аналогично можно записать и упомянутый выше процесс образования фтористого водорода.

Несмотря на то, что гипотеза Авогадро объясняла все известные к тому времени факты, многие ученые продолжали по привычке придерживаться старых взглядов. И только на химическом конгрессе в Карлсруэ 4 сентября 1860 г. была принята специальная резолюция, закрепляющая различие понятий атома и молекулы. С тех пор эти понятия считаются общепризнанными.

Итак, к середине XIX в. физики и химики не только получили убедительные доказательства существования атомов и молекул, вытекавшие из открытых законов, но и научились сравнивать их массы. Самым легким атомом оказался атом водорода; масса атома кислорода оказалась в 16 раз больше, а масса атома железа — в 56 раз больше массы атома водорода и т. д.

Атомные и молекулярные массы. Впервые понятие «атомный вес» было введено Дальтоном в начале XIX в. Затем вместо понятия «вес» стали пользоваться понятием «масса», но различия этих понятий в данном случае несущественное, и мы будем пользоваться современной терминологией. *Число, показывающее, во сколько раз масса атома данного элемента больше массы атома водорода, стали называть атомной массой этого элемента, а число, показывающее, во сколько раз масса молекулы данного вещества больше массы атома водорода — молекулярной массой данного вещества.* Так, например, атомная масса водорода равна 1, молекулярная масса водорода 2, атомная масса кислорода — 16, молекулярная масса кислорода — 32, молекулярная масса воды — 18 и т. д. Необходимо иметь в виду, что эти величины *безразмерные*, поскольку они выражают лишь отношения масс соответствующих атомов и молекул, а чему равны абсолютные значения этих масс (в граммах или в килограммах), ученые тогда еще не знали.

Грамм-молекула и грамм-атом. Очевидно, что если из различных веществ приготовить образцы, массы которых были бы численно равны молекулярным массам этих веществ, то количества молекул во всех этих образцах были бы одинаковыми. В дальнейшем количество вещества, масса которого численно равна молекулярной массе данного вещества, стали называть *грамм-молекулой* данного вещества. Например, грамм-молекула воды — это количество воды, масса которого равна 18 г. Аналогично определяется понятие *грамм-атома*. Эти понятия оказались очень удобными потому, что если при химических реакциях брать исходные материалы в соответствии с формулой реакции в количествах одной или нескольких грамм-молекул, то все эти вещества прореагируют без остатка и получится одна или несколько грамм-молекул конечного продукта. Так, если в соответствии с написанной выше формулой образования воды взять две грамм-молекулы водорода (4 г) и одну грамм-молекулу кислорода (32 г), то в результате химической реакции между ними образуется две грамм-молекулы воды (36 г). В дальнейшем термин *грамм-молекула* был заменен на практически идентичный с ним термин *моль*. Точное определение этого термина будет дано несколько позже.

Молярный объем. Поскольку, согласно предположению Авогадро, равные объемы газов содержат равное число молекул, массы газов в таких объемах пропорциональны молекулярным массам взятых веществ. А это значит, что можно подобрать такой объем, в котором при нормальных условиях ($p = 1$ атм, $T = 0^\circ \text{C}$) помещается ровно одна грамм-молекула (т.е. моль) любого газа. Авогадро установил, что этот объем равен 22,4 л. В дальнейшем эту величину стали называть *молярным объемом*.

Теперь молекулярные массы любых газообразных веществ можно было измерять очень просто — для этого достаточно определить массу газа, содержащегося в объеме 22,4 л при нормальных условиях. Например, прямые измерения показали, что масса такого количества газа этана равна 30 г, следовательно, молекулярная масса этана равна 30.

Определение молярных масс твердых веществ и состава химических соединений. Изучение химических реакций с участием этана показывает, что он состоит из одной весовой части водорода и четырех частей углерода. Но во сколько раз атом углерода тяжелее атома

водорода, пока неизвестно, поэтому ни о молекулярной массе углерода, ни о химическом составе этана пока сказать ничего нельзя. В дальнейшем было открыто очень много различных соединений углерода с водородом (это так называемые углеводороды — метан, пропан, бутан, ацетилен и многие другие). И вот их анализ показал, что во всех этих соединениях на 12 весовых частей углерода всегда приходится одна или несколько (2, 3, 4,...) весовых частей водорода, но не меньше, чем 1! Отсюда следовал естественный вывод о том, что атомная масса углерода равна 12. Это позволяло определить химический состав всех перечисленных выше соединений. Так, например, в этане соотношение масс углерода и водорода равно 4 : 1, и поскольку определенная выше методом Авогадро молекулярная масса этана оказалась равной 30, то, следовательно, в состав его молекулы входят 6 атомов водорода и 2 атома углерода ($6 \cdot 1 + 2 \cdot 12 = 30$), что можно выразить формулой C_2H_6 .

Для определения атомных масс твердых тел можно воспользоваться также законом Дюлонга и Пти (1819), согласно которому теплоемкость одного грамм-атома любого вещества составляет 6 калорий на градус. В лабораторных условиях измерения теплоемкости любого вещества можно очень просто определить с помощью калориметра, и разделив полученный результат на 6, вы сразу узнаете, сколько грамм-атомов взятого вами вещества содержит ваш образец.

Валентность. Как показывают приведенные выше примеры, атомы разных элементов могут соединяться друг с другом в различных количественных соотношениях, образуя тем самым различные количества межатомных связей. Для того, чтобы количественно описать возможности каждого элемента к установлению таких связей, было введено особое понятие — *валентность*. Самым простым атомом является атом водорода — во всех соединениях он связывается не более, чем с одним каким-нибудь другим атомом. В то же время, атомы других элементов могут связываться с несколькими атомами: например, в молекуле воды один атом кислорода связывается с двумя атомами водорода. Поэтому в простейших случаях валентность n может быть определена, как число атомов водорода, с которыми может соединиться атом данного элемента. Так, например, валентность кислорода в воде H_2O $n = 2$, а валентность углерода в метане CH_4 $n = 4$. Отметим, что в различных химических соединениях один и тот же элемент может прояв-

лять различную валентность. Так валентность-железа в различных соединениях может изменяться от 2 до 6.

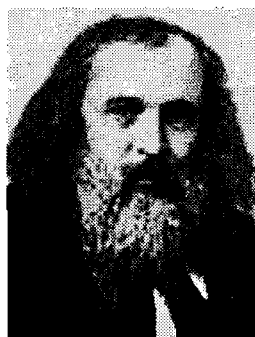
Понятие валентности позволяет связать между собой понятия грамм-атома и грамм-эквивалента: легко сообразить, что грамм-эквивалент равен грамм-атому, деленному на валентность.

Гипотеза Праута. Первые измерения атомных и молекулярных масс были не очень точными и приводили, как правило, к целочисленным результатам. Так, как отмечалось выше, атомная масса водорода была принята равной 1, атомная масса углерода — 12, атомная масса кислорода — 16 и т. д. Это позволило английскому врачу Прауту высказать гипотезу о том, что атомы всех химических элементов образованы из атомов водорода, являющегося «первичной материей» (1815–1816). Теорию Праута можно рассматривать как продолжение попыток древнегреческих философов отыскать некую первоматерию, из которой состоит весь мир. Однако повышение точности измерений показало, что хотя атомные массы и выражаются числами, очень близкими к целым числам, но все же наблюдаются и весьма существенные различия. Так, например, если атомную массу водорода принять точно равной единице, то получится, что атомная масса углерода равна 11,92, кислорода — 15,87, хлора — 35,18 и т. д. Поэтому гипотеза Праута была вскоре отвергнута, однако в истории науки она сыграла определенную роль, так как она была первой гипотезой, допускавшей сложное строение атомов и пытавшейся объяснить их состав.

Атомная единица массы. Для выражения атомных и молекулярных масс следовало выбрать подходящую единицу. Из сказанного следует, что массу атома водорода принять в качестве такой единицы было бы не очень удобно, поскольку значения атомных масс существенно отличались бы от целых чисел, причем эти отличия быстро бы увеличивались с ростом массы атомов. Для того, чтобы атомные массы были бы как можно ближе к целым числам, было решено сравнивать массы атомов и молекул не с массой атома водорода, а с очень близкой к ней особой величиной. В качестве таковой Берцелиус предложил взять $1/16$ долю массы атома кислорода, т. е. считать, что атомная масса кислорода равна точно 16. Атомная масса водорода при такой единице равняется 1,008, т. е. примерно на 1 % больше единицы. В качестве основы шкалы атомных масс Берцелиус выбрал кислород (а не водород) потому, что

для кислорода было известно гораздо больше соединений с другими элементами, что позволяло легче сравнивать их атомные массы. В дальнейшем выяснилось еще одно преимущество кислородной шкалы — выраженные в ее единицах атомные массы были гораздо ближе к целым числам, чем в том случае, если в качестве единицы принять атомную массу водорода. Таким образом, гипотеза Праута возродилась как бы в новом свете, хотя точные значения атомных масс все же не были целыми числами. Кислородная шкала масс продержалась до 1961 г., когда она была заменена углеродной шкалой, в которой за единицу принимают $1/12$ долю массы атома основного изотопа углерода¹⁾. Эту величину и стали называть *атомной единицей массы*. В настоящее время все атомные и молекулярные массы выражаются в этих единицах, которые сокращенно стали обозначать а. е. м. Следует особо подчеркнуть, что во времена Берцелиуса атомная единица массы была условной величиной, с помощью которой выражалась лишь *отношение* массы любого атома к массе атома кислорода (точнее — к $1/16$ доле этой массы), а каково было абсолютное значение этой единицы (т. е. ее выражение в граммах или килограммах), в то время еще не знали.

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева. К 1870 г. атомные массы большинства известных в то время элементов были определены довольно точно. Это позволило русскому химику Д. И. Менделееву в 1869 г. установить одну очень важную закономерность: если расположить элементы в порядке возрастания их атомных масс, то их химические свойства будут периодически повторяться. Заслуга Д. И. Менделеева особенно велика потому, что в его эпоху еще не все элементы были открыты, а атомные массы некоторых элементов были измерены с недостаточной точностью. Кроме того, длина периодов оказалась разной: если в первом периоде имеется всего два элемента (водород и гелий), два следующих периода состоят из 8 элементов каждый, в 4-м и 5-м периодах содержится по 18 элементов, в 6-м добавляется



Дмитрий Иванович
Менделеев

¹⁾ Об изотопах речь пойдет в следующей главе.

Периодическая

1 H 1,00794 водород								
3 Li 6,941 литий	4 Be 9,012182 бериллий							
11 Na 22,98977 натрий	12 Mg 24,3050 магний							
19 K 39,0983 калий	20 Ca 40,078 кальций	21 Sc 44,95591 скандий	22 Ti 47,867 титан	23 V 50,9415 ванадий	24 Cr 51,9961 хром	25 Mn 54,938046 марганец	26 Fe 55,845 железо	27 Co 58,933 кобальт
37 Rb 85,4678 рубидий	38 Sr 87,62 стронций	39 Y 88,90585 иттрий	40 Zr 91,224 цирконий	41 Nb 92,90638 ниобий	42 Mo 95,94 молибден	43 Tc (97) технеций	44 Ru 101,07 рутений	45 Rh 102,905 родий
55 Cs 132,90545 цезий	56 Ba 138,327 барий	57 La 138,9055 лантан	72 Hf 178,46 гафний	73 Ta 180,9479 тантал	74 W 183,84 вольфрам	75 Re 186,207 рений	76 Os 190,23 осмий	77 Ir 192,22 иридий
87 Fr (223) франций	88 Ra (226) радий	89 Ac (227) актиний	104 Rf (263) резерфордий	105 Db (262) дубний	106 Sg (266) сигборгий	107 Bh (267) борий	108 Hs (277) хассий	109 Mt (268) майтнерий

Лантаниды

58 Ce 140,116 церий	59 Pr 140,90765 празеодим	60 Nd 144,24 неодим	61 Pm (145) прометий	62 Sm 150,36 самарий	63 Eu 151,96 европий	64 Gd 157,25 гадолиний
---------------------------	---------------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------------

Актиниды

90 Th (232) торий	91 Pa (231) протактиний	92 U (238) уран	93 Np (237) нептуний	94 Pu (244) плутоний	95 Am (243) америй	96 Cm (247) кюрий
-------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------------------------	----------------------------	--------------------------	-------------------------

Упрощенная таблица периодической системы элементов Д. И. Менделеева приводится в современном виде, соответствующим форме, утвержденной Международным союзом чистой и прикладной химии (IUPAC) в 1989 г. В каждой клетке таблицы помещены: в первой строке — порядковый номер и символ химического элемента, во второй строке — уточненная атомная масса элемента по данным 1995 и 2000 гг., в третьей строке — русское название элемента. Названия последних

СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

								2 He 4,00260 гелий
			5 B 10,811 бор	6 C 12,011 углерод	7 N 14,00674 азот	8 O 15,9994 кислород	9 F 18,9984 фтор	10 Ne 20,1797 неон
			13 Al 26,981538 алюминий	14 Si 28,0855 кремний	15 P 30,97376 фосфор	16 S 32,066 сера	17 Cl 35,4527 хлор	18 Ar 39,948 аргон
28 Ni 58,6934 никель	29 Cu 63,546 медь	30 Zn 65,39 цинк	31 Ga 69,723 галлий	32 Ge 72,61 германий	33 As 74,92160 мышьяк	34 Se 78,96 селен	35 Br 79,904 бром	36 Kr 83,80 криптон
46 Pd 106,42 палладий	47 Ag 107,8682 серебро	48 Cd 112,411 кадмий	49 In 114,818 индий	50 Sn 118,710 олово	51 Sb 121,760 сурьма	52 Te 127,60 теллур	53 I 126,90447 йод	54 Xe 131,29 ксенон
78 Pt 195,078 платина	79 Au 196,96655 золото	80 Hg 200,59 ртуть	81 Tl 204,3833 таллий	82 Pb 207,2 свинец	83 Bi 208,98038 висмут	84 Po (209) полоний	85 At (210) астат	86 Rn (222) радон
110 — (281) —	111 — (272) —	112 — (285) —	113 — () —	114 — (289) —	115 — () —	116 — (292) —	117 — () —	118 — (294) —

Лантаниды

65 Tb 158,92534 тербий	66 Dy 162,50 диспрозий	67 Ho 164,93032 гольмий	68 Er 167,26 эрбий	69 Tm 168,93421 тулий	70 Yb 173,04 иттербий	71 Lu 174,967 лютеций
------------------------------	------------------------------	-------------------------------	--------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Актиниды

97 Bk (247) берклий	98 Cf (251) калифорний	99 Es (252) эйнштейний	100 Fm (257) фермий	101 Md (258) менделевий	102 No (259) нобелий	103 Lr (262) лоуренсий
---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------

девяти искусственно полученных элементов с порядковыми номерами 101–109 утверждены IUPAC в 1997 г. Названия элементов с порядковыми номерами 110 и далее пока не установлены. Для элементов, не имеющих стабильных изотопов, вместо атомной массы в круглых скобках приводится значение массового числа наиболее долгоживущего изотопа.

еще 14 (лантаниды), а 7-й период оказывается недостроенным — в нем всего 7 элементов. Наконец, были выявлены случаи, когда для правильного чередования химических свойств в некоторых парах элементов их следовало располагать в обратном порядке: легкий после тяжелого (например, аргон и калий, кобальт и никель, теллур и йод). Тем не менее, твердо веря в справедливость открытого им закона, Дмитрий Иванович не только сумел правильно расположить известные ему элементы, но и предсказал существование новых, еще не открытых, элементов и их основные свойства. Эти элементы Менделеев назвал экабор, экаалюминий и экасилиций, добавляя приставку «эка» к названиям аналогичных элементов в предыдущей строке. В дальнейшем эти элементы были действительно открыты. Ими оказались: скандий (1879), галлий (1875) и германий (1886), причем все предсказания Менделеева блестяще подтвердились.

Некоторые итоги. Установив ряд новых законов, в которых фигурировали отношения небольших целых чисел, ученые твердо убедились в существовании атомов. Более того, они научились определять, во сколько раз масса атома или молекулы одного вещества оказывается больше или меньше массы атома или молекулы другого вещества, или, другими словами, научились определять атомные и молекулярные массы. Одновременно были найдены методы определения состава молекул сложных веществ.

В то же время, истинные значения масс, размеров и других индивидуальных характеристик атомов и молекул оставались неизвестными. Это обстоятельство продолжало порождать у многих ученых недоверие ко всей атомарной гипотезе. Так, немецкий физик Э. Мах утверждал, что в существовании атомов и молекул мы не можем быть уверены до тех пор, пока не научимся определять их размеры и другие параметры, а поэтому вся атомарная гипотеза является преждевременной и надуманной. Однако жизнь очень скоро опровергла эти пессимистические взгляды.

От относительных измерений к точным параметрам атома (вторая половина XIX века)

Скорости движения молекул. Еще Ломоносов утверждал, что теплота определяется скоростью движения молекул. Исходя из аналогичной точки зрения, немецкий физик Рудольф Клаузиус в 1857 г. вывел формулу для скорости движения молекул газа u :

$$u = 2,62 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{T}{273M}}. \quad (1)$$

Здесь T — температура газа в градусах Кельвина, M — молекулярная масса газа. Вычисленные по этой формуле средние скорости движения молекул различных газов при температуре 0°C ($T = 273 \text{ K}$) приведены в табл. 2. Для сравнения отметим, что скорость винтовочной пули в момент вылета из ствола равна примерно 650 м/с. Столь большие скорости движения молекул были довольно неожиданными. Было непонятно, почему при столь больших скоростях молекулы газа относительно медленно диффундируют, и почему тепло в газе распространяется тоже не очень быстро.



Рудольф Клаузиус

Длина свободного пробега молекул. Однако через год Клаузиус пришел к выводу о том, что при диффузии и теплопроводности важна не столько скорость, сколько длина свободного пробега молекулы между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами. Путь молекулы является ломаной линией, плоское изображение которой схематически показано на рис. 2. Но поскольку все направления

Таблица 2

Средние скорости движения молекул газов

Газ	A	u, м/с
H ₂	2	1850
N ₂	28	495
O ₂	32	465

движения равновероятны, молекулы, как правило, не уходят далеко от точки, в которой они уже однажды побывали. Отсюда ясно, почему процессы диффузии и теплопроводности протекают относительно медленно: расстояние l , на которое удаляется молекула (длина отрезка АВ), в среднем пропорционально квадратному корню из времени ее движения: $l \sim \sqrt{t}$.

Примерно в то же время английский физик Максвелл занимался изучением внутреннего трения в газах: так называется явление, приводящее к увлечению движущимся слоем газа соседних слоев. В 1860 г. он опубликовал доклад «Пояснения к динамической теории газов», в котором, в частности, вывел формулу для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho l u. \quad (2)$$

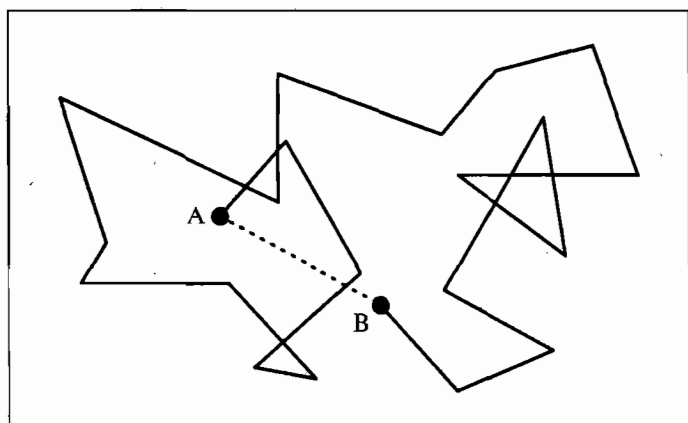
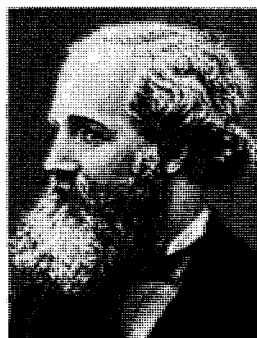


Рис. 2. Путь молекулы в газе или жидкости при тепловом движении. Отрезок АВ — расстояние, на которое удалилась молекула от начальной точки своего движения

В эту формулу, кроме известных величин — плотности газа ρ и средней скорости молекул u , входит средняя длина пробега молекул между двумя столкновениями l . Измерив опытным путем коэффициент внутреннего трения и воспользовавшись уже известными значениями средних скоростей, Максвелл вычислил по своей формуле средние длины пробегов молекул различных газов. Эти пробеги оказались очень маленькими: например, для углекислого газа при нормальных условиях длина свободного пробега получилась равной $5,5 \cdot 10^{-6}$ см.



Джеймс Клерк
Максвелл

Затем Максвелл установил связь между длиной свободного пробега, числом молекул в единице объема n и диаметром молекулы d :

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}. \quad (3)$$

В формулу (3) входят две неизвестные величины n и d , и поэтому для их определения нужна была дополнительная информация.

Первые сведения о размерах и количествах молекул. В 1865 г. Лошмидт, основываясь на широко известном факте практической несжимаемости жидкостей, высказал предположение о том, что жидкости не сжимаются при увеличении давления потому, что их молекулы плотно прижаты друг к другу. Но при этом число молекул в единице объема жидкости $n_{\text{ж}}$ должно очень просто выражаться через диаметр молекулы d :

$$n_{\text{ж}} = \frac{1}{d^3}, \quad (4)$$

так как вдоль ребра кубика объемом в 1 см^3 при самой плотной упаковке может расположиться $1/d$ молекул. Далее, вполне очевидно, что плотность любого вещества равна числу молекул в единице объема, умноженному на массу одной молекулы. Это справедливо, в частности, для любого вещества (например воды), находящегося как в газообразном (водяной пар, $\rho = nm$), так и в жидком состояниях ($\rho_{\text{ж}} = n_{\text{ж}}m$). Объединяя два последних соотношения

с формулой (4), легко получить:

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{ж}}} = nd^3. \quad (5)$$

Так было получено второе уравнение, в которое входят те же две неизвестные величины d и n . Если теперь перемножить уравнения (3) и (5), то легко получить выражение для диаметра молекулы:

$$d = \sqrt{2\pi} \frac{\rho}{\rho_{\text{ж}}} l, \quad (6)$$

а подставив это выражение в формулу (3), путем несложных преобразований легко найти и количество молекул в 1 см^3 газа:

$$n = \frac{\rho_{\text{ж}}^2}{2\sqrt{2}\pi^3 l^3 \rho^2}. \quad (7)$$

Здесь следует обратить внимание на то, что для определения средней скорости движения молекул газа оказалось достаточным с помощью обычного термометра измерить температуру газа T , а затем *вычислить* скорость молекул u по формуле Клаузиуса (1), полученной путем *теоретических* рассуждений. Далее, измерив коэффициент внутреннего трения газа (что тоже можно сделать с помощью обычных лабораторных приборов, хотя это и гораздо сложнее, чем измерение температуры) и уже зная скорость молекул, можно по полученной опять-таки *теоретически* формуле (2) рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул l , и затем по формулам (6) и (7) вычислить диаметр молекул d и количество молекул в одном кубическом сантиметре газа n . Таким образом, путем измерения обычных «макроскопических» величин — температуры газа T , коэффициента внутреннего трения η , плотностей вещества в газообразном и жидком состояниях и с помощью теоретических представлений о происходящих явлениях удалось впервые подойти к определению величин, относящихся к отдельным молекулам — их скорости u , длине свободного пробега l , диаметру d и числу молекул в единице объема n .

Проведя расчеты по формулам (6) и (7), Лошмидт получил следующие результаты: диаметр молекулы — порядка 10^{-8} см, число молекул в 1 см^3 газа при нормальных условиях — около 10^{18} см^{-3} . Так после долгого извилистого пути человек *впервые* узнал, каковы размеры молекул, с какими скоростями они движутся и сколько

их содержится в макроскопических объектах. Поскольку Лошмидт первым определил число молекул идеального газа в одном кубическом сантиметре при нормальных условиях, то это число было названо его именем. По современным данным для практических расчетов число Лошмидта $N_L = 2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Теперь предстояло проверить и уточнить полученные результаты.

Опыты Перрена. Примерно через 40 лет после Лошмидта французский физик Перрен провел серию экспериментов для определения числа молекул в моле. Идея первого опыта Перрена тесно связана с ответом на вопрос: почему молекулы газов, входящих в состав земной атмосферы, не падают на Землю под действием силы тяжести? Ведь сам факт существования земной атмосферы говорит о том, что молекулы газов, как и любые другие тела, испытывают притяжение к Земле. В противном случае ничто не мешало бы им улететь в мировое пространство, и никакой атмосферы у Земли не было бы. Но хотя молекулы газов и притягиваются к Земле, они на нее не падают.



Жан Перрен

Разобраться в этом вопросе довольно легко: молекулам мешает упасть на Землю их собственное движение! Под действием силы тяжести молекулы, конечно, стремятся к Земле. Однако, чем больше их скапливается у земной поверхности, тем чаще они сталкиваются друг с другом и тем большая их часть отбрасывается при таких столкновениях вверх. Поэтому атмосферные газы и не могут осесть на Землю. Однако плотность земной атмосферы у поверхности Земли все же выше, чем вдали от нее. Опыт показывает, что при подъеме на каждые 5 км плотность кислорода в атмосфере уменьшается примерно в два раза. Более детальный анализ говорит о том, что чем тяжелее молекулы, тем меньше их средняя скорость и тем сильнее они притягиваются к Земле. Точнее говоря, толщина слоя, в пределах которого плотность молекул уменьшается в два раза, обратно пропорциональна массе молекул. Поэтому, если бы земная атмосфера состояла из водорода, масса молекул которого, как мы видели, примерно в 16 раз меньше массы молекул кислорода, то плотность

атмосферы уменьшалась бы в два раза при подъеме не на 5 км, а на $5 \cdot 16 = 80$ км.

Последней закономерностью и решил воспользоваться Перрен. Он поставил перед собой задачу создать модель атмосферы из частиц настолько больших, чтобы их можно было видеть хотя бы под микроскопом, и в то же время настолько маленьких, чтобы движение молекул не давало им оседать на дно сосуда. В качестве таких частиц Перрен использовал мельчайшие шарики из особой смолы — гуммигута. Приготовленные им шарики были настолько малы, что в сосуде с водой они оседали на дно целый год! При этом оказалось, что столь маленькие шарики никогда полностью на дно не оседают, образуя тонкий слой мути (толщиной около 0,1 мм), причем концентрация шариков в этой мути при подъеме на равные высоты уменьшалась в равное число раз (как плотность молекул кислорода в атмосфере). С помощью микроскопа Перрен измерил радиус своих шариков, который оказался в среднем равным $2,1 \cdot 10^{-5}$ см. Теперь нетрудно было найти объем шариков, а по известной плотности гуммигута — и их массу. С учетом выталкивающей силы воды каждый шарик притягивался к Земле с силой $7,7 \cdot 10^{-17}$ Н. Далее необходимо было найти высоту, на которой концентрация шариков уменьшалась бы в два раза. Это тоже делалось с помощью микроскопа. Данная часть работы была наиболее трудной, так как под ударами молекул шарики непрерывно метались из стороны в сторону, и считать их было нелегко. Все же Перрену удалось определить, что концентрация шариков убывала вдвое при подъеме на высоту $h = 3 \cdot 10^{-3}$ см. Теперь, обозначив неизвестную массу молекулы кислорода m_0 , а высоту, на которой плотность кислорода убывает вдвое, h_0 ($h_0 = 5$ км $= 5 \cdot 10^5$ см), можно составить пропорцию: $m_0/m = h/h_0$, в которой $m = 7,8 \cdot 10^{-15}$ г — масса шарика, который притягивался бы в воздухе к Земле с той же силой $7,8 \cdot 10^{-15}$ г, с которой притягивались шарики из гуммигута в воде. Из этой пропорции легко найти массу молекулы кислорода, которая оказалась равной $4,7 \cdot 10^{-23}$ г. Так впервые была определена еще одна количественная характеристика молекулы — ее масса. Отметим, что в очень кропотливом и точном опыте Перрен измерял непосредственно хотя и весьма маленькие, но все же видимые (пусть через микроскоп) величины: радиусы шариков гуммигута и толщину слоя половинного уменьшения плотности шариков в воде, а затем, с помощью логических рассуждений и расчетов,

получил уже совсем маленькую и недоступную непосредственному измерению величину — массу одной молекулы кислорода. Далее, разделив молярную массу кислорода (32 г) на массу одной молекулы, Перрен получил число молекул в моле: $N \approx 6,8 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Целью второго опыта Перрена было изучение явления, которое в первом опыте доставило ему много хлопот — движение гуммигутовых шариков. Такое же движение мелких частиц в жидкостях обнаружил еще в 1828 г. английский ботаник Броун. Рядом контрольных опытов Броун доказал, что это движение обусловлено не первоначальным движением жидкости при приготовлении смеси и не случайными толчками подставки от шагов проходящих людей, а какими-то внутренними причинами. Но какими именно причинами — Броун так и не смог догадаться.

Теорию броуновского движения создали в начале уже следующего XX в. А. Эйнштейн и М. Смолуховский. Любое тело в жидкости (а также в газе) испытывает на себе удары молекул. При больших размерах тела по нему одновременно с каждой стороны ударяет в среднем одинаковое число молекул, поэтому оно остается в покое. Но чем меньше тело, тем меньше молекул по нему ударяет и, следовательно, тем больше будут отклонения числа ударов с каждой стороны от средних значений, силы воздействия на тело с разных сторон оказываются не скомпенсированными, и тело (шарик) приходит в хаотическое движение. Видимый под микроскопом путь шарика изобразится ломаной линией, очень похожей на путь молекулы в газе (рис. 2). Из теории Эйнштейна следует, что радиус шарика r и его среднее смещение от начальной точки за t с l связаны с числом молекул в моле соотношением:

$$N = 2,58 \cdot 10^{11} r t^2. \quad (8)$$

Проведя серию кропотливых измерений, Перрен установил, что среднее смещение l шарика радиусом $r = 2,1 \cdot 10^{-5}$ см за одну секунду составило $1,38 \cdot 10^{-4}$ см. Отсюда по формуле Эйнштейна получается, что $N \approx 6,4 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Таким образом, и во втором опыте Перрена получилось почти такое же значение для N , как и в первом опыте.

Число Авогадро. Вспомним, что именно Авогадро первым предположил, что грамм-молекулы всех веществ содержат одинаковое количество молекул. В опытах Перрена это число молекул в одной

грамм-молекуле (моле) было найдено и получило название *числа Авогадро* N_A . Это число широко используется при различных расчетах в атомной и ядерной физике, поэтому оно неоднократно уточнялось в различных экспериментах. Современное значение числа Авогадро $N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Законы Фарадея. В 1833 г. английский физик Майкл Фарадей установил два закона, из которых следовало, что для выделения путем электролиза одного грамм-эквивалента любого вещества из раствора требуется пропустить через электролитическую ванну всегда одно и то же количество электрических зарядов — около 96 500 Кл (кулонов). Эту величину стали называть *постоянной Фарадея* и обозначать

$$F = 96\,500 \text{ Кл/моль.}$$

«Атом» электричества. Напомним, что грамм-эквивалентом называется грамм-атом, деленный на валентность. Следовательно, в случае одновалентных элементов (например, водорода), у которых грамм-эквивалент и грамм-атом численно совпадают, заряд 96 500 Кл переносят $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов, т. е. на один атом приходится заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Далее было установлено, что и во всех других случаях на долю одного атома всегда приходится заряд либо равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, либо равный целому числу таких зарядов. Данное обстоятельство наводило на мысль, не является ли этот заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, который стали называть «элементарным зарядом», мельчайшим неде-



Майкл Фарадей

лимым «атомом» электричества? Впервые вывод из законов Фарадея о дискретности электрических зарядов был сделан Гельмгольцем в 1881 г. Дальнейшие исследования подтвердили правильность этого утверждения. А пока отметим еще один вывод из законов Фарадея. Разделив число Фарадея на массу одного грамм-атома, мы получим так называемое отношение заряда к массе, которое равно отношению заряда одного атома к его массе. Для водорода это отношение равно 96 500 Кл/г. Данный результат нам скоро пригодится.

Катодные лучи. В 1859 г. Юлиус Плюккер обнаружил, что в стеклянной разрядной трубке, из которой выкачан почти весь воздух,

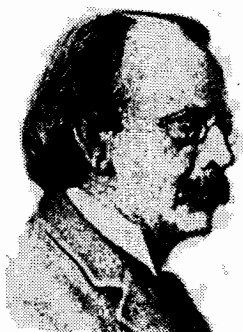
при подаче на ее электроды высокого напряжения, напротив отрицательного электрода (катода) возникает слабое зеленоватое свечение. Если между катодом и светящейся областью помещали какие-нибудь предметы, то часть свечения исчезала, т. е. от внесенных предметов как бы появлялась тень. Поэтому можно было предположить, что открытое Плюккером свечение вызывается потоком идущих с катода каких-то лучей. Эти лучи так и были названы *катодными*.

Через 20 лет, в 1879 г., Вильям Крукс установил, что катодные лучи представляют собой поток отдельных частиц. Эти частицы несли на себе электрические заряды, поскольку магнитное поле отклоняло их в сторону, словно проводник с током. Нетрудно было установить и знак заряда: раз частицы летели от катода, значит они были заряжены отрицательными зарядами; этот вывод подтверждался и направлением отклонения катодных лучей в магнитном поле. Оставалось определить природу этих частиц.

Наиболее естественным было предположение о том, что катодные лучи — это поток атомов, оторвавшихся либо от катода, либо от газов, оставшихся в разрядной трубке после ее откачки. Проверить истинность этого предположения можно было путем измерения отношения заряда к массе для частиц катодных лучей. При этом переносимый заряд можно было определить по силе и времени протекания электрического тока. А вот с определением массы частиц возникли трудности, так как в том месте, где катодные лучи падали на стенку разрядной трубки, не было заметно накопления какого-либо вещества, поэтому измерить непосредственно переносимую катодными лучами массу было невозможно.

Открытие электрона. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон, В. Вин и некоторые другие исследователи провели серию экспериментов по изучению отклонения катодных лучей в электрическом и магнитном полях. Идея этих экспериментов заключалась в следующем. Проходя как через электрическое поле в зазоре между пластинами конденсатора, так и через магнитное поле в зазоре между полюсами магнита, заряженные частицы отклоняются от первоначального пути. Углы, на которые отклоняются частицы, в обоих случаях зависят как от параметров прибора (размеров, напряженности полей и др.), которые всегда известны, так и от скорости частиц и отношения заряда к массе. Поскольку скорости частиц неизвестны, то по их отклонению в одном каком-нибудь поле

о второй неизвестной величине — отношению заряда к массе — ничего определенного сказать нельзя. Однако, как оказалось, углы отклонения частиц в магнитном (H) и электрическом (E) полях по-разному зависят от скорости частиц v , а именно: в магнитном поле H угол отклонения



Джозеф Томсон

$$\alpha_H = \frac{eHl}{mcv}, \quad (9)$$

а в электрическом поле E

$$\alpha_E = \frac{eEl}{mv^2}. \quad (10)$$

(в этих равенствах l — длина участка, на котором действуют приложенные поля, c — скорость света). Возведя равенство (9) в квадрат и разделив его на равенство (10), легко получить:

$$\frac{e}{m} = \frac{\alpha_H^2}{\alpha_E} \cdot \frac{Ec^2}{H^2l}. \quad (11)$$

Измерив непосредственно на опыте углы отклонения катодных лучей в электрическом и магнитном полях и зная значения всех остальных величин, стоящих в правой части равенства (7), Томсон вычислил значение отношения заряда к массе для частиц катодных лучей. Результат получился совершенно неожиданным: это отношение оказалось равным $1,77 \cdot 10^8$ Кл/г, т. е. почти в 2 000 раз больше, чем для атомов водорода (см. выше). Это означало, что либо масса частиц катодных лучей была сравнима с массой атомов водорода, а их заряд в 2 000 раз больше элементарного заряда, получавшегося из опытов Фарадея, либо их заряд равен или близок к элементарному заряду, а масса в 2 000 раз меньше массы самого легкого атома — атома водорода. И хотя в те времена никто не знал частиц легче атома водорода, предпочтение было сразу отдано второму предположению. В самом деле, трудно было понять, почему частицы катодных лучей могут нести только по 2 000 элементарных зарядов и никак не меньше. Поэтому Томсон сделал вывод о том, что катодные лучи — это поток каких-то новых очень легких частиц с зарядом равным или очень близким к элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Эти новые частицы были названы *электронами*.

Теперь надо было доказать правильность сделанного предположения и точно измерить заряд и массу электрона. Но удалось это сделать лишь много лет спустя уже в начале XX в.

Опыты Милликена. В 1913 г. американский физик Роберт Милликен непосредственно измерил заряд электрона. Для этой работы он изготовил специальный прибор, основной частью которого был плоский воздушный конденсатор с зазором между пластинами d около 1,5 см. В этот зазор с помощью пульверизатора впрыскивались мельчайшие капельки масла, которые под действием силы тяжести медленно оседали вниз. Если же на какую-то капельку попадал один или несколько электронов, то на нее начинала действовать направленная вверх сила электростатического взаимодействия заряда капельки q с электрическим полем конденсатора. Изменяя разность потенциалов U между пластинами конденсатора, можно было остановить падение капли; при этом ее вес P оказывался точно равным силе электростатического взаимодействия заряда капли с полем конденсатора:

$$P = qE = q \frac{U}{d}, \quad (12)$$

откуда

$$q = \frac{Pd}{U}. \quad (13)$$

Как видно, идея опыта была очень проста. Однако при его осуществлении Милликену пришлось решить ряд очень серьезных задач. Прежде всего, необходимо было очень точно изготовить основную часть прибора — конденсатор. Поскольку заряд электрона очень мал, масса капелек тоже должна была быть очень маленькой. Размеры капелек масла в опытах Милликена были столь малы, что даже через микроскоп при боковом освещении они были видны лишь в виде сверкающих точек на темном фоне. Вес таких капелек можно было определить через их объем и удельный вес масла, а невидимый даже в микроскоп диаметр капелек определялся по скорости их оседания в воздухе с помощью известной уже тогда формулы Стокса. Наконец, чтобы исключить влияние



Роберт Милликен

тепловых токов воздуха в камере, весь прибор помещался в большой термостат.

Измеряя заряды многих капелек, Милликен убедился в том, что все они были кратны одному и тому же заряду $1,59 \cdot 10^{-19}$ Кл, который был очень близок к величине элементарного заряда, полученного из результатов опытов Фарадея. Идя в обратном направлении, т. е. разделив переносимый одним грамм-эквивалентом вещества найденный Фарадеем заряд 96 500 Кл на найденный заряд электрона, Милликен получил одно из наиболее точных значений числа Авогадро: $N_A = 6,06 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

Массы атомов и электронов. На основании определенных выше величин массу атома любого элемента можно легко найти, разделив массу грамм-атома на число атомов в нем, т. е. на число Авогадро. Таким образом, масса атома водорода

$$m_H = \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г},$$

масса атома хлора

$$m_{Cl} = \frac{35,5}{6,02 \cdot 10^{23}} = 5,85 \cdot 10^{-23} \text{ г},$$

и т. д. Аналогичным образом можно определить и массу любой молекулы по известной величине грамм-молекулы.

Массу электрона также можно было легко вычислить по измеренному Томсоном отношению заряда к массе частиц катодных лучей и по определенному из опытов Фарадея и Милликена заряду электрона:

$$m_e = \frac{e}{e/m} = 9 \cdot 10^{-28} \text{ г}. \quad (14)$$

Определение размеров атомов и молекул. Как уже отмечалось, одна из первых оценок размеров атомов была сделана Лошмидтом, согласно которой диаметр атома равен примерно 10^{-8} см.

Казалось бы, зная число Авогадро, размер атома найти легко. В самом деле, разделив грамм-атом любого вещества на удельную массу, мы получим занимаемый грамм-атомом объем. Далее, деление этого объема на число Авогадро даст объем ячейки пространства, приходящийся на один атом. И, наконец, представляя атом в виде шарика радиусом r и считая, что атомы в веществе плотно прижаты друг к другу, мы можем приравнять полученный

объем ячейки к величине $(2r)^3$ и отсюда найти r . Например, для меди таким способом получается $r = 1,15 \cdot 10^{-8}$ см, т.е. примерно такая же величина, как при оценке Лошмидта. Однако на самом деле все обстоит далеко не так просто хотя бы уже потому, что заранее неизвестно, как расположены атомы в веществе и какие зазоры существуют между ними. Поэтому было необходимо найти другие способы определения размеров атомов и молекул.

Один из таких способов основан на изучении отклонений от уравнения Клапейрона (1834):

$$\frac{pv}{T} = R, \quad (15)$$

в котором v — объем, занимаемый одной грамм-молекулой идеального газа при давлении p и абсолютной температуре T (в градусах Кельвина), а R — так называемая *универсальная газовая постоянная*, равная $0,082 \frac{\text{л} \cdot \text{ат}}{\text{град}}$. Согласно этой формуле, занимаемый газом объем при постоянной температуре обратно пропорционален давлению. Отметим, что такая закономерность может соблюдаться лишь в том случае, когда можно пренебречь размерами молекул, считая их точками, что более или менее выполняется при низких давлениях, когда средние расстояния между молекулами много больше их размеров. В противном случае, когда межмолекулярные расстояния оказываются сравнимыми с размерами молекул, увеличение давления будет относительно слабо изменять объем газа, так как даже при бесконечно большом давлении объем не может стать меньше суммарного объема всех молекул. С учетом этого обстоятельства нидерландский физик Ван-дер-Ваальс в 1873 г. подправил уравнение Клапейрона и получил новое, названное его именем:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (16)$$

Величины констант a и b подбирают эмпирически с таким расчетом, чтобы уравнение Ван-дер-Ваальса как можно лучше описывало экспериментально наблюдаемую зависимость давления реального газа от объема. При этом оказалось, что поправочная константа b равна суммарному объему всех молекул, умноженному на 4. Поэтому найдя эту константу эмпирически и разделив ее на 4, мы получим суммарный объем всех молекул газа, содержащихся в одной грамм-молекуле, и разделив эту величину на число Авогадро, мы найдем объем одной молекулы.

Таблица 3

Размеры молекул некоторых газов

Вещество	Радиус молекулы $\times 10^8$ см	
	по уравнению Ван-дер-Ваальса	по коэффициенту внутреннего трения
водород	1,25	1,09
азот	1,42	1,55
хлор	1,65	1,85

Другой метод оценки размеров молекул основан на более точном измерении коэффициентов внутреннего трения газов с последующим расчетом по формулам Максвелла (2) и (3) с использованием уточненного значения числа Лошмидта.

Третий метод определения размеров атомов, или, точнее, меж-атомных расстояний в кристаллах, основан на изучении дифракции рентгеновских лучей, о чем будет рассказано в следующей главе.

В табл. 3 приведены результаты измерений размеров молекул некоторых газов, проведенных первыми двумя методами. Как видно, результаты различных измерений хотя и отличаются друг от друга, но эти отличия незначительны. Это дает уверенность в том, что, по крайней мере приблизительно, размеры молекул можно считать известными.

Интересно отметить, что размеры молекул различных газов, сильно различающихся по молекулярным массам ($M(\text{H}_2) \approx 2$, $M(\text{Cl}_2) \approx 70$), оказались весьма близкими друг к другу. Примерно такие же размеры (от $0,6 \cdot 10^{-8}$ до $2,6 \cdot 10^{-8}$ см) имеют и атомы всех элементов. Поэтому в первом приближении можно считать, что все атомы и значительная часть молекул в природе имеют форму шариков с диаметрами порядка 10^{-8} см (кроме очень крупных молекул некоторых органических соединений типа белков).

В дальнейшем оказалось, что атомы и молекулы вообще имеют не четкие, а весьма расплывчатые границы, так что их размер является величиной неопределенной. Поэтому нет ничего удивительного в том, что различные методы определения этих размеров приводили к различным результатам, но по порядку величины эти размеры известны достаточно хорошо.

Скорости движения атомов и молекул. Как уже отмечалось, Клаузиус в 1857 г. вычислил скорость движения молекул некоторых газов. Два года спустя Максвелл в упомянутом выше докладе теоретически показал, что молекулы газа движутся с разными скоростями, и вывел формулу распределения молекул по скоростям, носящую его имя:

$$f(v) = 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left\{ -\frac{mv^2}{2kT} \right\}, \quad (17)$$

в которой m — масса молекулы, v — ее скорость, T — температура газа, k — постоянная Больцмана. При этом оказалось, что полученные Клаузиусом скорости являются средними скоростями движения молекул. Несмотря на то, что расчеты Клаузиуса и Максвелла выглядели весьма достоверными, их результаты необходимо было проверить на опыте, но это удалось сделать лишь много лет спустя.

Опыт Штерна. В 1920 г. немецкий физик Отто Штерн осуществил эксперимент, схема которого представлена на рис. 3. В центре вращающегося диска помещалась тонкая серебряная нить 1, нагреваемая электрическим током. Серебро постепенно испарялось, и его атомы летели через щели в концентрических экранах к холодному внешнему ободу и оседали на нем, образуя четко видимую полоску 2. Чтобы ничто не мешало атомам серебра в их полете к ободу, из всего прибора выкачивался воздух. Совершенно очевидно, что атомы серебра могли лететь только по прямым линиям, поэтому при неподвижном диске полоска осевшего серебра 2 находилась на ободу точно против щелей в диафрагмах. Если же диск вместе с диафрагмами и ободом начинал вращаться, то за время полета атомов от диафрагмы до обода последний успевал сместиться, в результате чего атомы серебра попадали в другое место, образуя новую полоску 3. Зная скорость вращения диска, расстояние от диафрагмы до обода и измерив расстояние, на которое сместилась полоска, Штерн нашел скорость полета атомов серебра равной 560 м/с. По расчету при условиях эксперимента средняя скорость полета



Отто Штерн

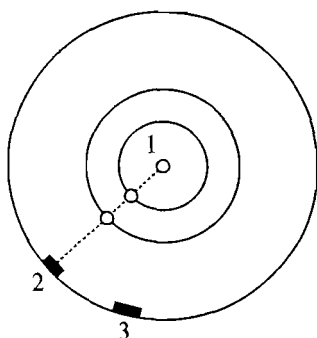


Рис. 3. Схема опыта Отто Штерна

атомов серебра должна была быть около 580 м/с. Такое согласие экспериментальных и расчетных данных можно было признать вполне удовлетворительным. Следует отметить, что смещенная полоска оказывалась слегка размытой, что подтвердило утверждение Максвелла о том, что испаряющиеся атомы серебра могут двигаться с разными скоростями.

И расчеты, и опыты показывали, что в одних и тех же условиях различные атомы и молекулы движутся с разными скоростями — легкие быстрее, тяжелые медленнее. В то же время, средняя энергия частиц ε при тепловом движении почти не зависит от их природы и определяется только температурой среды:

$$\varepsilon = \frac{3}{2}kT, \quad (18)$$

в которой k — так называемая постоянная Больцмана, равная по современным данным $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹.

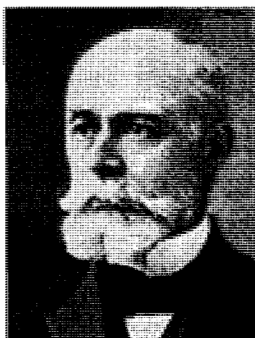
Некоторые итоги. Итак, к концу XIX в. физики и химики совместными усилиями научились измерять все основные параметры атомов и молекул — их размеры, массы, скорости движения, количества атомов или молекул в макроскопических телах, состав молекул сложных химических соединений из атомов различных элементов и многое другое (в следующем XX в. лишь уточнялись значения отдельных величин). Тем самым окончательно была доказана атомарная гипотеза строения материи. Одновременно был открыт электрон, и тем самым установлено, что природа электричества тоже имеет дискретный характер. Таким образом, гениальные догадки древних атомистов получили строгое экспериментальное подтверждение.

В то же время о внутреннем строении самих атомов ничего не было известно. Даже выдающиеся ученые по-прежнему представляли себе атомы в виде сплошных неделимых бесструктурных шариков и не верили в возможность познания их внутреннего строения. В Энциклопедическом словаре Ф. Павленкова, изданном

в 1899 г., написано буквально следующее: «Атом — мельчайшая частица материи (вещества), неделимая никакими искусственными и естественными средствами, конечный элемент материи. Мнения о свойствах атомов разнообразны и противоречивы». А вот что написано в «Большой энциклопедии», изданной уже в начале XX в.: «Атомизм — господствующее в современной физике и химии воззрение на строение тел, по которому тело состоит из отдельных неразрушимых, неделимых частичек вещества, которые обладают постоянными неизменными свойствами, и лишь благодаря своим колебаниям и движениям воспроизводят все явления воспринимаемого нами вещественного мира». Эти высказывания лишний раз подтверждают то, что на рубеже XIX и XX вв. о внутреннем строении атомов ничего не было известно.

От внешних параметров атома к его строению (начало XX века)

Открытие радиоактивности. Ядерная физика зародилась в самом конце XX в., когда французский физик Анри Беккерель в 1896 г. открыл новое явление, названное впоследствии *радиоактивностью*.



Анри Беккерель



Вильгельм Рентген

В предшествовавшем 1895 г. немецкий физик Рентген, проводя эксперименты с электрическими разрядами в вакууме, обнаружил, что в месте попадания быстрых электронов на стекло разрядной трубки, кроме наблюдавшегося еще Плюккером в 1859 г. слабого зеленоватого свечения, возникает какое-то невидимое излучение, способное проникать через толстые слои различных веществ и вызывать засвечивание фотопластинки. Это проникающее излучение сам Рентген назвал «икс-лучами», а впоследствии оно было названо *рентгеновским излучением*. Примерно в то же время Анри Беккерель занимался изучением флюоресценции — слабого свечения некоторых материалов, возникающего при облучении их каким-нибудь сильным источником света. Узнав об открытии Рентгена, Беккерель решил проверить, не возникает ли рентгеновское излучение и при флюоресценции, которая очень напоминала зеленоватое свечение стекла в разрядной трубке. С этой целью Беккерель взял одно из наиболее сильно флюоресцирующих веществ — соль урана, положил ее на завернутую в черную бумагу фотопластинку и выставил все это под

солнечные лучи. Под действием солнечного излучения соль урана сильно флюоресцировала. Поэтому, проявив через некоторое время фотопластинку и обнаружив на ней в том месте, где лежала соль урана, темное пятно, Беккерель решил, что первоначальное предположение было правильным, т. е. что рентгеновское излучение возникает одновременно с флюоресценцией. Подготовив один из следующих опытов, Беккерель положил завернутую в черную бумагу фотопластинку вместе с солью урана в шкаф. День был пасмурным, проводить опыт было бессмысленно, и пластинка осталась лежать в шкафу. Через несколько дней пластинку на всякий случай проявили. И каково же было изумление Беккереля, когда на этой пластинке оказалось черное пятно! Ведь это означало, что соль урана сама, без всякой флюоресценции, испускает какое-то излучение, похожее по своим свойствам на рентгеновское. Впоследствии Беккерель провел контрольный эксперимент, заменив соль урана металлическим ураном. Появление пятна на фотопластинке и в этом случае явно говорило о том, что излучение идет из самого урана, и флюоресценция соли здесь не причем.

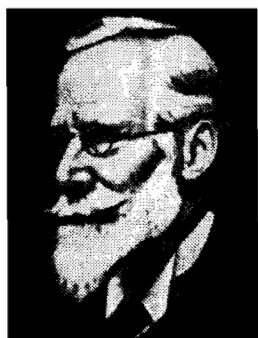
Из этого открытия следовали далеко идущие выводы. Раз из атомов урана что-то вылетает, значит неизбежно изменяются сами атомы, а раз так — значит атомы обладают какой-то внутренней структурой и от них могут откалываться какие-то кусочки.

Забегая вперед, отметим, что обнаруженное Беккерелем новое явление было впоследствии по предложению Марии Кюри названо *радиоактивностью*, а возникающее при этом излучение — *радиоактивным излучением*.

Стоит обратить внимание на то, что радиоактивность была открыта случайно. *Случайно* Беккерель выбрал для своих опытов из большого числа флюоресцирующих веществ соль именно урана. *Случайно* из-за плохой погоды одна из приготовленных для опытов пластинок осталась необлученной. *Случайно* эту пластинку проявили, хотя и не должны были это делать. Так в результате *случайно* совпавших *случайных* событий было сделано величайшее открытие современности, последствия которого существенно изменили условия жизни всего человечества. Конечно, по всей видимости, рано или поздно радиоактивность все равно была бы обнаружена, но все же этот пример заставляет задуматься о роли случая в развитии науки. Тем более что, как мы увидим в дальнейшем, многие другие крупные открытия тоже были сделаны случайно. С другой

стороны, не случайным является тот факт, что такие открытия делались не случайными людьми, а крупными учеными, которые всей своей предыдущей деятельностью были подготовлены к тому, чтобы, обнаружив неожиданное явление, не пройти мимо и дать ему должную оценку. Поэтому случайность сделанных открытий не умаляет, а лишь подчеркивает гениальность их авторов.

Первые приборы для регистрации радиоактивных излучений. Впервые радиоактивное излучение было зарегистрировано, как отмечалось выше, с помощью фотопластины. Этот способ регист-



Уильям Крукс

страции частиц иногда применяется и поныне, в частности, при дозиметрических измерениях. Однако очень скоро выяснилось, что радиоактивное излучение может не только засвечивать фотоэмульсию, но и оказывать другие виды воздействия на вещество. Так, например, при попадании α -частиц (см. ниже) в некоторые вещества возникают вспышки света, правда, очень слабые, но все же видимые невооруженным глазом в полной темноте. Для наблюдения таких вспышек, или, как их обычно называют, сцинтилляций, Уильям Крукс изобрел простенький

приборчик — *спинтарископ*. Он состоял из короткой трубки, на дно которой наносился слой сернистого цинка. С другого конца трубка закрывалась линзой, а в середину трубки на иголочке вносился α -активный препарат. При попадании α -частиц в слой сернистого цинка, в последнем возникали сцинтилляции, которые наблюдались через линзу. В течение ряда лет такие приборчики широко использовались при различных исследованиях.

Первые исследования радиоактивного излучения. Довольно быстро было обнаружено, что проходя через магнитное поле, радиоактивное излучение разделяется на три части: одна часть излучения отклоняется в одну сторону, другая часть — в другую, а третья часть, не отклоняясь, идет прямо. Эти три части радиоактивного излучения обозначили первыми тремя буквами греческого алфавита: α , β , γ . По направлению отклонения в магнитном поле Резерфорд в 1899 г. установил, что α -частицы несут на себе положительные заряды, β -частицы — отрицательные. А в 1900 г. Вийяр установил,

что третий вид излучения, названный γ -излучением, не отклоняется в магнитном поле и является электрически нейтральным. К тому же была обнаружена высокая проникающая способность этого излучения: для уменьшения его интенсивности наполовину требовалась пластинка свинца толщиной около 1,25 см. Это намного превышало проникающую способность рентгеновских лучей, хотя в остальном у этих двух видов излучения было много общего. С помощью γ -лучей также можно было просвечивать закрытые предметы и получать фотографические изображения того, что находилось внутри.

Далее, по отношению заряда к массе (как определяется эта величина — см. выше) было установлено, что β -частицы тождественны ранее открытым электронам. В то же время, отношение заряда к массе у α -частиц оказалось в несколько тысяч раз меньше, чем у электронов, и даже в два раза меньше, чем у атомов водорода. Данное обстоятельство натолкнуло автора проведенных измерений Резерфорда и его сотрудника Содди на мысль о том, что α -частицы являются дважды ионизованными атомами гелия. В дальнейшем это предположение было подтверждено Резерфордом непосредственно: в запаянном стеклянном сосуде, содержащем α -активный препарат, с помощью спектрального анализа он обнаружил появление гелия. Аналогичные опыты проводили в 1903 г. Рамзай и Содди. Что касается γ -излучения, то было установлено, что оно представляет собой поток фотонов, аналогичных фотонам обычного видимого света, но отличающихся от последних гораздо более короткими длинами волн, которые у γ -излучения в тысячи и даже в миллионы раз меньше, чем у фотонов видимого света.

Открытие новых элементов. Вскоре после открытия Беккереля к исследованию нового явления подключились французский физик Пьер Кюри и его молодая жена-полька Мария Склодовская-Кюри,



Эрнест Резерфорд



Фредерик Содди



Пьер Кюри

которая была не только физиком, но и химиком. Это было очень удачное сочетание, так как благодаря совместному использованию физических и химических методов исследований супругам Кюри удалось в 1898 г. открыть в урановой руде несколько новых элементов, которым они дали названия полоний, радий и радон. К открытию новых радиоактивных элементов супругов Кюри подтолкнуло то, что радиоактивность урановой руды — так называемой «урановой смолки» — была намного больше активности чистого урана. Следовательно, урановая руда

содержала еще какие-то радиоактивные элементы, которые и были впоследствии выделены. Все эти элементы обладали очень высокой радиоактивностью, в тысячи и миллионы раз превышавшие радиоактивность урана. Но содержание их в урановой руде было чрезвычайно мало — например, на 1 т урана приходилось около 0,3 г радия! Поэтому в чистом виде металлический радий Марии Кюри удалось выделить лишь в 1910 г., за что она получила вторую Нобелевскую премию (правда, на сей раз по химии) — небывалый случай в истории этих высших наград за научные достижения!

Весьма важным фактом, установленным Марией Кюри, была независимость радиоактивного распада от внешних условий. Ни вхождение радиоактивных атомов в состав различных химических соединений, ни воздействие на образцы очень высоких или очень низких температур, ни высокие давления или глубокий вакуум не изменяли скорости радиоактивного распада.

Мария
Склодовская-Кюри

Еще об одном открытии сообщил в начале 1900 г. Резерфорд. Вместе со своим помощником Р. Б. Оуэнсом он обнаружил, что соединения тория испускают какой-то радиоактивный пар, который легко уносится потоком воздуха и способен проникать через пористые вещества, но полностью задерживается воздухо непроницаемыми преградами. Этот «пар», а точнее — газ, был назван эманией тория. В результате проведенных ис-

следований было установлено, что радиоактивность эманации тория уменьшается в два раза в течение одной минуты, но на стенках сосуда, в котором она побывала, появляются новые радиоактивные вещества, которые стали называть активным осадком. Немного позже супруги Кюри обнаружили выделение аналогичной эманации радием, а затем — и актинием, но во времени эти три вида эманации вели себя по-разному. Поэтому можно было заключить, что были найдены три новых радиоактивных вещества, находящихся в газообразном состоянии. По своим химическим свойствам они были идентичны ранее известным инертным газам, таким как аргон. В дальнейшем оказалось, что все три вида эманаций являются различными изотопами одного химического элемента — радона, хотя первое время их называли разными именами и обозначали разными символами, в зависимости от того, от какого элемента они получались: торон ($\text{Tn} \equiv {}^{220}\text{Rn}$), радон ($\text{Rn} \equiv {}^{222}\text{Rn}$) и актинон ($\text{An} \equiv {}^{219}\text{Rn}$) соответственно.

Открытие нескольких радиоактивных элементов показало, что радиоактивность не является исключительным свойством одного урана, а является довольно распространенным явлением. Более того, оказалось, что все элементы тяжелее свинца радиоактивны, в том числе и давно известный элемент торий, который ранее широко использовался в виде окиси для изготовления калильных колпачков для газовых осветительных ламп. Да и уран тоже использовался в быту для окрашивания бутылочного стекла в темный цвет и для приготовления усилителей негативов в фотографии. Так что оказалось, что люди, сами того не зная, на протяжении уже многих лет имели дело с радиоактивными веществами (впервые уран был выделен в виде окиси UO_2 Клапротом в 1789 г., который назвал его в честь открытой в 1781 г. планеты Уран, а торий был открыт в 1828 г. Берцелиусом в минерале торите).

Другим проявлением воздействия радиоактивного излучения на вещество было обнаружение его ионизирующей способности: в 1897 г. Резерфорд обнаружил, что при поднесении к заряженному электроскопу препарата радия, электроскоп быстро разряжается. В 1897–1899 гг. Резерфорд и Томсон разработали теорию этого явления, заметив его сходство с процессом электролиза в жидкостях, который исследовал еще Фарадей. Различие между этими процессами заключалось лишь в том, что в газах ионы возникали только под действием радиоактивного излучения, тогда как в жидкостях

ионы содержатся, так сказать, в готовом виде. Благодаря ионизации газы под воздействием излучения становятся проводниками электрического тока. Однако ток в газах не подчиняется закону Ома: сначала при увеличении напряжения между электродами ток нарастает, так как увеличение электрического поля ускоряет процесс растаскивания ионов, что препятствует их рекомбинации. Когда же разность потенциалов достигает определенной величины, рекомбинация ионов прекращается практически совсем, и сила тока перестает изменяться при увеличении напряжения — такой ток называют током насыщения. Его величина зависит только от интенсивности радиоактивного излучения: чем она больше, тем больше ионов ежесекундно возникает в газе и тем больше, соответственно, величина тока насыщения. Это явление используется для измерения интенсивности излучения в специальных приборах — ионизационных камерах.

Основной закон радиоактивного распада. Интересно было выяснить, как радиоактивный распад происходит во времени. Наблюдения показали, что количества урана, радия и тория практически не изменяются со временем. В то же время было установлено, что радиоактивный газ радон исчезает в результате распада в течение нескольких дней. Так что же, распад радия и его дочернего продукта радона происходит по разным законам? Такое предположение выглядело крайне маловероятным. И в самом деле, в 1899 г. Эльстер и Гейтель установили, что количество атомов любого радиоактивного вещества уменьшается во времени по одному и тому же экспоненциальному закону, а именно: если в начале опыта в образце содержалось N_0 атомов, то по прошествии времени t в нем останется $N(t)$ атомов, причем:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (19)$$

В этой формуле, которая выражает собой *основной закон радиоактивного распада*, величина λ называется *константой распада*. Можно показать, что константу распада следует рассматривать в качестве вероятности распада одного ядра в секунду. В дальнейшем для большей наглядности ввели другую величину — *период полураспада* T . Период полураспада — это время, в течение которого количество атомов радиоактивного вещества в результате распада уменьшается в два раза. Величины T и λ тесно связаны

между собой:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (20)$$

Каждое радиоактивное вещество характеризуется своими значениями константы распада и периода полураспада. При этом, чем больше значение λ , тем меньше период полураспада и тем быстрее происходит распад. Период полураспада урана 4,5 млрд лет, поэтому в течение любых реальных промежутков времени заметить изменение его количества совершенно невозможно, тогда как период полураспада радона 3,8 суток, и он исчезает буквально на глазах.

Превращения элементов при радиоактивном распаде. Было установлено, что в запаянной ампуле с радием, кроме гелия, появляется еще одно вещество — радиоактивный газ радон. Если *радон* отделяли от радия, то он довольно быстро исчезал, а вместо него в сосуде появлялись новые радиоактивные элементы — полоний, актиний и другие. Значит, радиоактивность связана с превращением атомов одних элементов в атомы других элементов. Этот процесс называли *радиоактивным распадом* атомов. Вот тебе и «неделимый»!

Немного позже, в 1911 г., Фаянс и Содди независимо друг от друга установили, какие именно превращения элементов происходят при радиоактивном распаде. В результате их исследований было сформулировано так называемое *правило сдвига Фаянса и Содди*, которое гласит: *при испускании α -частицы атом исходного элемента превращается в атом другого элемента, расположенного в таблице элементов Менделеева на две клеточки левее исходного, а при испускании β -частицы происходит аналогичный сдвиг, но на одну клеточку вправо*. Так, например, атом расположенного в 92-й клетке урана, испустив α -частицу, превращается в атом 90-го элемента — тория, а атом тория, испустив β -частицу, превращается в атом 91-го элемента — протактиния.



Казимир Фаянс

Радиоактивные семейства. Только что рассмотренный пример показывает, что при радиоактивном распаде часто возникает атом,

который тоже оказывается радиоактивным и, следовательно, распадается дальше, превращаясь в атом следующего элемента. В результате возникает довольно длинная цепочка последовательных превращений атомов одних элементов в другие. Такие цепочки Мария Кюри предложила называть *радиоактивными семействами*. По ее же предложению первый член семейства называется *родоначальником семейства*, а при любом акте распада исходный атом называют *материнским*, а тот, который получится, — *дочерним*. Такая «семейная» терминология отражает, возможно, тот факт, что Мария Кюри, как женщина, особо ценила семейные отношения.

Модель атома Томсона. Одним из наиболее важных вопросов, который необходимо было решить, был вопрос о строении атома. Как отмечалось выше, одна из первых попыток решить этот вопрос была предпринята Праутом, но его гипотеза скоро была отвергнута. Установленный теперь факт радиоактивного распада с превращением атомов одних элементов в атомы других элементов с одновременным испусканием различных частиц совершенно определенно говорил о сложной структуре атома. К тому же из атомов при распаде вылетают заряженные частицы; но ведь атом в обычном состоянии электрически нейтрален, значит, в нем есть и другие частицы с противоположным знаком заряда, что опять-таки говорит о сложной структуре атома. Необходимо отметить, что в начале XX в. была известна только одна элементарная частица — электрон. И вот в 1903 г. Джозеф Томсон предложил модель атома, согласно которой атомы — это сферки из положительно заряженной «жидкости», в которой «плавают» отрицательно заряженные электроны. Поскольку масса электрона приблизительно в 1 840 раз меньше атомной единицы массы, то электронов в атоме должно было быть очень много — по 1 840 на каждую единицу массы атома. При этом положительно заряженная «жидкость» считалась практически невесомой и весьма «рыхлой», причем о ее природе ничего определенного не было известно. Эту модель в шутку кто-то назвал «пудингом с изюмом». Гипотеза Томсона объясняла многие известные в то время факты: появление свободных электронов при нагреве металлов, возникновение катодных лучей и некоторые факты, связанные с радиоактивным распадом: вылет капельки положительно заряженной жидкости в виде α -частицы при α -распаде и вылет электрона при β -распаде. Поэтому в течение некоторого времени модель Томсона имела много сторонников.

Выделение энергии при радиоактивном распаде. В 1903 г. Пьер Кюри и Лаборд заметили, что соединения радия всегда немного теплее окружающей среды. Поместив некоторое количество одного из таких соединений в калориметр, они установили, что один грамм радия выделяет около 140 кал/ч (калорий в час). Таким образом, менее чем за 2 суток 1 г радия выделяет больше энергии, чем выделяется при сгорании или взрыве такого же количества обычных химических веществ. Но распад радия продолжается тысячи лет, следовательно, общие запасы энергии в его атомах в миллионы раз превышают энергию, выделяющуюся при обычных химических реакциях! Это было первое указание на существование атомной энергии и на ее количества, хотя о ее природе тогда совершенно ничего не было известно.

Определив с помощью спинтарископа количество распадов атомов радия во взятом образце за секунду, они путем несложных расчетов определили, что при одном распаде ядра радия выделяется энергия в количестве около $2,6 \cdot 10^{-13}$ калорий.

Здесь нам придется напомнить читателю, что в атомной и ядерной физике энергию принято выражать в специальных единицах — электронвольтах (эВ). 1 эВ — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 В. Эта единица может быть выражена через другие единицы энергии:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \text{ и т. д.}$$

В процессе горения обычного топлива в расчете на одну реакцию выделяется энергия порядка 2–4 эВ. Примерно такие же энергии имеют кванты видимого света. Средняя энергия теплового движения молекул при нормальных условиях оказывается и вовсе маленькой — около 0,03 эВ. А вот если выразить в этих единицах определенную выше энергию, выделяющуюся при распаде одного атома радия, то получится громадная величина — 6 800 000 эВ, или 6,8 МэВ (мегаэлектронвольт). В дальнейшем были разработаны другие способы измерения выделяющейся при радиоактивном распаде энергии, но все они приводили примерно к одинаковым результатам.

Возникает естественный вопрос: откуда берется эта энергия? Ведь радиоактивный распад происходит «сам по себе», без какого бы то ни было внешнего воздействия. Более того, никакими внешними факторами — высокой или низкой температурой, давлением, химическими реакциями и пр. — не удается повлиять

на скорость распада атомов и на величину выделяющейся энергии. Создавалось впечатление, будто бы в недрах вещества, содержащего радиоактивные атомы, на протяжении многих миллионов лет энергия рождалась «из ничего». Многие ученые уже начали сомневаться в непогрешимости закона сохранения энергии. Но закон сохранения энергии был и в данном случае справедлив, как всегда, а объяснение выделения огромных количеств энергии при радиоактивном распаде было найдено много лет спустя, когда накопился достаточный экспериментальный и теоретический материал.

Открытие космических лучей. Начало XX в. принесло новое открытие. В 1900 г. Вильсон заметил, что в ионизационных камерах, при отсутствии каких бы то ни было источников излучения, возникает очень слабый электрический ток. Первоначально происхождение этого тока пытались объяснить радиоактивным излучением, идущим из недр Земли. Однако, даже экранированием ионизационных камер толстыми слоями свинца, полностью устранить этот ток не удавалось. Уже тогда Вильсон высказал предположение о внезем-



Виктор Франц Гесс

ном происхождении источника этого таинственного тока. Первое экспериментальное подтверждение такого предположения было получено в 1905 г., когда Гоккель поднялся с электроскопом на воздушном шаре на высоту 5 км и обнаружил, что слабая ионизация атмосферы не уменьшается с высотой (как должно было бы быть, если бы ионизация вызывалась бы излучением, идущим от Земли), а увеличивается.

В 1911–1912 гг. австрийский физик Гесс с сотрудниками провели серию экспериментов по подъему ионизационных камер на воздушных шарах. Было обнаружено, что сначала с увеличением высоты сила тока в камерах уменьшалась, что, казалось бы, подтверждало гипотезу об излучении Земли, но при дальнейшем подъеме сила тока начинала быстро возрастать. Этот факт явно указывал на внеземное происхождение излучения, вызывающего появление тока в ионизационных камерах. В дальнейшем это излучение было названо *космическим излучением*, и за его открытие Гесс в 1936 г. был удостоен Нобелевской премии. Однако природу космических лучей и их происхождение еще предстояло выяснить.

Характеристическое рентгеновское излучение. Первоначально считалось, что рентгеновское излучение обладает гладким непрерывным спектром. Однако тщательные исследования, проведенные Ч. Дж. Баркла в Ливерпульском университете в 1906 г., показали, что в тех случаях, когда жестким рентгеновским излучением облучают какие-нибудь элементы, то в них возникает вторичное рентгеновское излучение со спектром, состоящим из отдельных дискретных линий, похожих на линии оптических спектров, только с гораздо меньшей длиной волны ($2\text{--}3\text{ \AA}$, $1\text{ \AA} = 10^{-8}\text{ см}$). При этом оказалось, что каждый элемент характеризуется своими вполне определенными длинами волн этих линий, независимых от энергии первичного рентгеновского излучения, поэтому данное излучение и было названо характеристическим.

Происхождение характеристического излучения объясняется следующим образом. Обладающий достаточно высокой энергией фотон первичного рентгеновского излучения, попадая в атом, может выбить электрон с одной из его внутренних орбит (об электронных орбитах см. с. 65 и далее). На образовавшееся пустое место «соскакивает» электрон с одной из внешних орбит, что, естественно, сопровождается испусканием вторичного фотона. Но так как внутренние оболочки расположены очень близко к ядру, электроны на них притягиваются к ядру гораздо сильнее, чем электроны внешних оболочек. Поэтому переход электрона с внешней оболочки на внутреннюю сопровождается гораздо большим выделением энергии, чем любой переход в пределах внешних оболочек. А поэтому и длина волны излучения в данном случае оказывается всего лишь порядка $2\text{--}3\text{ \AA}$, а не $4\,000\text{--}6\,000\text{ \AA}$, как в области видимого спектра. Фотоны от таких переходов образуют характеристическое рентгеновское излучение.

Изучая характеристическое излучение, Баркла заметил, что оно состоит из нескольких линий, которые можно разбить на серии. Эти серии стали обозначать буквами латинского алфавита: К, L, M, N и т. д. Такими же буквами обозначают и различные оболочки электронов по мере удаления их от ядра. В дальнейшем выяснилось, что все линии К-серии соответствуют переходам с различных оболочек на К-оболочку. Аналогично образуются и другие серии характеристического излучения. Внутри каждой серии отдельные линии обозначаются буквами греческого алфавита в порядке удаления оболочки, с которой произошел переход, от ядра. Например, линия,

соответствующая переходу электрона с L-оболочки на K-оболочку, обозначается K_α , с M-оболочки на K-оболочку — K_β , и т. д.

Обнаружение биологического воздействия излучения. В том, что радиоактивное излучение может вызывать поражение живых тканей, Пьер Кюри и Анри Беккерель убедились на собственном опыте, получив ожоги от ампул с радиоактивными препаратами, которые они носили в карманах.

Открытие атомного ядра. В 1904 г. японский ученый Нагаока предложил модель атома, согласно которой в центре располагался положительный заряд, уравнивающий отрицательные заряды окружающих его электронов. Однако из-за отсутствия экспериментальных подтверждений этой гипотезы и ее явного противоречия классической электродинамике, в рамках которой такая система не может быть стабильной, гипотезу Нагаоки никто не принял всерьез.

В 1906 г. Резерфорд заметил, что при прохождении α -частиц через слои воздуха, пучки частиц несколько расходились. Это явление естественно было объяснить рассеянием α -частиц при столкновениях с молекулами газов, входящих в состав воздуха.



Ханс Гейгер

Работая под руководством Резерфорда, два его сотрудника Гейгер и Марсен в 1908 г. провели серию опытов по изучению рассеяния α -частиц не только воздухом, но и очень тонкими фольгами различных металлов. Для регистрации α -частиц использовались приборы, аналогичные спинтарископам Крукса. В результате этих опытов было установлено, что подавляющая часть α -частиц при рассеянии отклоняется незначительно, но отдельные частицы изменяли направление движения на угол 90° и даже больше, т. е. практически отскакивали назад. Причем

количество сильно отклоняющихся частиц было тем больше, чем больше был порядковый номер элемента, из которого была сделана фольга. В частности, при рассеянии на платине примерно одна частица из 8 000 отклонялась на углы больше 90° .

Результаты опытов Гейгера и Марсдена невозможно было объяснить с помощью модели атома Томсона. Ведь по этой модели атом

в целом электрически нейтрален, поэтому на расстоянии подействовать на α -частицу он не может. Да и внутри атомное вещество по Томсону в среднем нейтрально, а столкновения α -частицы с отдельными электронами (если α -частица смогла бы проникнуть внутрь атома) не могли сильно изменить направление ее полета, так как масса α -частицы в тысячи раз больше массы электрона. Подобно этому случайное столкновение винтовочной пули с комаром не спасет мишень от попадания. Отсюда следовало, что внутри атома должно находиться какое-то тело с большим положительным зарядом и с большой массой, ибо только такое тело могло отбросить α -частицу назад.

Простой расчет показывает, какую величину должен иметь электрический заряд такого тела, и на какое расстояние должна подойти к нему α -частица, чтобы сила электростатического отталкивания смогла отбросить ее назад. Измеренный непосредственно по отклонению в магнитном поле заряд α -частицы оказался равным $2e$ (e — элементарный электрический заряд, см. с. 38). Заряд внутриатомного тела должен быть того же порядка или немного больше, ведь α -частица — это тоже атом, только ионизованный. Примем для оценки, что заряд этого тела равен $10e$. При этих условиях простой расчет показывает, что α -частица с энергией 6 МэВ может подойти к центру заряженного тела на расстояние порядка 10^{-12} см, а, значит, размер области, занятой зарядом, должен быть еще меньше!

Итак, из результатов проведенных под руководством Резерфорда опытов Гейгера и Марсдена можно было сделать два важных вывода:

1. В атоме имеется область с размерами около 10^{-12} см, в которой сосредоточен значительный положительный электрический заряд, т. е. в отличие от модели Томсона, в которой отрицательные электроны впереमेжку «плавали» в положительно заряженной жидкости, теперь предполагалось, что положительный заряд сосредоточен в центре, а его окружает слой электронов,
2. В этой же области сосредоточена и большая часть массы атома, так как в противном случае α -частицы при столкновении с ней не могли бы сильно отклоняться (вспомните пример с пулей и комаром).

В дальнейшем это внутриатомное образование получило название *атомного ядра*. Простейшим атомным ядром является ядро обычного водорода. Впервые такие ядра в свободном состоянии наблюдал в 1914 г. Марсден, когда они образовывались в виде ядер отдачи при столкновении α -частиц с атомами водорода в наполненной этим газом камере. Тогда же они и получили название протонов. В дальнейшем такие упругие столкновения α -частиц с протонами всесторонне изучал Блэккетт с помощью камер Вильсона.



Чарлз Томсон Рис
Вильсон

Интересно более наглядно сравнить размеры атома и атомного ядра. Диаметр атома, как отмечалось выше, порядка 10^{-8} см. Диаметр ядра порядка 10^{-12} см. Чтобы сделать соотношение этих размеров более наглядным, давайте построим воображаемую модель атома, увеличив все его размеры в 10^{11} раз. Тогда сам атом превратится в шар диаметром 10 м (т. е. примерно с высоту трехэтажного дома), а размер ядра станет равным 1 мм, т. е. примерно с булавочную головку. Вот таковы соотношения размеров атома и атомного ядра. И в этой «булавочной головке» сосредоточены почти вся масса атома, большой электрический заряд и громадные запасы энергии. Остальной объем атома — это почти пустота. А вот чем заполнена эта «пустота», еще предстояло выяснить.

Измерение зарядов атомных ядер. Для того чтобы уточнить размеры атомных ядер и определить их заряды, Резерфорд со своими сотрудниками продолжили серию опытов по рассеянию α -частиц тонкими фольгами различных материалов. При этом считалось, что рассеяние происходит в результате взаимодействия электрических зарядов α -частицы и ядра по закону Кулона, и так как эти заряды одноименные (положительные), то такое взаимодействие носит характер отталкивания, в результате чего траектория движения α -частицы искривляется, и она отлетает от ядра, отклонившись от первоначального направления на некоторый угол θ . При этом чем ближе пролетает частица к ядру, тем сильнее она от ядра отталкивается и тем больше окажется угол, на который частица отклонится от направления своего первоначального движения. Но *вероятность* того, что α -частица пролетит вблизи малю-

сенького ядра, оказывается гораздо меньше вероятности пролететь на большом расстоянии от него. Поэтому становятся понятными результаты первых опытов по рассеянию α -частиц, при которых большинство частиц отклонялось незначительно, и лишь немногие частицы отклонялись на большие углы.

Исходя из закона Кулона, Резерфорд вывел формулу, которая позволяла вычислить число частиц N , рассеиваемых ядрами на угол θ (в расчете на единицу телесного угла) из общего числа частиц N_0 , упавших на столь тонкую фольгу, что можно было считать, что каждая частица сталкивается не более, чем с одним ядром:

$$N = N_0 n s \left(\frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}. \quad (21)$$

В этой формуле n — число атомов в 1 см^3 того материала, из которого изготовлена фольга, s — толщина фольги, Z — заряд ядра в единицах элементарного заряда, m и v — масса и скорость α -частицы. Все эти величины можно было считать известными, кроме Z (скорость α -частицы можно легко найти, зная ее энергию). Поэтому, измерив число частиц, рассеявшихся под разными углами, и сравнив результаты с расчетом по формуле (21), можно было определить значение Z .

Результаты этих исследований показали, что заряды ядер атомов различных элементов оказываются разными, причем, как заметил Ван ден Брук, значение Z численно совпадает с порядковым номером элемента в таблице Менделеева. Как известно, Менделеев расположил элементы в своей таблице в порядке возрастания их атомных масс. Вывод Ван ден Брука означал, что по мере увеличения массы атома увеличивается и величина заряда его ядра. В области легких ядер даже наблюдалась пропорциональность между этими величинами. При переходе к средним и тяжелым ядрам эта пропорциональность несколько нарушалась, но общая тенденция увеличения Z вместе с массой атома сохранялась. Более того, еще сам Менделеев заметил, что для соблюдения определенной закономерности изменения химических свойств элементов, в ряде случаев пришлось допустить отступление от требования монотонного увеличения атомных масс (обратите внимание на приведенные в таблице Менделеева атомные массы следующих трех пар элементов: Ar—K, Co—Ni, Te—I). В то же время, правило Ван ден Брука

не знает исключений. Таким образом, Резерфорд и Ван ден Брук немного уточнили периодический закон Менделеева, который следует формулировать так: *химические свойства элементов находятся в периодической зависимости от зарядов их ядер.*

Точные измерения размеров ядер. Первые опыты Гейгера и Марсдена позволили оценить порядок размеров той области, в которой находится атомное ядро. Но продолжение этих опытов дало возможность получить и более точные сведения о размерах атомных ядер.

Измеряя количества α -частиц, рассеянных на разные углы, Резерфорд, Гейгер и Марсден установили, что на ядрах тяжелых элементов рассеяние происходит точно в соответствии с формулой Резерфорда, т. е. количество рассеянных частиц уменьшается обратно пропорционально величине $\sin^4(\theta/2)$. В случае же легких элементов при малых углах число рассеянных частиц тоже следовало этой закономерности, однако, начиная с некоторого угла $\theta_{\text{крит}}$, эта закономерность резко нарушалась. Такое рассеяние частиц, не подчиняющееся формуле Резерфорда, стали называть *аномальным рассеянием*. В отличие от этого, рассеяние, происходящее точно по формуле Резерфорда, и, следовательно, происходящее только под действием сил электростатического взаимодействия по закону Кулона, называют *нормальным рассеянием*.

При выводе формулы Резерфорда предполагалось, что α -частица и ядро взаимодействуют друг с другом по закону Кулона как точечные заряды. Отступление от формулы Резерфорда говорило о вступлении в игру каких-то новых сил. Естественно было предположить, что α -частицы и ядра — это не точки, а тела (шарики), имеющие определенные размеры, и что аномальное рассеяние происходит тогда, когда эти тела соприкасаются друг с другом. Вот тут-то и вступают в игру какие-то новые силы, которые на первых порах можно было считать силами трения, упругости или сцепления.

Как уже отмечалось, при нормальном рассеянии чем ближе подлетает частица к ядру, тем на больший угол она отклоняется. Математический расчет показывает, что минимальное расстояние между центрами α -частицы и ядра в момент их наибольшего сближения при таком рассеянии связано с углом рассеяния соотношением:

$$d = \frac{2Ze^2}{mv^2} \left(1 + \operatorname{cosec} \frac{\theta}{2} \right). \quad (22)$$

Если подставить в эту формулу определенное на опыте критическое значение угла $\theta_{\text{крит}}$, при котором начинается аномальное рассеяние, то вычисленное расстояние d_0 даст нам расстояние между центрами α -частицы и ядра в момент касания, которое равно сумме радиусов α -частицы и ядра. Радиус самих α -частиц можно определить при изучении их рассеяния на ядрах гелия, так как в этом случае $d_0 = 2r_\alpha$. Вычитая полученный таким образом радиус α -частиц из найденных для других элементов значений d_0 , легко найти радиусы этих ядер.

Понятно, что так можно определить только радиусы ядер легких элементов, для которых наблюдается «аномальное» рассеяние α -частиц. Ядра более тяжелых элементов имеют настолько большие заряды, что энергии α -частиц не хватает на преодоление электростатического отталкивания, поэтому соприкосновения α -частиц и ядер не происходит, и, следовательно, размер ядра никак не проявляется — рассеяние всегда оказывается «нормальным». И только через много лет, когда с помощью ускорителей физики научились получать α -частицы с гораздо большими энергиями, удалось таким способом измерить радиусы ядер всех элементов, вплоть до самых тяжелых.

Модель атома Резерфорда. Существование атомного ядра не укладывалось в картину атома, нарисованную Томсоном. Необходима была другая модель, которая бы учитывала вновь открытые факты. И такая модель была предложена в 1911 г. все тем же Резерфордом.

При создании этой модели было необходимо найти ответы на следующие вопросы:

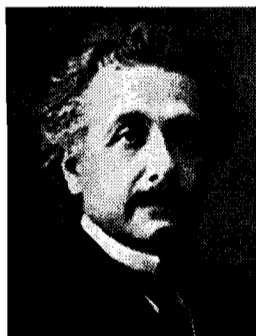
1. Почему при большом электрическом заряде атомного ядра атом в целом оказывается электрически нейтральным?
2. Ядро занимает примерно лишь $1/1\,000\,000\,000\,000$ долю объема атома, а размер атома в различных явлениях проявляется таким, каким он был определен еще в XIX в., т. е. порядка 10^{-8} см; так чем же заполнен основной объем атома?

Отвечая на эти вопросы, Резерфорд предположил, что атом устроен примерно так же, как Солнечная система. В центре атома находится положительно заряженное тяжелое атомное ядро, вокруг которого, как планеты вокруг Солнца, по определенным орбитам вращаются легкие электроны. Они-то и заполняют все пространство внутри атома. Принципиальное отличие атома от Солнечной

системы состоит в том, что Солнце удерживает планеты силами гравитации, тогда как в атоме между ядром и электронами действуют электростатические силы притяжения разноименных зарядов. Атом в целом электрически нейтрален потому, что число отрицательно заряженных электронов точно равно числу положительных зарядов в его ядре, и эти заряды взаимно компенсируют друг друга. Такая модель атома устраивала и химиков, так как она позволяла понять, как атомы соединяются друг с другом, образуя молекулы сложных соединений, — происходит это путем перестройки и сцепления друг с другом внешних электронных орбит. Важным фактом явилось открытие Резерфордом в 1914 г. протона — положительно заряженной элементарной частицы, которая является ядром легчайшего атома — атома водорода. Так что теперь стали известны две элементарные частицы: электрон и протон.



Макс Планк



Альберт Эйнштейн

Но была здесь и одна трудность принципиального порядка. Дело в том, что движение электрона по круговой орбите происходит с центростремительным ускорением. А как гласят законы классической электродинамики, движущийся с ускорением электрический заряд излучает энергию в виде электромагнитных волн. Поэтому электрон должен довольно быстро (примерно за 10^{-8} с) растратить всю свою энергию и упасть на ядро. Но опыт показывает, что ничего такого практически не происходит — и вещество просто так энергию не излучает, и атомы существуют неограниченно долгое время в неизменном виде миллионы и миллиарды лет. Классическая физика разрешить это противоречие оказалась не в состоянии.

Квантовая механика и теория относительности. Эти две великие теории возникли почти одновременно в начале XX в. и заставили физиков в корне пересмотреть многие взгляды на строение вещества и всей Вселенной в целом. У истоков этих теорий стояли два крупнейших физика нашего времени Макс Планк и Альберт Эйнштейн. В нашу задачу

не входит ни рассмотрение этих теорий по существу, ни изложение истории их развития — об этом написаны другие книги. Но при дальнейшем рассмотрении развития ядерной физики мы будем вынуждены использовать некоторые сведения из этих теорий, так что остается лишь надеяться, что уважаемый читатель знаком хотя бы с их основами.

Развитие модели атома Бором. В 1913 г. датский физик Нильс Бор показал, что модель Резерфорда является не только наглядной картинкой, но и может служить основой для точных количественных расчетов. Для этого в нее надо было ввести некоторые положения квантовой механики. Бор выдвинул два постулата:

1. В атоме существует ряд стационарных состояний, в каждом из которых электрон может находиться в течение некоторого времени с определенной не изменяющейся энергией.
2. Атом может скачком переходить из одного состояния в другое с испусканием или поглощением электромагнитного излучения с частотой ν , удовлетворяющей соотношению:

$$h\nu = E_1 - E_2, \quad (23)$$

где h — одна из основных констант квантовой механики — так называемая *постоянная Планка*. Возникающие при этом сгустки электромагнитных волн, переносящие энергию $\epsilon = h\nu$ и ведущие себя в некоторых случаях подобно частицам, стали называть *фотонами*.

Стационарным состояниям соответствует движение электронов по орбитам, для которых выполняется условие квантования орбит. Это условие заключается в том, что момент количества движения электрона должен быть равен целому числу постоянных Планка, деленному на 2π :

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (24)$$

где m и v — масса и скорость электрона, а n — любое целое число, являющееся номером орбиты. Электрон не может плавно сойти со своей орбиты, так как все соседние близкие орбиты не удовлетворяют



Нильс Бор

условию (24). Поэтому в соответствии с постулатом 1 электрон не может плавно изменить свою энергию, не излучает ее в пространство и может вращаться по своей орбите неограниченно долгое время. Но если на соседней орбите есть свободное место, то электрон может перескочить на него, поглотив или испустив порцию энергии в соответствии с постулатом 2 и формулой (23). Поскольку почти во всех формулах квантовой механики постоянная Планка делится на 2π , то очень скоро ввели другую величину $\hbar = h/2\pi$, которую тоже стали называть постоянной Планка, и с учетом этого условие квантования (24) может быть записано еще проще:

$$mvr = n\hbar, \quad (25)$$

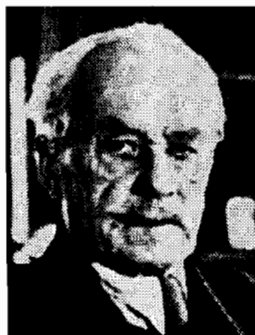
т. е. момент количества движения электрона по орбите должен быть равен целому числу постоянных Планка $\hbar$.

Теория Бора объясняла также происхождение оптических спектров. Если атомам каким-либо образом передать извне избыточную энергию, то часть электронов в них перейдет со своих обычных орбит на более удаленные. В таких случаях говорят, что атом перешел в *возбужденное состояние*. При обратных переходах электронов на свои обычные места эта избыточная энергия выделяется в виде фотонов, причем при каждом переходе энергия фотона получается вполне определенной в соответствии с формулой (23). Стало быть, возбужденные атомы будут испускать группы фотонов с вполне определенными энергиями, а следовательно — и с определенными значениями длин волн. Эти группы фотонов образуют отдельные линии оптического спектра. Количественная теория оптических спектров была развита несколько позже, когда появилось больше сведений о структуре электронных оболочек атома.

Уточнение модели атома Зоммерфельдом. Число n называется главным квантовым числом. Немецкий физик Зоммерфельд в 1916 г. ввел в рассмотрение другие квантовые числа — орбитальное l и магнитное m . Это привело к тому, что одному и тому же главному квантовому числу n стали соответствовать не одна, а несколько орбит с разной степенью вытянутости (в виде эллипсов) и с различной ориентацией в пространстве, которые, таким образом, заполнили все пространство сферического атома. И уж если и проводить аналогию с Солнечной системой, в которой, как известно, орбиты всех планет мало отличаются от круговых

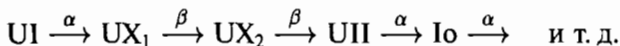
и лежат почти в одной плоскости, то теперь атом правильнее было бы сравнить с Солнечной системой, включив в нее и орбиты комет, которые движутся во всех направлениях и притом по очень вытянутым эллиптическим орбитам.

Все орбиты, относящиеся к одному и тому же главному квантовому числу n , стали называть *электронной оболочкой*. Этот термин оказался более удобным и применяется до сих пор, тогда как об орбитах, по причинам, изложенным ниже, сейчас вспоминают очень редко.



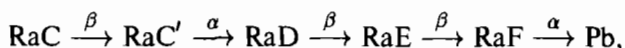
Арнольд
Зоммерфельд

Открытие изотопов. Вскоре после открытия радиоактивности было замечено следующее любопытное явление. Как уже отмечалось ранее, при радиоактивном распаде тяжелых ядер одним актом распада дело, как правило, не заканчивается, а образовавшееся ядро снова распадается с образованием следующего ядра, и т. д., в результате чего образуется радиоактивное семейство. Количество дочерних продуктов получалось при этом столь малым, что выделять их не было никакой возможности. Обнаруживали их только по вылету тех или иных частиц, свойства их на первых порах были неизвестны, поэтому обозначали их условными обозначениями, не связанными ни с какими элементами. Так цепочка распада 92-го элемента — урана — изображалась так:



Но согласно установленному в 1911 г. правилу сдвига Фаянса и Содди (см. с. 55), при испускании α -частицы элемент смещается на две клеточки влево, следовательно, UX_1 — это 90-й элемент, т. е. торий. После его β -распада образуется UX_2 , который должен сместиться на одну клеточку вправо и занять 91-место, а при β -распаде последнего должен опять произойти сдвиг вправо, и, следовательно, UII оказывается 92-м элементом, т. е. опять ураном! Но это будет какой-то другой уран, отличающийся от исходного UI, во-первых, по массе, так как при его образовании из первичного ядра вылетели одна за другой три частицы, а во-вторых, и по периоду полураспада: $T(\text{UI}) = 4,5 \cdot 10^9$ лет, а $T(\text{UII}) = 2,5 \cdot 10^5$ лет. Аналогичные явления наблюдаются и дальше. Читатель сам мо-

жет легко убедиться в том, что элемент, названный первоначально ионием (Io), на самом деле является торием, а рассматривая конец радиоактивного семейства урана:



столь же легко убедиться в том, что RaD — это разновидность свинца, RaC' и RaF — разновидности 84-го элемента — полония, а RaC и RaE — разновидности 83-го элемента — висмута. В дальнейшем оказалось, что по крайней мере все радиоактивные элементы имеют по несколько таких разновидностей. Этот вывод сделал в 1911 г. Содди и он же назвал *изотопами* разновидности одного элемента, различающиеся по массе и по характеристикам распада (тип распада, энергия частиц, период полураспада и др.). Именно по различиям этих свойств изотопы и находили.

После того, как были открыты первые изотопы, была сделана попытка объяснить отклонения атомных масс от целочисленных значений тем, что в природных элементах изотопы с разными массами могут содержаться в произвольных количествах. Тем самым как бы возродилась гипотеза Праута в новой форме.

Первоначально изотопы наблюдались только у тяжелых нестабильных ядер, и поэтому считалось, что это явление связано именно с радиоактивным распадом. Но возникал вопрос: а у стабильных элементов могут быть изотопы? Казалось, что ответить на него нелегко. Ведь изотопы одного элемента имеют одинаковые химические свойства, и методы химии для их обнаружения оказываются совершенно непригодными. Решить эту, казалось бы, совершенно неразрешимую задачу удалось английскому физiku Дж. Дж. Томсону.

Метод парабол Томсона. Если у нерадиоактивных элементов есть изотопы, то их атомы должны различаться по массе. Для того, чтобы обнаружить это различие, Томсон в 1911 г. решил измерить отношение заряда к массе у ионов неона. Для этого он решил воспользоваться тем же методом отклонения пучков заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, которым он воспользовался за несколько лет до этого для измерения отношения заряда к массе электрона. Напомним, что комбинация электрического и магнитного полей позволяет исключить неизвестные скорости частиц и собрать частицы с разными значениями e/m в разных местах пространства.

Установка Томсона состояла, прежде всего, из источника ионов неона. Выходящий из него узкий пучок проходил через зазор между пластинами конденсатора, расположенными в зазоре между полюсами магнита, и попадал на флюоресцирующий экран. Когда поля были выключены, пучок ионов попадал в центр экрана, и на нем возникала светящаяся точка. При включении полей ионы отклоняются от первоначального пути, причем оказывается, что все ионы с одинаковыми значениями e/m , но с разными скоростями, образуют на экране светящуюся ветвь параболы, а ионы с другим значением e/m — другую параболу. Поскольку параметры возникающих парабол зависят только от известных свойств прибора и от отношения e/m , то по форме парабол можно было сразу определить это отношение, и зная заряд иона (он обычно равен одному элементарному заряду e), нетрудно было вычислить и массу иона. В результате проведенного эксперимента на экране были видны две параболы, которым соответствовали два значения атомных масс: 20 и 22. Поскольку никаких других элементов, кроме неона, в приборе не было, оставалось сделать вывод о том, что у неона существуют две разновидности атомов с атомными массами 20 и 22. Так в 1911 г. были открыты первые стабильные изотопы и определены их массы. В настоящее время известно, что у неона есть еще третий стабильный изотоп с массовым числом 21, но содержание его в природном неоне крайне мало, поэтому Томсон его просто не заметил.

Значение опытов Томсона чрезвычайно велико:

1. Разработан новый метод измерения масс атомов, основанный на одновременном использовании электрического и магнитного полей, позволяющий к тому же исключить сильно различающиеся скорости движения ионов.
2. Впервые обнаружены изотопы у стабильного элемента — неона — и измерены их массы.
3. По интенсивности полученных парабол можно было определить относительные количества каждого изотопа в естественной смеси.
4. Впервые фактически было произведено разделение изотопов одного элемента, так как если вместо флюоресцирующего экрана поставить в соответствующие места какие-то сборники ионов, то в один сборник будут попадать ионы одного изотопа, а в другой сборник — другого.

Масс-спектрографы и масс-спектрометры. Метод Томсона позволял лишь приблизительно измерять массы атомов изотопов, но для точных измерений он не годился. Усовершенствовав метод



Френсис Астон

Томсона, другой английский физик Астон сконструировал в 1919 г. специальный прибор, получивший название *масс-спектрографа*. В нем регистрация ионов осуществлялась с помощью фотопластинки. Начиная с 1919 г. Астон с помощью своего прибора обнаружил и с относительно высокой точностью измерил массы 213 стабильных изотопов различных элементов. Полученные данные позволили ему построить в 1927 г. первую кривую так называемых *упаковочных коэффициентов*, характеризующую зависимость прочности отдельных ядер от массовых чисел.

В дальнейшем, используя ту же идею Томсона комбинации электрического и магнитного полей, различные физики в разных странах мира построили еще несколько подобных приборов. Поскольку каждый из них по-своему уникален, то все они называются по фамилиям их создателей: так, широко известны масс-спектрографы Астона, Бейнбриджа, Маттауха, масс-спектрометр Нира и др. Заметим, что масс-спектрографы и масс-спектрометры имеют аналогичное устройство и отличаются лишь по способу регистрации анализируемых ионов — в масс-спектрографах для этого используется фотопластинка, а в масс-спектрометрах измеряется электрический ток пучка ионов. В бывшем СССР работы по масс-спектроскопии атомов проводились в Сухуми группой Демирханова, Дорохова и др. Главным параметром, определяющим качество масс-спектрографа, является его *разрешение*, т. е. способность разделять близкие по значению массы. Эта величина определяется отношением интервала между самыми близкими различно регистрируемыми массами ΔM к величине самой массы M : $R = \Delta M/M$. В наилучших приборах эта величина достигает значений 10^{-5} – 10^{-6} . Для обеспечения столь высокого разрешения масс-спектрографы приходится делать весьма внушительных размеров. Так, в Аргоннской национальной лаборатории (США) построен масс-спектрометр с радиусом траектории ионов 254 см. При этом щели, через которые проходит пучок ионов, зачастую имеют шири-

ну, измеряемую сотыми долями миллиметра. Выполненные в разных странах мира измерения показали, что в природе существуют 265 стабильных изотопов и более 2 000 естественных и искусственно изготавливаемых нестабильных изотопов. Чтобы облегчить их обозначения, от старой системы обозначений (UX_I , RaC' и т. п.) было решено отказаться, тем более, что было установлено, к каким химическим элементам эти вещества относятся. Изотопы стали обозначать символами соответствующих химических элементов с указанием сверху слева массового числа — округленной до целого числа атомной массы, например: $RaC' = {}^{214}Po$, $UX_I = {}^{234}Th$ и т. д. Снизу слева иногда пишут порядковый номер элемента, например ${}_{90}^{234}Th$ или ${}_2^4He$, но в этом нет особой необходимости, так как порядковый номер однозначно определяется символом элемента. На основании результатов проведенных измерений были построены очень точные таблицы масс атомов всех стабильных и очень многих нестабильных изотопов, которые широко применяются при различных расчетах.

Дифракция рентгеновских лучей. Вскоре было сделано открытие, которое в дальнейшем позволило получить много ценной информации о свойствах атомов и атомных ядер. Здесь речь пойдет об открытии дифракции рентгеновских лучей.

Как известно, дифракция обычного света наблюдается с помощью так называемых дифракционных решеток. Такие решетки изготавливают в виде пластинок, и на них алмазным резцом наносят штрихи, расстояния между которыми должны быть порядка длины световой волны. Для этого на длине одного дюйма приходится наносить порядка 20 000 штрихов. Рассматривая такую пластинку, можно заметить в отраженном свете переливание всех цветов радуги; аналогичную картину можно наблюдать, вращая перед глазами лазерный диск.

Длина волны рентгеновских лучей в 1 000 раз меньше, чем длина волны видимого света, поэтому и расстояние между штрихами должно быть во столько же раз меньше. Изготовить такую решетку механическим способом совершенно невозможно. К тому же рентгеновское излучение является проникающим и будет просто проходить такую пластинку насквозь. Поэтому для наблюдения дифракции рентгеновских лучей немецкий физик Лауэ в 1912 г. решил использовать кристалл. В кристаллах атомы расположены слоями, расстояния между которыми как раз соответствуют



Макс Лауэ

длинам волн рентгеновских лучей — порядка одного—двух ангстремов. Таким образом, кристалл является для рентгеновских лучей своеобразной трехмерной дифракционной решеткой. Пропуская через кристалл сульфида цинка узкий пучок рентгеновского излучения, Лауэ получил фотографию, на которой вокруг центрального черного пятна, соответствовавшего прямому пучку рентгеновских лучей, были видны симметрично расположенные мелкие пятнышки, образованные рентгеновскими фотонами, рассеянными от различных кристаллических плоскостей. Так была открыта дифракция рентгеновских лучей, положившая начало целому направлению научных исследований — рентгеноспектроскопии и рентгеноструктурному анализу. Кроме этого, пропуская рентгеновские лучи через различные кристаллы, Лауэ заметил, что отраженные лучи выходят из кристаллов только под вполне определенными углами, зависящими от типа кристалла



Уильям Лоренс Брэгг

и от длины волны рентгеновского излучения. Другими учеными — Вульфом и Брэггом — в 1913 г. была получена формула, связывающая расстояние между атомными плоскостями d с длиной волны λ и углом *скольжения* лучей по поверхности кристалла θ :

$$2d \sin \theta = n\lambda. \quad (26)$$

В этой формуле n — любое целое число: 1, 2, 3 и т. д. Измерив при помощи дифракционной решетки длину волны λ и определив на опыте значения углов θ , можно было по формуле Вульфа—Брэгга (26) вычислить межатомные расстояния d . Они оказались того же порядка, что и размеры самих атомов, т. е. около 10^{-8} см. Таким образом, сделанное ранее предположение о плотной упаковке атомов в твердых телах и жидкостях получило экспериментальное подтверждение. Отсюда понятно, почему твердые вещества и жидкости при увеличении давления почти не изменяют своего объема, т. е. оказываются практически несжимаемыми.

Опыты Мозли. Вскоре открытое ранее характеристическое рентгеновское излучение в сочетании с методикой измерений длин волн, основанной на дифракции, было использовано для новых измерений зарядов атомных ядер. Наиболее удобной для этого оказалась линия характеристического излучения, соответствующая переходу электронов со второй оболочки на первую, которая обозначается символом K_α , так как взаимодействие с ядром электронов внутренних оболочек в наименьшей степени искажается влиянием других электронов. Модель Резерфорда—Бора позволяет вычислить длину волны фотонов, испускаемых при таких переходах:

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{3}{4} R_\infty (Z - 1)^2, \quad (27)$$

в которой Z — заряд ядра в единицах e , а R_∞ — так называемая постоянная Ридберга, введенная эмпирически шведским физиком Ридбергом при анализе оптических спектров еще в 1890 г., а затем выраженная через фундаментальные константы:

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} = 10\,973\,731,77 \text{ м}^{-1}. \quad (28)$$

В этих формулах значок бесконечности означает, что масса ядра считается бесконечно большой по сравнению с массой электрона. Это вполне справедливо для тяжелых ядер, а для легких ядер приходится вносить небольшую поправку. Формула (27) легко может быть преобразована к виду:

$$\sqrt{\frac{4}{3R_\infty \lambda_\alpha}} = Z - 1, \quad (29)$$

из которой видно, что для определения заряда ядра достаточно измерить длину волны линии характеристического излучения λ_α . Именно так и поступил Мозли в 1913 г.

Выше уже говорилось о том, как с помощью формулы Вульфа—Брэгга были определены расстояния между атомами в кристалле. Мозли поступил наоборот: с помощью кристалла с уже известным расстоянием между атомными плоскостями он измерял уг-



Генри Мозли

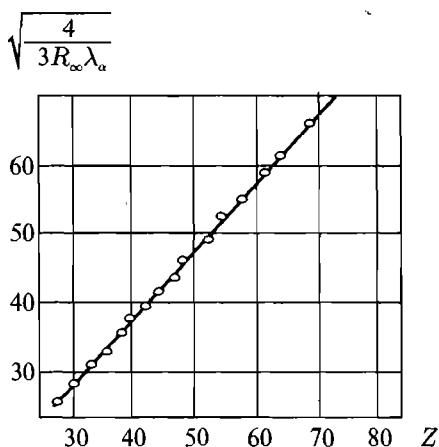


Рис. 4. График Мозли

лы рассеяния фотонов линии K_{α} , а затем с помощью формулы Вульфа—Брэгга вычислял их длину волны λ_{α} . Такие измерения были проведены для целого ряда элементов. Полученные результаты Мозли нанес на график (рис. 4), по оси абсцисс которого он отложил порядковый номер элемента, а по оси ординат — величину $\sqrt{4/(3R_{\infty}\lambda_{\alpha})}$. Все полученные Мозли точки легли на прямую линию, описываемую уравнением (29). Это прямо говорило о том, что заряд ядра, фигурировавший при выводе формулы (27), и порядковый номер элемента во всех случаях точно совпадают друг с другом. Тем самым была подтверждена гипотеза Ван ден Брука, о которой уже шла речь выше. Результаты работы Мозли можно было использовать при поисках новых элементов. Если возникало подозрение, что в каком-то веществе, выделенном, скажем, из горной породы, содержится неизвестный элемент, то достаточно было нанести это вещество на антикатод рентгеновской трубки и измерить длину волны линии K_{α} , а затем рассчитать величину $\sqrt{4/(3R_{\infty}\lambda_{\alpha})}$ и нанести ее на график Мозли. Абсцисса этой точки и даст величину Z исследуемого элемента. Именно таким образом в 1923 г. Костером и Хэвеши был открыт неизвестный до тех пор 72-й элемент гафний (названный так по старому названию столицы Дании Копенгагена, где он был открыт), а в 1925 г. Ноддаки и Берг, также анализируя спектры характеристического рентгеновского излучения, открыли 75-й элемент рений.

Измерения длины волны линии K_α для элементов, порядковый номер которых заведомо известен, позволяет с помощью формулы (28) найти точное значение постоянной Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^2 m e^4}{c R_\infty}}. \quad (30)$$

В настоящее время для постоянной Планка принято значение

$$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}).$$

Дальнейшее развитие квантовой механики. Для того чтобы лучше представить себе, как шло дальнейшее развитие представлений об атоме и атомном ядре, нам придется вспомнить некоторые основные положения квантовой механики и как развивалось само это направление физики, ибо на языке классической физики описать многие процессы в микромире просто невозможно.

Моменты количества движения электронов в атоме. Любое вращательное движение в физике принято описывать особой величиной — *моментом количества движения (механическим моментом)*. В классической физике, например, механический момент тела, имеющего относительно некоторой оси момент инерции J и вращающийся вокруг этой оси с угловой скоростью ϖ , обладает моментом количества движения $P = \varpi J$. В квантовой механике величина момента количества движения выражается через постоянную Планка и соответствующее квантовое число. Так, например, орбитальный момент выражается формулой: $P_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$, в которой l — так называемое квантовое число орбитального момента электрона, которое может иметь любые целые значения: 0, 1, 2 и т. д. При этом необходимо помнить, что момент количества движения — вектор, следовательно, он характеризуется не только своей абсолютной величиной, но и направлением. Из законов квантовой механики следует, что относительно любой выделенной оси (например, направления магнитного поля) вектор момента количества движения может занимать в пространстве лишь такие положения, при которых его проекции на эту ось имеют лишь дискретные значения $m\hbar$, причем магнитное квантовое число m может иметь только такие значения: $m = -l, -(l-1), -(l-2), \dots, -1, 0, +1, \dots, (l-1), l$. Этими формулами выражается простейшее *правило пространственного квантования векторов* в квантовой механике.

Магнитные моменты электронов в атоме. Вращение заряженного электрона вокруг ядра эквивалентно круговому электрическому току. А, как известно, виток с током создает вокруг себя магнитное поле. Для характеристики такого поля издавна использовали особую величину, называемую *магнитным моментом*. Очевидно, что между механическим и магнитным моментами должна существовать определенная связь, так как обе эти величины связаны с вращением электрона. Из законов квантовой механики следует, что существует неделимый «квант» магнитного момента, названный магнетоном Бора:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 9,274078 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}. \quad (31)$$

В этом выражении e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света. Магнитный момент любого тела может состоять только из целого числа магнетонов Бора. В атоме магнитные моменты электронов взаимодействуют друг с другом. А так как каждое такое взаимодействие связано с передачей определенных порций энергии, то это приводит к образованию оптических спектров, состоящих из отдельных узких линий, характерных для каждого химического элемента или соединения.

Опыт Штерна—Герлаха. Экспериментальную проверку этих предположений осуществили в 1922 г. два немецких физика О. Штерн и В. Герлах (W. Gerlach). В их опыте узкий пучок атомов серебра проходил через зазор между полюсами особого магнита, способного создавать сильно неоднородное магнитное поле. При выключенном магните атомы серебра летели по прямым линиям и оставляли на расположенном после магнита экране узкую полоску. Когда магнит включали, то сила, с которой неоднородное магнитное поле действует на пролетающий через него атом, зависит не только от величины магнитного момента атома и градиента магнитного поля, но и от угла между ними:

$$f = -\mu_0 \frac{dH}{dz} \cos \theta. \quad (32)$$

Если магнитные моменты атомов сориентированы хаотично, то величина $\cos \theta$ может принимать различные значения от -1 до $+1$, и, следовательно, магнитное поле растаскивало бы атомы в разные стороны и с разной силой, что приводило бы к расширению полос-

ки на экране. На самом же деле, при выполнении опыта первичный пучок атомов серебра в неоднородном магнитном поле расщеплялся на два узких пучка, симметрично отклонявшихся в противоположные направления от направления пучка при выключенном магните. Этот результат невозможно объяснить с позиций классической физики, согласно которой должна была бы получаться одна широкая полоса. Расщепление пучка атомов серебра говорило о том, что направления их магнитных моментов могли иметь не любые, а только две определенные ориентации в пространстве с проекциями на задаваемую направлением магнитного поля ось z : $\mu_z = \pm\mu_0$. Тем самым было подтверждено явление *пространственного квантования*. Опыты проводились с серебром потому, что в его атомах во внешней оболочке находится только один электрон, следовательно, весь магнитный момент атома и определяется этим единственным электроном. Поэтому результат опыта Штерна—Герлаха, указывающий на существование у электрона магнитного момента, был одним из экспериментальных фактов, приведших к гипотезе существования у электрона собственного механического момента — спина.

Спин электрона. При анализе оптических спектров с помощью спектрометров с высокой разрешающей силой было обнаружено, что во многих случаях линии спектров расщепляются на группы близко расположенных компонент. Например, все линии главной серии спектров щелочных металлов — двойные. Такие близко расположенные линии оптических спектров стали называть *дублетами*, а все явление в целом — *тонкой структурой оптических спектров*. В 1925 г. американские физики Дж. Уленбек и С. Гаудсмит пришли к выводу, что это явление можно объяснить, предположив, что электрон можно рассматривать в виде вращающегося «волчка», обладающего собственным моментом количества движения, который был назван спином (английское слово *spin* переводится как верчение). Продолжая аналогию с движением планет, можно сравнить спин электрона с суточным вращением Земли вокруг собственной оси. Спин электрона выражается через постоянную Планка и равен $s\hbar$, причем $s = 1/2$. Обычно само квантовое число s тоже называют спином, и говорят просто, что спин электрона равен $1/2$. Соответственно, как отмечалось выше, у электрона есть и собственный магнитный момент, который, как оказалось, тоже равен магнетону Бора.

Принцип Паули. Появление понятия спина электрона позволило швейцарскому физика Паули в том же 1925 г. сформулировать принцип, названный впоследствии его именем, согласно которому в любой системе связанных частиц не может быть двух электронов с одинаковыми наборами квантовых чисел (n, l, m, s). При этом на значения квантовых чисел накладываются определенные ограничения. Так главное квантовое число n может принимать только целые положительные значения: $n = 1, 2, 3, \dots$. При каждом заданном числе n орбитальное квантовое число l может иметь значения $0, 1, 2, \dots, n - 1$. При каждом значении l квантовое число m может иметь значения: $-l, -(l - 1), \dots, 0, \dots, (l - 1), l$. Наконец, спин электрона может иметь только две проекции на любую ось, поэтому квантовое число проекции спина может иметь только два значения $s_z = \pm 1/2$.



Вольганг Паули

Дальнейшее развитие модели атома. Эти правила позволили существенно развить модель атома и получить ответы на ряд вопросов.

1. Стало ясно, какое максимальное число электронов может находиться на каждой оболочке: на первой — 2, на второй — 8 и т. д.
2. Отсюда стало понятным строение периодической системы элементов. Каждому периоду этой системы соответствует своя оболочка в атоме. Так, на первой оболочке может быть либо 1, либо 2 электрона, чему соответствуют два элемента в первом периоде — водород и гелий. При переходе к третьему элементу — литию, у которого заряд ядра равен 3, для третьего электрона на первой оболочке места нет, и он вынужден разместиться во второй оболочке. По мере дальнейшего перехода от элемента к элементу число электронов во второй оболочке постепенно увеличивается, пока оно не достигнет максимально возможного значения — 8. При этом химические свойства элементов постепенно меняются от типичного металла — лития — до инертного газа — неона. Происходит это потому, что именно строение внешней электронной оболочки и, в частности, число электронов на ней, определяют возможности соединения данного атома с атомами других элементов, т. е., говоря

другими словами, — химические свойства соответствующего элемента. А затем начинает заполняться третья оболочка, и все повторяется сначала: от металла натрия до инертного газа аргона. Правда, затем такая простая закономерность заполнения атомных оболочек нарушается (из-за взаимодействия электронов не только с ядром, но и друг с другом), но общие принципы заполнения оболочек остаются прежними.

3. Рассмотрение переходов электронов между оболочками позволило построить теорию оптических спектров. Ведь при переходе электрона с внешней оболочки на внутреннюю, в соответствии со вторым принципом Бора, происходит испускание фотона со вполне определенной частотой, а следовательно, и с определенной длиной волны. Все такие фотоны образуют одну из линий оптического спектра соответствующего элемента, а переходы между различными оболочками — все остальные линии спектра.

Особенно большие успехи были достигнуты при расшифровке спектра атомарного водорода. Для этой простейшей системы удалось рассчитать энергии всех переходов электронов между отдельными оболочками, а следовательно — длины волн испускаемых фотонов и положение соответствующих им линий в оптическом спектре. При этом были выявлены определенные закономерности, группы линий объединены в серии и установлена их связь со структурой электронных оболочек атома водорода.

В более сложных атомах картина усложняется из-за взаимодействия электронов не только с атомным ядром, но и друг с другом, но и там общие принципы построения оболочек остаются такими же.

Матричная механика. Несмотря на все успехи, «полуклассическая» теория Бора обладала многими недостатками. Во-первых, она была внутренне противоречивой: классические представления о частицах, как о корпускулах, движущихся по определенным орбитам, она дополняла не свойственными классической механике правилами квантования и противоречащим классической электродинамике предположением о возможности движения заряженного электрона по орбите с ускорением, но без излучения. Во-вторых,



Вернер Гайзенберг

она не смогла объяснить многие известные факты, например, как движутся электроны в сложных атомах и как они переходят с одной орбиты на другую. В дальнейшем стало ясно, что движение электронов в атомах нельзя описывать в терминах классической механики, и что сам вопрос о промежуточных состояниях (например, при переходе электрона с одной орбиты на другую) в мире квантовых частиц не имеет смысла. Нужна была новая теория, которая оперировала бы только величинами, определяющими начальное и конечное состояния системы.

В 1925 г. немецкий физик В. Гайзенберг создал так называемую *матричную механику*, в которой вместо координат и скоростей электронов фигурировали некоторые абстрактные математические величины — матрицы. Связь матриц с наблюдаемыми величинами — уровнями энергии и интенсивностями переходов — давалась простыми непротиворечивыми правилами. Но вскоре стало ясно, что и матричная механика недостаточно полно отражает все наблюдаемые явления.

Частицы и волны. Напомним, что идея квантов родилась в 1900 г. при попытке Планка найти выход из так называемой «ультрафиолетовой катастрофы» путем предположения о том, что свет испускается не непрерывно, а маленькими порциями — квантами. Энергия кванта ϵ определяется его частотой ν и универсальной константой — постоянной Планка h : $\epsilon = \nu h$. Используя эти представления, Эйнштейн в 1905 г., предположив, что свет не только испускается и поглощается квантами, но и распространяется квантами, т. е. своеобразными сгустками электромагнитных волн, построил теорию фотоэффекта, в которой кванты света выступали в роли частиц, названных впоследствии *фотонами*. Такое двойственное проявление в одном объекте или явлении противоречивых свойств волн и частиц получило название *дуализма волновых и корпускулярных свойств*. По этому поводу сэр Уильям Брэгг в шутку заметил, что мы должны думать о свете и других видах излучения как о фотонах (корпускулах) по понедельникам, средам и пятницам, и как о волнах — по вторникам, четвергам и субботам.

Затем Бор в своей теории атома ввел принцип квантования орбит (24), в котором постоянная Планка выступала в роли кванта действия. Подтверждение корпускулярных свойств фотона дал открытый в 1922 г. *эффект Комптона*, который интерпретировался как упругое столкновение двух частиц — фотона и электрона. С другой стороны, и у электрона выявились волновые свойства. Так, в 1924 г. французский ученый де Бройль заметил, что принцип квантования орбит Бора можно трактовать как требование размещения вдоль орбиты целого числа длин волн:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (33)$$

при этом длина орбиты

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}, \quad (34)$$

откуда непосредственно следуют формулы (24) и (25). Заметим, что длину волны, изображаемую формулой (33), называют *длиной волны де Бройля* и тоже делят на 2π :

$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}. \quad (35)$$

Сильным подтверждением волновых свойств электронов явилось открытие в 1927 г. Дэвиссоном и Джермером *дифракции электронов* — сугубо волнового явления, которое невозможно описать, представляя себе электроны в виде точек или шариков.

Волновая механика. В дальнейшем оказалось, что понятие длин волн де Бройля можно применять не только к электронам, но и ко всем другим элементарным частицам — протонам, нейтронам и др. Так в середине 20-х гг. родилась *волновая механика*. Основным понятием волновой механики является *волновая функция* ψ (пси). В 1926 г. австрийский физик Шредингер получил уравнение, описывающее поведение этой функции во внешних силовых полях:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + U(x, y, z) \psi = E \psi, \quad (36)$$



Артур Комптон



Луи де Бройль



Эрвин Шредингер

где Δ — оператор Лапласа, составленный из символов частных производных второго порядка; E, m — энергия и масса частицы, а $U(x, y, z)$ — потенциал внешнего силового поля. Зная этот потенциал, можно решить уравнение Шредингера, т. е. найти волновую функцию ψ , которая является функцией координат частицы в пространстве, а в более общем случае — и времени. Для квантовых систем, находящихся в ограниченных областях пространства, уравнение Шредингера имеет решения только при определенных значениях параметра E . Эти значения назы-

ваются *собственными значениями* и выражают дискретные значения энергий, которые может иметь данная система (так называемые энергетические уровни). Решая уравнение Шредингера, можно найти и волновую функцию ψ , квадрат модуля которой $|\psi|^2$ выражает вероятность нахождения частицы в данной точке пространства в данный момент времени. Другими словами, частица может быть обнаружена с той или иной вероятностью в любой точке пространства, где ее волновая функция не равна нулю. Таким образом квантовая механика оперирует не с точными значениями физических величин, а с вероятностями того, что данная величина примет то или иное значение или частица будет находиться в той или иной точке пространства. Вот на этом этапе и пришлось отказаться от представления о точных орбитах электронов в атоме. Решение уравнения Шредингера давало волновую функцию, которая занимала весь объем атома, но в разных точках имела разную плотность. Поэтому даже для одного электрона в атоме водорода картинка стала выглядеть как туманное облачко, причем разная плотность этого облачка соответствовала разной вероятности обнаружения электрона в той или иной точке пространства. Совершенно очевидно, что для многоэлектронных атомов картинка получалась еще более сложной.

Формирование единой квантовой теории. После первых работ Шредингера вскоре стало ясно, что матричная и волновая механики при всем их внешнем различии на самом деле вовсе не противоречат друг другу и могут рассматриваться как два варианта

единой квантовой теории, взаимно дополняя друг друга. Так, например, матричные элементы оказалось возможным вычислять путем интегрирования волновых функций, полученных из решений дифференциальных уравнений волновой механики. При этом пришлось полностью отказаться от строго детерминированных методов классической физики: целью квантово-механических подходов является, как правило, нахождение не точных значений физических величин, а лишь вероятностей того, что данная величина будет иметь то или иное значение. Соответственно пришлось отказаться и от таких понятий, как орбиты электронов в атоме, заменив их представлением об электроне, как о своеобразном «облачке», заполняющем весь объем атома, причем плотность этого «облачка» пропорциональна вероятности обнаружения электрона в той или иной точке пространства — максимальной она оказалась как раз в районе «старых» орбит.

Квантово-механические статистические распределения. Еще в 1868–1871 г. Л. Больцман, разрабатывая статистический метод описания физических свойств систем, содержащих большое число невзаимодействующих частиц, движущихся по законам классической механики, вывел формулу для распределения таких частиц по энергиям, которая в современном написании имеет вид:

$$\bar{n}_i = \exp \left\{ \frac{\mu - E_i}{kT} \right\}, \quad (37)$$

n_i — число частиц, находящихся в единичном энергетическом интервале вблизи энергии E_i ; μ — химический потенциал; k — постоянная Больцмана. Эта формула, применимая, например, для частиц идеального газа, получила название *распределения Больцмана*.

В 1924 г. индийский физик Шатъендранат Бозе разработал статистику для квантовых частиц с целыми спинами (0, 1, 2, ...), которые описываются симметричными волновыми функциями (так называются волновые функции, не меняющие знак при перестановке двух частиц). Поведение таких частиц отличается целым рядом особенностей. В частности, в одном и том же состоянии может находиться любое число частиц. Статистика Бозе в том же 1924 г. была развита для идеального газа Эйнштейном и стала называться статистикой Бозе—Эйнштейна. Распределение частиц по энергиям в такой статистике отличается от распределения Больцмана

и имеет вид:

$$\bar{n}_i = \frac{1}{\exp \left\{ \frac{E_i - \mu}{kT} \right\} - 1} \quad (38)$$

(распределение Бозе—Эйнштейна).

В 1926 г. Ферми и Дирак разработали статистику для частиц с полуцелыми спинами ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$), которые описываются антисимметричными волновыми функциями. Поведение таких частиц во многом противоположно поведению частиц с целыми спинами. Так, для них действует *принцип Паули*, согласно которому в состоянии с определенным набором квантовых чисел может находиться только одна частица. Распределение таких частиц по энергиям похоже на распределение Бозе—Эйнштейна и отличается от него только знаком в знаменателе:

$$\bar{n}_i = \frac{1}{\exp \left\{ \frac{E_i - \mu}{kT} \right\} + 1} \quad (39)$$

(распределение Ферми—Дирака).

При больших энергиях, когда экспоненты в двух последних формулах становятся много больше единицы, оба квантовых распределения переходят в классическое распределение Больцмана, в чем проявляется *принцип соответствия* между классической и квантовой теориями.

Принцип неопределенности Гейзенберга. Следующий логический шаг от строгого классического детерминизма к присущей любому вероятностному описанию неопределенности был сделан в 1927 г. уже упоминавшимся немецким физиком Гейзенбергом. Он сформулировал так называемый *принцип неопределенности*, который выражает вероятностный характер результата эксперимента по обнаружению координат частицы и ее импульса. Наиболее распространенная форма записи принципа неопределенности:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar. \quad (40)$$

Она говорит о невозможности одновременного определения со сколь угодно высокой точностью координаты и импульса частицы: стремясь уточнить одну из этих величин, мы неизбежно увеличиваем неопределенность другой величины. В другой форме принцип

неопределенности может быть записан так:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. \quad (41)$$

Отсюда, в частности, следует, что любой энергетический уровень квантовой системы (кроме стационарного) имеет конечную ширину и что пребывание системы в данном состоянии ограничено во времени.

Туннельный эффект. С принципом неопределенности Гайзенберга связано также такое сугубо квантово-механическое явление, как *туннельный эффект*, или, как его еще называют, *эффект прохождения частиц через потенциальный барьер*. Для начала напомним, что *потенциальным барьером* называется область физической среды, в которой под влиянием внешних сил потенциальная энергия частицы оказывается гораздо больше, чем в соседних точках пространства. Максимальное значение потенциальной энергии называется *высотой потенциального барьера* U_0 . Простейший пример прямоугольного одномерного потенциального барьера показан на рис. 5. Согласно представлениям классической физики, частица может пройти через область барьера только в том случае, если ее кинетическая энергия E_1 превышает высоту барьера U_0 . Если же энергия частицы E_2 оказывается меньше U_0 , то частица не может войти в область барьера, так как там ее полная энергия оказалась бы меньше потенциальной энергии, что противоречит закону сохранения энергии. Поэтому в классическом случае частица, столкнувшись

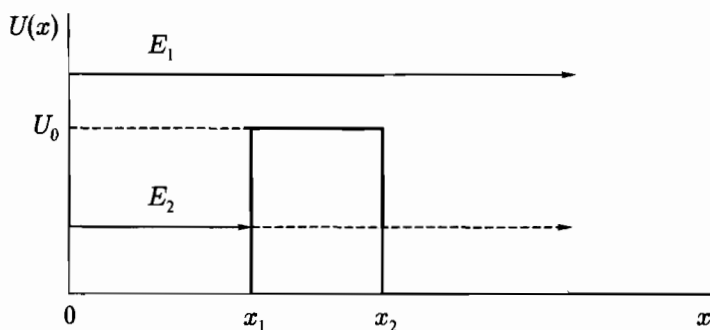


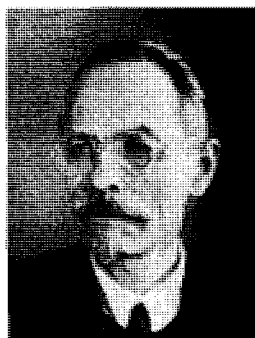
Рис. 5. Схема простейшего прямоугольного одномерного потенциального барьера и прохождения частицы через него в результате туннельного эффекта

со стенкой барьера, была бы отброшена назад. В квантовой механике решение уравнения Шредингера приводит к отличным от нуля значениям волновой функции как до барьера, так и после него. Это означает, что частица может пройти через барьер с определенной вероятностью, называемой *проницаемостью барьера*, даже при условии $E_2 < U_0$. Проницаемость барьера тем меньше, чем больше его ширина $\Gamma = x_2 - x_1$ и высота $U_0 - E_2$. Поэтому туннельный эффект проявляется лишь в мире микрочастиц, так как с ростом высоты потенциального барьера его проницаемость уменьшается, и в области привычных нам масштабов он становится практически непреодолимым, что и соответствует классическим представлениям.

Развитие ядерной физики в России. Начало исследований радиоактивности в нашей стране связано с именем выдающегося



Владимир Иванович
Вернадский



Виталий Григорьевич
Хлопин

ученого академика В. И. Вернадского, который еще в начале XX в. предсказал атомной энергии великое будущее. В речи, произнесенной в декабре 1910 г. на Общем собрании Российской академии наук, он сказал: «Перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, которые рисовались человеческому воображению». И далее он пророчески заметил: «Как ни труден этот путь — нет никакого сомнения, что человечество пойдет по нему». В 1911 г. Вернадский явился инициатором создания Радиологической лаборатории, многочисленных экспедиций и комиссий. В этой лаборатории один из его ближайших соратников В. Г. Хлопин в 1921 г. получил первые препараты отечественного радия (напомним, что в это время еще шла Гражданская война). В 1922 г. на базе лаборатории Вернадский создал Радиевый институт, существующий и по сей день. В 1920-х гг. радиохимики Радиевого института изучали химию различных радиоактивных веществ, проводили исследования геохимии радиоактивных элементов, разрабатывали методики опреде-

ления возраста горных пород ядерными методами. Ими были выявлены особенности распространения урана и тория на территории нашей страны, позволившие впоследствии организовать их промышленную добычу. В дальнейшем исследования радиоактивности были развернуты также в Ленинградском (А. Ф. Иоффе, И. В. Курчатов, Г. А. Гамов, Л. В. Мысовский и др.) и Харьковском (А. И. Лейпунский, К. Синельников, А. Вальтер, Л. Ландау и др.) физико-технических институтах.

Некоторые итоги. Итак, к середине 20-х гг. XX в. теория атома была, в основном, построена. Было установлено, что атом состоит из очень маленького ядра, имеющего большой положительный электрический заряд и несущего в себе почти всю массу атома, и вращающихся вокруг ядра отрицательно заряженных электронов. С помощью представлений о квантах удалось рассчитать положение электронных оболочек, объяснить их заполнение электронами, установить связь заряда атомного ядра с порядковым номером элемента и тем самым глубже понять природу периодического закона Менделеева и несколько уточнить его.

Следует отметить, что период 20-х гг. XX в. был периодом величайшего развития атомной физики. Все новые и новые открытия сыпались как из рога изобилия, опровергая имевшее место до этого мнение, что развитие физики закончилось в основном в XIX в. Классическая теория оказалась не в состоянии объяснить результаты, полученные в ходе исследований микромира — мира молекул и атомов. Новые теории — квантовая механика и теория относительности — были столь необычными и трудно воспринимаемыми, что принимались далеко не всеми и не сразу. В физических институтах царила атмосфера необычного творческого оживления. Возникали различные научные школы, между сторонниками которых велись жаркие научные споры. Широко известен длившийся несколько лет спор между Бором и Эйнштейном по поводу трактовки волновой функции и роли макроскопического прибора в процессе исследований микроскопических явлений. Характеризуя обстановку того времени, известный физик Г. А. Гамов писал: «...и университетские аудитории, и кафе были забиты физиками, старыми и молодыми, спорящими о следствиях, которые... новые продвижения в квантовой теории будут иметь для понимания атомной и молекулярной структуры». И что особенно

следует подчеркнуть, все эти споры и дискуссии велись в обстановке полной открытости. Физики сами стремились как можно скорее и шире оповестить своих коллег в разных странах о новейших достижениях. Многие ученые ездили к своим коллегам для совместных работ и стажировок. Так, для А. Ф. Иоффе школой стала лаборатория Рентгена в Мюнхенском университете, П. Л. Капица тринадцать лет проработал в Кавендишской лаборатории Кэмбриджского университета у Резерфорда, с 1926 по 1928 гг. здесь же был и Ю. Б. Харитон; Л. Д. Ландау и Г. А. Гамов стали учениками Н. Бора в Копенгагене, Д. В. Скобельцын стажировался во Франции у М. Кюри. Естественно, что ни о какой секретности в то время не было и речи.

Но все достижения этого бурного периода касались, в основном, строения атома и молекул. В то же время, о природе и структуре атомного ядра почти ничего не было известно.

От строения атома к строению атомного ядра (середина XX века)

Первоначальные представления о строении атомного ядра. Из результатов опытов Резерфорда—Гейгера—Марсдена было известно, что атомное ядро — это расположенное в центре атома маленькое массивное тело, имеющее положительный электрический заряд $q = Ze$, причем величина Z имеет двоякий смысл — это и число положительных элементарных зарядов e в ядре, и порядковый номер соответствующего химического элемента. Уже из этих фактов вытекал целый ряд вопросов. Поскольку заряд ядра состоит из целого числа элементарных зарядов, т. е. из дискретных одноименно заряженных частиц, то почему эти частицы не разлетаются под действием электростатических сил отталкивания? И что это за частицы? Напомним, что в то время были известны только две элементарные частицы: электрон с электрическим зарядом $-e$, и ядро легчайшего элемента — водорода, заряд которого как раз равен $+e$. Массы всех атомов почти кратны массе атома водорода, что заметил еще Праут, причем для изотопов гипотеза Праута выполняется еще лучше, чем для средних атомных масс природных элементов. Так может быть стоит вернуться к этой гипотезе в несколько измененном виде и предположить, что *ядра* атомов всех изотопов состоят из *ядер* водорода? Но на первых же двух элементах это предположение натолкнулось на существенную трудность. Дело в том, что масса атома гелия в 4 раза больше массы протона, а его заряд — только в 2 раза больше. Чтобы преодолеть эту трудность, предположили, что в ядре гелия, кроме четырех протонов, находятся еще два электрона. Масса электронов очень маленькая, на массе ядра гелия она практически не отражается, а своими отрицательными зарядами электроны компенсируют положительные заряды двух протонов, и заряд ядра гелия оказывается в 2 раза больше заряда протона, как и получается на опыте. Аналогичным образом объяснялось и строение остальных ядер:

массовое число определяло количество протонов в ядре, а разность между этим числом и наблюдаемым на опыте числом Z компенсировалась соответствующим числом электронов внутри ядра. Предположение о существовании внутри ядра электронов очень хорошо согласовывалась и с тем, что некоторые ядра были β -активными и испускали β -частицы, которые были тождественны электронам.

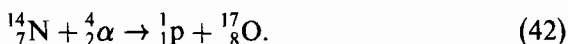
Казалось бы, что ответ на поставленный выше вопрос найден, и эта точка зрения в течение некоторого времени считалась правильной. Однако спустя некоторое время было абсолютно точно доказано, что *электроны внутри ядра находиться не могут*. Об этом говорил целый ряд фактов, в справедливости которых сомневаться не приходилось.

Азотная катастрофа. Одним из таких фактов стала обнаруженная в конце 1920-х гг. так называемая «азотная катастрофа». Согласно протон-электронной гипотезе ядро азота-14 должно содержать 21 частицу: 14 протонов и 7 электронов. Поскольку спины всех этих частиц равны $\frac{1}{2}$, спин ядра азота должен быть полуцелым, тогда как прямые опытные данные, основанные на анализе оптических спектров, говорили о том, что спин ядра азота равен 1, и что, стало быть, в нем может находиться только четное число частиц с полуцелым спином. Вопрос о строении ядра вновь оказался открытым, и для его решения нужны были новые исследования.

Открытие первой ядерной реакции. После открытия радиоактивности физики первое время получали информацию об атоме и атомном ядре, лишь пассивно наблюдая те явления, которые предоставляла им сама природа. Никакими средствами повлиять ни на скорость распада, ни на типы испускаемых частиц, ни на их энергии ученым не удавалось. Правда, в опытах Резерфорда α -частиц искусственно заставляли отклоняться от своего пути, но и это явление происходило вне ядра, и поэтому никакой информации о его внутреннем строении дать не могло.

Но в 1919 г. Резерфорд обнаружил, что при столкновении α -частиц с ядрами азота, кроме рассеяния, происходит и какое-то другое явление, при котором из точки столкновения α -частицы с ядром вылетает какая-то новая частица. По плотности создаваемой ею ионизации можно было установить, что это ядро водорода. А что при этом происходило с самим ядром? Поскольку у Резер-

форда не было оснований предполагать, что общее число частиц в данном процессе может как-то измениться, он пришел к выводу, что лишние протоны из α -частицы застряли вместе со своими электронами в ядре азота, увеличив его заряд на одну, а массу на три единицы. В результате ядро 7-го элемента — азота — превратилось в ядро 8-го элемента — кислорода, и весь процесс мог быть записан следующим образом:



Так была открыта первая *ядерная реакция* — именно так стали называть в дальнейшем подобные процессы.

Значение этого открытия было чрезвычайно велико. Его можно свести к следующим основным пунктам:

1. Найден способ искусственного воздействия на атомные ядра, что намного расширяло возможности их исследования.
2. Вылет протона из ядра подтверждал ранее высказанную гипотезу о наличии протонов в атомных ядрах.
3. Найден способ *искусственного* превращения одних химических элементов в другие. Тем самым как бы в несколько измененном виде осуществилась старая мечта алхимиков, пытавшихся найти способ превращения ртути в золото (кстати сказать, впоследствии соответствующая ядерная реакция была найдена и осуществлена).

В дальнейшем было открыто большое число других ядерных реакций, и была принята более компактная форма их записи, в которой, например, реакция (42) записывается так: ${}^{14}\text{N}(\alpha, \text{p}){}^{17}\text{O}$.

Открытие ядерной изомерии. В 1918 г. немецкий химик Хан, работая со своей помощницей Лизе Майтнер, выделил из отходов переработки урановой смоляной руды новый радиоактивный элемент. В результате α -распада ядра этого элемента превращались в ядра уже известного ранее элемента актиния, поэтому вновь открытый элемент был назван *протактинием*, т. е. «предшествующим актинию». В дальнейшем оказалось, что ими был открыт изотоп ${}^{231}\text{Pa}$ с периодом полураспада $3,28 \cdot 10^4$ лет.



Отто Хан (Ган)



Лизе Майтнер

Продолжая исследования с протактинием, Хан и Майтнер обнаружили в 1921 г. еще один его изотоп, обладавший странными свойствами: его ядра распадались с двумя различными периодами полураспада. Можно было подумать, что был открыт не один изотоп, а два, однако поскольку при их β -распаде образовывались одинаковые ядра урана-234, приходилось сделать вывод, что и в исходном состоянии ядра принадлежали одному изотопу ^{234}Pa . Оставалось сделать единственно возможный вывод о том, что ядра ^{234}Pa имеют две разновидности. В соответствии с тогдашней традицией их стали обозначать UX_2 ($T = 1,18$ мин) и UZ ($T = 6,75$ ч). Такое явление, при котором ядра одного изотопа имеют две разновидности с совершенно одинаковым составом, но отличающиеся друг от друга по значениям периодов полураспада и по некоторым другим свойствам, стали называть *ядерной изомерией*, а ядра UX_2 и UZ — по отношению друг к другу *изомерами*.

На протяжении многих лет это был единственный известный случай ядерной изомерии, и поэтому он считался исключительным явлением, присущим только одному тяжелому радиоактивному ядру ^{234}Pa . И только в середине 30-х гг. были открыты другие искусственно получаемые изомеры, но об этом речь пойдет впереди.

Открытие и объяснение сверхтонкой структуры оптических спектров. Продолжение исследований оптических спектров с помощью приборов с еще более высоким энергетическим разрешением показало, что очень часто линии тонкой структуры (о которых шла речь выше) расщепляются на группы очень близко расположенных линий. Это явление было названо *сверхтонкой структурой* линий оптических спектров, или, что то же самое, *сверхтонким расщеплением энергетических уровней атома*. Объяснение этому явлению нашел в 1928 г. Паули. Согласно его гипотезе, сверхтонкая

структура линий оптических спектров имеет ту же природу, что и тонкая структура, открытая несколько раньше, но только в данном случае решающую роль играет не магнитный момент электрона, а магнитный момент ядра. Протон, так же как и электрон, обладает электрическим зарядом и спином, следовательно, у него также должен быть собственный магнитный момент. Но поскольку масса протона почти в 2 000 раз больше массы электрона, величина этого магнитного момента должна быть совсем иной. Поэтому была введена новая физическая величина — *ядерный магнетон*, который по аналогии с магнетоном Бора записывается так:

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p c}. \quad (43)$$

В этом выражении вместо массы электрона в знаменателе стоит масса протона. А поскольку, как уже отмечалось, масса протона почти в 2 000 раз больше массы электрона, то ядерный магнетон почти в 2 000 раз меньше магнетона Бора. Во столько же раз различаются и величины всех эффектов, связанных с проявлениями магнитных моментов электронов и ядер, и, в частности, величины тонкого и сверхтонкого расщепления атомных уровней.

Таким образом, исследование сверхтонкой структуры оптических спектров позволило установить наличие у атомных ядер магнитных моментов и измерить их величину, которая оказалась в тысячи раз меньше магнитных моментов электронов. Именно этот факт является еще одним из решающих доказательств того, что электронов внутри атомных ядер нет и быть не может.

Теория α -распада. Как отмечалось, вскоре после открытия радиоактивности, Резерфордом было установлено, что α -частицы — это вылетающие из некоторых тяжелых ядер ядра гелия. Однако оставался непонятным механизм этого процесса. Если α -частица может вылететь из ядра, то почему она не делает этого сразу? Тем более, что α -частица и ядро имеют одноименные положительные электрические заряды, отталкивание которых должно способствовать вылету α -частиц. В то же время из опыта известно, что ядра многих элементов (например, урана) лежат порой миллиарды лет, прежде чем произойдет их α -распад. Так что же препятствует вылету α -частицы из ядра?



Георгий Анатольевич
Гамов

Первый вариант теории α -распада предложил в 1928 г. русский физик Георгий Анатольевич Гамов. В основу своей теории он положил представления о туннельном эффекте (см. с. 87). Дело в том, что при взаимодействии α -частицы с ядром возникает потенциальный барьер (рис. 6). Правая часть этого барьера обусловлена кулоновским отталкиванием α -частицы и ядра друг от друга. Но внутри ядра, благодаря действию мощных ядерных сил притяжения, потенциальная энергия резко уменьшается — образуется то, что в квантовой механике называется «потенциальной ямой».

Если внутри ядра образовалась из отдельных нуклонов α -частица с энергией E_α больше нуля (т. е. больше глубины потенциальной ямы), то в результате туннельного эффекта она может скачком перейти из состояния 1 в состояние 2, минуя промежуточные состояния внутри барьера. Чем больше туннельное расстояние (длина отрезка $r_t - R$), и чем больше разность между высотой барьера U_C и энергией частицы

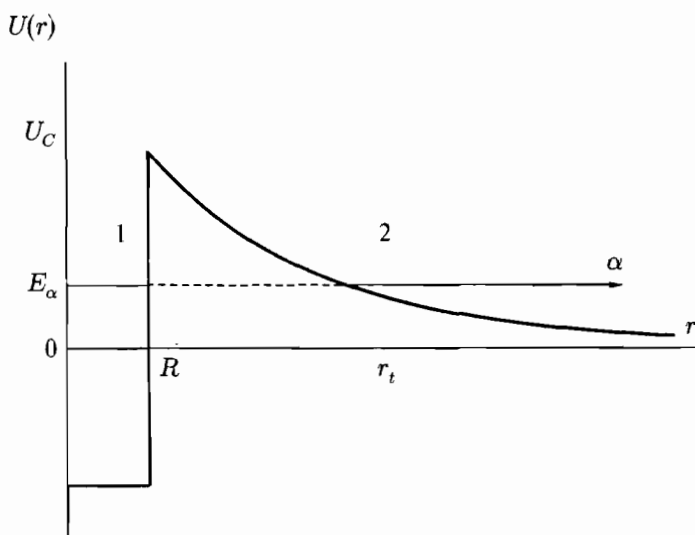


Рис. 6. Схема α -распада

E_α , тем меньше вероятность туннельного эффекта, и тем медленнее будут распадаться ядра данного сорта.

Теория Гамова в целом правильно объяснила основную суть α -распада. В дальнейшем она была существенно дополнена и усовершенствована, но некоторые детали α -распада количественно не объясняются и поныне. Сам Гамов в 1933 г. эмигрировал из СССР и с 1934 г. до конца жизни жил в США, но теорию α -распада он создал еще до своей эмиграции.

Загадки β -распада. Второй вид радиоактивного распада — β -распад — тоже преподнес физикам немало сюрпризов. Известно, что выделяющаяся при β -распаде энергия равна разности масс исходного и конечного атомов:

$$Q_\beta = (M_1 - M_2)c^2. \quad (44)$$

В этом выражении все величины в правой части определены однозначно, следовательно, и энергия распада определяется однозначно, и все вылетающие при распаде данных ядер β -частицы должны иметь одинаковые энергии. Однако вскоре после открытия β -распада было установлено, что образующиеся при нем β -частицы имеют непрерывный энергетический спектр, который тянется от нуля до энергии, определяемой соотношением (44). Другими словами, подавляющая часть β -частиц вылетает с энергиями меньшими, чем должно быть согласно соотношению (44). Спрашивается: а куда девается остальная энергия?

Вторая загадка. При β -распаде массовое число, как известно, не изменяется, а следовательно, не изменяется и четность числа частиц, из которых оно состоит. А это, в свою очередь, означает, что спин ядра при β -распаде может измениться лишь на целое число единиц. Но ведь спин, уносимый β -частицей, равен $1/2$. Как это можно согласовать с законом сохранения количества движения?

И, наконец, третий вопрос. Как отмечалось ранее, электронов в ядре быть не может. Но ведь вылетающие из ядра β -частицы — это электроны. Откуда же они берутся?

Физиков больше всего волновал ответ на первый вопрос. Ведь если бы он не был найден, то это означало бы крах закона сохранения энергии, на котором базируется вся физика. Все контрольные эксперименты приводили к прежнему результату — часть энергии при β -распаде бесследно исчезала. Некоторые физики уже начали сомневаться в универсальности закона сохранения энергии.

Гипотеза Паули. И вот тогда в 1930 г. швейцарский физик Паули (автор известного «принципа Паули», о котором говорилось выше), только ради того, чтобы «спасти» закон сохранения энергии, выдвинул предположение о том, что при β -распаде, кроме β -частицы, вылетает еще одна частица. Эта частица, безусловно, должна была быть электрически нейтральной, так как изменение заряда ядра при β -распаде прекрасно описывалось и без нее; к тому же заряженные частицы легко обнаруживаются по производимой ими ионизации вещества, а эти гипотетические частицы никаких следов не оставляли. Масса этих частиц тоже должна была быть очень маленькой, так как они не вносили никаких заметных изменений в полную энергию β -распада (44). И вот эти-то малюсенькие нейтральные частицы и уносили всю остающуюся от β -частиц энергию. Оказалось, что гипотеза о новых нейтральных частицах позволила «спасти» и закон сохранения количества движения момента — для этого достаточно было предположить, что у этих частиц, как и у электронов, спин равен $1/2$. Впоследствии после открытия нейтрона (см. ниже) по предложению Э. Ферми эту странную частицу называли «нейтрино», что можно перевести с итальянского языка на русский как «нейтрончик». Но еще до того, как было придумано это игривое название, было сделано одно из величайших открытий в ядерной физике, которому было суждено сыграть решающую роль в истории этой науки.

Открытие нейтрона. Напомним, что открытия Резерфордом и атомного ядра, и первой ядерной реакции были сделаны в опытах по изучению взаимодействия α -частиц с атомными ядрами различных веществ. Метод этот оказался чрезвычайно плодотворным, и поэтому неудивительно, что во многих научных центрах мира различные ученые начали интенсивные исследования, облучая α -частицами различные элементы в надежде найти еще какие-нибудь интересные явления. В одной из серий таких экспериментов, проведенных в 1930 г., немецкие физики Боте и Беккер обнаружили, что при облучении α -частицами бериллия возникает какое-то проникающее излучение, вызывающее импульсы в счетчиках. Так как в то время было известно только одно проникающее излучение — γ -излучение, то ученые решили, что именно его-то они и обнаружили в своих опытах, а по степени ослабления интенсивности этого излучения при прохождении через свинец они даже измерили его энергию, которая оказалась близкой к 7 МэВ.

Несколько позже Ирен и Фредерик Жолио-Кюри продолжили исследование излучения, возникающего при облучении бериллия α -частицами, только в качестве детектора они использовали камеру Вильсона, наполненную водородом. На снимках, сделанных с этой камерой, были видны четкие треки протонов, причем длина некоторых из них достигала в воздухе 26 см, чему соответствовала энергии протонов 4,3 МэВ. В принципе γ -кванты при упругом рассеянии могли создавать протоны отдачи такой энергии, но для этого их собственная энергия должна была быть порядка 50 МэВ! Этот результат не только противоречил результатам Боте и Беккера, но и вообще было непонятно, откуда могла взяться столь большая энергия γ -квантов. К тому же она в 6 раз превышала среднюю энергию, которую приходится затрачивать, чтобы вырвать нуклон из ядра (≈ 8 МэВ), поэтому при таком избытке энергии ядро должно было бы не испускать γ -квант, а разлетаться в клочья, чего, однако, не происходило.

В 1932 г. ученик Резерфорда английский физик Чедвик продолжил опыты с камерой Вильсона, наполняя ее азотом и аргоном. При этом тоже возникали ядра отдачи, но рассчитанная по ним энергия γ -квантов оказывалась уже совсем неподобной — 90 и 150 МэВ соответственно! И вот тогда Чедвик пришел к выводу, что при взаимодействии α -частиц с ядрами бериллия возникают вовсе не γ -кванты, а какие-то новые частицы с отличной от нуля массой покоя. Эти частицы были электрически нейтральными, ибо в противном случае их следы были бы видны в камере Вильсона, чего, однако, не наблюдалось. Более того, сопоставляя результаты опытов с разными газами, Чедвик смог оценить массу этих частиц, которая оказалась очень близкой к массе протона. Эти новые, относительно тяжелые нейтральные частицы Чедвик назвал *нейтронами*. Следует отметить, что нейтроны очень напоминали предсказанный Резерфордом еще в 1920 г. «нулевой элемент», т. е. элемент с порядковым номером $Z = 0$.



Джеймс Чедвик

Сразу стало ясно, что нейтроны обладают рядом замечательных свойств. Не имея электрического заряда, они не испытывают электростатического отталкивания от атомных ядер и, следовательно

но, могут проникать в ядра при любых энергиях, вплоть до самых маленьких, что делало их чрезвычайно удобными «снарядами» для «обстрела» атомных ядер и изучения их структуры. Из-за отсутствия заряда нейтроны не растрчивают свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды, чем объясняется их высокая проникающая способность: в таких веществах, как тяжелая вода, длина пути нейтрона может измеряться метрами. Имеют нейтроны и ряд других особенностей, о которых будет сказано ниже.

Протон-нейтронное строение атомного ядра. Вскоре после открытия нейтронов российский физик Д. Д. Иваненко и независимо от него немецкий физик Гайзенберг в том же 1932 г. высказали гипотезу о том, что все ядра состоят из протонов и нейтронов. Эта гипотеза снимала все трудности предыдущих представлений о строении ядра. В самом деле, согласно данной гипотезе ядро гелия, например, состоит из двух протонов и двух нейтронов. В результате его заряд оказывается в 2 раза, а масса — в 4 раза больше массы ядра водорода — протона, что наблюдается на опыте. Ядро азота-14



Дмитрий Дмитриевич
Иваненко

состоит из четного числа частиц — 7 протонов и 7 нейтронов, так что неудивительно, что его общий спин оказался целым и никакой «азотной катастрофы» на самом деле нет.

Свойства протонов и нейтронов оказались очень близкими. У них почти одинаковые массы, одинаковые размеры, одинаковые спины, равные $1/2$, они «на равных» выступают в роли тех «кирпичиков», из которых состоят атомные ядра. Поэтому для них было придумано общее название — *нуклоны* (от английского слова nucleus — ядро).

Главным отличием этих частиц друг от друга является наличие у протонов электрического заряда $+e$, в то время как нейтрон электрически нейтрален. Есть у этих частиц и другие различия, о которых будет сказано ниже.

В настоящее время представление о составе атомных ядер из протонов и нейтронов является общепринятым. Простейшим составным ядром является ядро тяжелого изотопа водорода — *дейтерия*, состоящего из одного протона и одного нейтрона. Дейтерий, который обозначают обычно ${}^2\text{H}$ или ${}^2\text{D}$, был открыт в 1932 г.

американским ученым Г. Юри путем электролиза обычной воды, в которой в количестве примерно $1/5\,000$ доли содержится так называемая *тяжелая вода* D_2O . Ядра атомов дейтерия называют *дейтронами*. Ускоренные на ускорителях дейтроны широко применяются для «обстрела» атомных ядер, и в некоторых случаях являются более эффективным средством для получения и изучения ядерных реакций, чем α -частицы.

Ядерные силы. Но если нейтроны электрически нейтральны, остается прежний вопрос: почему ядро не разлетается под действием сил электростатического отталкивания протонов друг от друга? Для ответа на этот вопрос пришлось предположить, что между протонами и нейтронами действуют какие-то особые силы притяжения, намного превосходящие силы электростатического отталкивания. Эти силы так и были названы *ядерными силами*. Дальнейшие исследования показали, что ядерные силы обладают целым рядом необычных свойств, таких как короткодействие, склонность к насыщению, зависимость от взаимной ориентации спинов частиц, обладают нецентральным характером и многими другими свойствами, резко отличающими их от всех остальных сил в природе. Особенно важно отметить так называемую *зарядовую инвариантность* ядерных сил, т. е. то, что ядерные силы при взаимодействии протона с протоном, протона с нейтроном и нейтрона с нейтроном оказываются одинаковыми. Это еще один факт, позволяющий рассматривать протон и нейтрон в виде одной частицы — нуклона, которая может находиться в двух различных состояниях, отличающихся по электрическому заряду.



Хидоки Юкава

Теория ядерных сил Юкавы. В 1935 г. японский физик Хидоки Юкава попытался построить теорию ядерных сил, которая объяснила бы их короткодействие. Он предположил, что взаимодействие нуклонов в ядре происходит в результате обмена их между собой особыми гипотетическими частицами — мезонами. Экспериментально установленный радиус действия ядерных сил $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см должен быть в этом случае сравним с так называемой комптоновской длиной волны мезона: $r_0 = \hbar/\mu c$, от-

куда можно было вычислить массу мезона μ . Расчеты Юкавы показали, что величина μ должна быть примерно в 200–300 раз больше массы электрона. Поэтому эту частицу и назвали мезоном, поскольку по массе она занимает среднее положение между массой электрона и протона («мезо» по-гречески означает «средний», «промежуточный»). И хотя придуманные Юкавой мезоны были чисто гипотетическими частицами, и в то время их никто экспериментально не наблюдал, идея эта оказалась весьма плодотворной. С помощью мезонов, выступавших в виде квантов ядерного взаимодействия, удалось не только объяснить отдельные свойства ядерных сил, но и некоторые другие факты, например аномальные значения магнитных моментов нуклонов и особый характер рассеяния очень быстрых нейтронов. А спустя несколько лет мезоны были открыты и в ряде экспериментов.

Теория β -распада Ферми. В 1934 г. Энрико Ферми разработал первый вариант теории β -распада. Задача эта осложнялась тем, что не было известно, какими силами вызывается это явление. Ни один из ранее известных видов сил — гравитационные, электромагнитные и даже ядерные — для этого явно не годились.



Энрико Ферми

Поэтому Ферми ввел представление о четвертом виде фундаментального взаимодействия — о так называемом *поле слабых сил*. Об этих силах почти ничего не было известно. И тем не менее Ферми, опираясь на самые общие понятия квантовой механики, не только создал общую теорию β -распада, но и вычислил форму энергетического спектра β -частиц (которая, как отмечалось выше, создавала так много неприятностей физикам-теоретикам) и ввел так называемые *правила отбора Ферми*, которые поз-

воляли отделить *разрешенные* β -переходы от *запрещенных*: вторые отличались от первых значительно большими периодами полураспада при сравнимых энергиях (для некоторых других случаев β -распада были введены другие *правила отбора Гамова—Теллера*). В дальнейшем теория β -распада Ферми была значительно усовершенствована, но основные ее принципы остались прежними.

Первые попытки найти экспериментальные подтверждения существования нейтрино. Напомним, что Паули выдвинул свою гипотезу о существовании нейтрино чисто умозрительно, в качестве догадки для «спасения» законов сохранения энергии и момента количества движения. Никаких прямых экспериментальных данных о существовании этой частицы в то время не существовало. Так может быть она и не существует, а дело здесь совсем в чем-то ином? В то же время, эта гипотеза была весьма плодотворной — ведь именно с ее помощью Э. Ферми создал свою теорию β -распада. Поэтому прямое подтверждение факта существования нейтрино было для физиков очень важным делом. Однако очень скоро стало ясно, что нейтрино обладают очень высокой проникающей способностью. Другими словами, они очень слабо взаимодействуют с веществом, и поэтому зарегистрировать их очень трудно. В силу этого на первых порах усилия физиков были направлены не на то, чтобы зарегистрировать факт прямого взаимодействия нейтрино с каким-нибудь ядром, а хотя бы убедиться в том, что энергетические распределения возникающих при β -распаде ядер отдачи не объясняются вылетом одной только β -частицы, а указывают на то, что вылетает еще какая-то третья частица.

Одним из первых соответствующий опыт осуществил в середине 1930-х гг. советский физик Александр Ильич Лейпунский¹⁾. С помощью относительно простого устройства он измерял энергетический спектр ядер отдачи, образующихся при позитронном распаде ядер ^{11}C . Измеренное экспериментально энергетическое распределение атомов отдачи сравнивалось с кривой, рассчитанной в предположении отсутствия нейтрино. Обнаруженное расхождение этих кривых могло трактоваться как указание на испускание вместе с позитроном нейтрино. Однако недостаточная точность знания спектра позитронов при распаде ядер ^{11}C и трудности измерений самих распределений ядер отдачи с использованием относительно примитивной аппаратуры



Александр Ильич
Лейпунский

¹⁾ После Великой Отечественной войны А. И. Лейпунский до конца жизни был научным руководителем и заместителем директора Физико-энергетического института в г. Обнинске.

(другой в те годы просто не было) не позволили тогда сделать однозначных количественных выводов о существовании нейтрино.

Излучение Черенкова—Вавилова. В 1934 г. аспирант советского физика С. И. Вавилова П. А. Черенков изучал люминесценцию (свечение) растворов, возникающую под влиянием γ -лучей радия. При этом было замечено, что помимо обычной люминесценции, спектр



Сергей Иванович
Вавилов

которой зависит от свойств среды, возникает еще какое-то слабое голубоватое свечение, практически от свойств среды не зависящее. Этот и ряд других фактов привели С. И. Вавилова к заключению о том, что это свечение является не люминесценцией, а световыми волнами, генерируемыми в прозрачной среде летящими через нее быстрыми электронами.

Теория излучения Черенкова—Вавилова была разработана в 1937 г. в работе двух других советских физиков И. Е. Тамма и И. М. Франка. Ее суть сводится к следующему.



Павел Алексеевич
Черенков

Согласно теории относительности, самой большой скоростью в природе является скорость света в вакууме $c = 299\,792$ км/с. Скорости любых частиц с отличной от нуля массой покоя могут сколь угодно близко приближаться к c , но никогда не могут ее превысить. Но это в вакууме. В плотных средах скорости света c' оказываются гораздо меньше, чем в вакууме: $c' = c/n$, где n — показатель преломления света в данной среде. Как известно, для воды $n = 1,33$, а для стекла еще больше — около 1,5. Поэтому очень быстрые заряженные частицы со скоростями, близкими к скорости света, влетая

в плотную среду, могут какое-то время двигаться в ней со скоростью v , *превышающей скорость света в данной среде*: $v > c'$. При этом возникает ударная световая волна, аналогичная ударным звуковым волнам, создаваемым сверхзвуковыми самолетами. Другими словами, быстрые заряженные частицы, летящие в плотных средах со скоростями, превышающими скорость света в данной

среде, испускают световые волны, которые и являются обнаруженным Черенковым излучением. Это излучение можно видеть невооруженным глазом, например, сквозь толщу воды в ядерных реакторах бассейнового типа в виде красивого голубого свечения вокруг тепловыделяющих элементов. В физике излучение Черенкова—Вавилова нашло широкое применение в так называемых черенковских счетчиках, предназначенных для регистрации быстрых заряженных частиц. В таких счетчиках быстрая заряженная частица, влетая в радиатор — блок какого-нибудь прозрачного вещества, — генерирует в нем вспышку света, которая фиксируется с помощью фотоэлектронного умножителя. Естественно, при этом должно выполняться упомянутое выше условие: $v > c'$. Для электронов это условие выполняется уже при энергиях около 10^5 эВ, для протонов, масса которых почти в 2000 раз больше — при энергиях свыше 10^8 эВ.

За открытие и объяснение эффекта Черенкова—Вавилова в 1958 г. П. А. Черенкову, И. Е. Тамму и И. М. Франку была присуждена Нобелевская премия (С. И. Вавилов к тому времени умер, а Нобелевские премии посмертно не присуждаются).

Открытие фотоядерных реакций. В 1934 г. Гольдхабер и Чедвик обнаружили, что при облучении дейтерия γ -квантами с энергией 2,62 МэВ, возникающими при распаде ^{208}Tl , возникали протоны с небольшой энергией 0,2 МэВ. Поскольку водорода в камере не было, это не могли быть протоны отдачи от упругого столкновения с фотонами. Отсюда авторы работы сделали вывод, что протоны возникали в результате расщепления ядер дейтерия γ -квантами: $D + \gamma \rightarrow p + n$. Нейтроны в этом опыте не регистрировались, но из кинематических соображений вполне можно было предположить, что их энергия тоже была порядка 0,2 МэВ. Отсюда следовало, что энергия связи



Игорь Евгеньевич
Тамм



Илья Михайлович
Франк

дейтрона была равна

$$E_{CB}(D) = E\gamma - E_p - E_n = 2,62 - 0,2 - 0,2 = 2,22 \text{ МэВ.}$$

Так была открыта первая ядерная реакция, вызываемая γ -квантами (в дальнейшем такие реакции стали называть *фотоядерными реакциями*) и заодно определена энергия связи дейтрона. Немного позже была открыта еще одна такая же реакция на бериллии: ${}^9\text{Be}(\gamma, n)2\alpha$, для осуществления которой требовалось еще меньше энергии — всего около 1,6 МэВ. А затем в поисках новых фотоядерных реакций наступил длительный перерыв. Дело в том, что только в двух отмеченных ядрах — дейтерии и бериллии — энергии связи столь малы. В остальных ядрах, как отмечалось выше, энергии связи нуклонов значительно больше — порядка 8 МэВ. Но возникающие при радиоактивном распаде γ -кванты имеют энергии не выше 3 МэВ, и поэтому вызвать фоторасщепление других ядер такие γ -кванты не могли. И только после того, как в результате развития экспериментальной техники физики научились получать фотоны значительно больших энергий, были получены и исследованы фотоядерные реакции на других ядрах. При этом довольно быстро было установлено, что форма кривой зависимости эффективных сечений реакции (γ, n) от энергии γ -квантов для всех ядер была практически одинаковой: начиная от некоторого порога, кривая медленно поднималась вверх, проходила плавный максимум, а затем также плавно опускалась вниз. Такая колоколообразная кривая напоминала по форме резонансные кривые из теории колебаний (например, в колебательных контурах различных радиотехнических устройств), поэтому данное явление было названо гигантским дипольным резонансом (значение двух прилагательных в этом названии будет раскрыто ниже). Поскольку общий характер этих кривых у всех ядер был одинаковый (различия замечались лишь в деталях), то было ясно, что в данном явлении проявляются не индивидуальные особенности отдельных ядер, а какие-то общие свойства ядерной материи.

Первый вариант теории фотоядерных реакций разработали советский физик А. Б. Мигдал (1945) и за рубежом независимо от него Гольдхабер и Теллер (1948). Согласно их представлениям, налетающий на ядро фотон своим электрическим полем воздействует на имеющие электрические заряды протоны и несколько смещает их относительно нейтронов. Возникает неравновесная

система, в которой появляются силы, стремящиеся вернуть ее в исходное состояние, и под влиянием этих сил возникают колебания протонов относительно нейтронов, как возникают колебания подвешенного на пружинке грузика, если его оттянуть от положения равновесия, а затем отпустить. Эти колебания будут происходить с некоторой собственной частотой ϖ_0 , определяемой свойствами системы. Но из теории колебаний известно, что они раскачиваются наиболее интенсивно, когда частота возбуждающего воздействия оказывается равной собственной частоте колеблющегося тела: $\varpi = \varpi_0$. Такое совпадение частот называется *резонансом*. Если умножить обе части этого равенства на постоянную Планка, то слева мы получим энергию налетающего фотона, а справа — такое значение этой энергии E_0 , которое соответствует условиям резонанса, т. е. условиям наибольшей вероятности передачи энергии от фотона ядру, что и соответствует максимальному значению эффективного сечения реакции. Колебания протонов относительно нейтронов носят дипольный характер, почему и резонанс был назван дипольным, а гигантским его назвали потому, что по ширине, которая составляет 5–10 МэВ, он на много порядков превышает ширины нейтронных резонансов, о которых речь пойдет ниже. Теория Мигдала не только объяснила происхождение дипольного резонанса, но и количественно описала слабую зависимость положения максимума резонансной кривой от массового числа ядра. Правда, ширину гигантского дипольного резонанса и некоторые более мелкие детали эта теория объяснить не смогла, но в дальнейшем это было сделано с помощью других модельных представлений об атомном ядре.



Эдвард Теллер

Открытия новых частиц в космических лучах. Как отмечалось выше, еще в 1912 г. австрийский физик Гесс обнаружил падающее на Землю из космоса какое-то излучение, природа которого оставалась неясной, хотя большая часть физиков склонялась к тому, что это излучение состоит из потоков электронов и γ -квантов. Но вот в 1925 г. советские физики Л. В. Мысовский и Л. А. Тувим, исследуя уменьшение интенсивности космического излучения в воде Онежского озера, обнаружили, что оно поглощается в 10 раз



Дмитрий Владимирович
Скобельцын

слабее, чем γ -излучение. Таким образом, космическое излучение оказалось сильно проникающим излучением, более проникающим, чем любое другое известное в то время излучение. Этот результат был подтвержден в 1927 г. другим советским физиком Д. В. Скобельцыным. Исследуя комптоновские электроны с помощью камеры Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле, Скобельцын на некоторых снимках увидел треки слабо отклонившихся частиц. Измеренные по кривизне треков импульсы этих частиц ока-



Карл Дейвид Андерсон

зались во много раз больше импульсов частиц от любых радиоактивных излучений, но что это были за частицы, установить тогда не удалось. В 1932 г., с помощью такой же методики (камера Вильсона в магнитном поле), американский физик Андерсон обнаружил в космических лучах положительно заряженный электрон, который был назван *позитроном*. Сразу же было отмечено, что позитрон никогда не возникает один, а только лишь в паре с электроном. Их следы в магнитном поле отклонялись в противоположные стороны, образуя своеобразные «усы». В дальнейшем выяснилось, что электрон-позитронные пары возникают при взаимодействии γ -квантов с полем атомного ядра:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+. \quad (45)$$

При этом γ -квант исчезает, вся его энергия переходит в энергию покоя двух вновь родившихся частиц, а остаток энергии сообщается этим частицам в форме их кинетической энергии:

$$E_\gamma = m_{e^-}c^2 + m_{e^+}c^2 + E_{e^-} + E_{e^+}. \quad (46)$$

Поскольку массы покоя электрона и позитрона равны каждая 0,511 МэВ, процесс рождения пар оказывается возможным лишь при энергиях γ -квантов, превышающих 1,022 МэВ. Позитрон, так же как и электрон, является стабильной частицей. Но при

столкновении позитрона с электроном обе частицы исчезают, а вся их энергия передается двум возникающим γ -квантам:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma. \quad (47)$$

Этот процесс, обратный процессу рождения электрон-позитронных пар, был назван процессом *аннигиляции* частиц.

Следует отметить, что возможность существования положительного электрона была предсказана в 1931 г. Дираком на основе выведенного им уравнения, положившего начало созданию нового раздела физики — *релятивистской квантовой механики*.

Открытие позитронов имело очень большое значение как для теории, так и для понимания свойств космических лучей. Но позитроны, так же как и электроны, быстро поглощались в веществе, и поэтому не могли объяснить высокую проникающую способность космического излучения.



Поль Дирак

Несколько позже был проведен эксперимент, показавший, что космическое излучение состоит из двух компонент. Первая из них, названная «мягкой», почти полностью поглощалась слоем свинца толщиной порядка 10 см. Она состояла из электронов, позитронов и γ -квантов. Вторая — «жесткая» — компонента ослаблялась всего в два раза слоем свинца толщиной около метра. Она-то и была ответственна за высокую проникающую способность космических лучей. Но из каких частиц состояла жесткая компонента?

В 1937 г. Андерсон и Неддермейер обнаружили в космических лучах новые частицы с зарядом таким же, как и у электрона, но с массой приблизительно в 207 раз превышающей массу электрона. Поскольку по массе эти частицы находились между электроном и протоном, их стали называть *мю-мезонами* и обозначать греческой буквой μ (в настоящее время эти частицы называют *мюонами*). Частицы эти оказались нестабильными и со средним временем жизни $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с распадались на электрон и нейтрино: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu$ или $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu$. Но летя со скоростью, близкой к скорости света, мюоны даже за столь малое время жизни успевали пролететь в веществе значительное расстояние. Удельные потери энергии у них незначительные, так как благодаря большой массе

радиационные потери энергии у них невелики, а ионизационные потери энергии — и того меньше. Поэтому проникающая способность мюонов оказалась очень большой, и именно они образуют жесткую компоненту космического излучения.

Но откуда берутся мюоны? Явно, что не из космоса, так как при столь малом времени жизни они не могли преодолевать космические расстояния. Поэтому было выдвинуто предположение о том, что мюоны рождаются в земной атмосфере при взаимодействии с ней прилетающих из космических глубин очень жестких фотонов и электронов. Однако правильный ответ на этот вопрос был получен лишь много лет спустя.

Первоначально полагали, что μ -мезоны — это и есть предсказанные Юкавой мезоны, являющиеся квантами ядерного взаимодействия. Однако вскоре выяснилось, что эти частицы не способны к сильному взаимодействию и поэтому не могут быть частицами Юкавы. Так что вопрос об экспериментальном подтверждении теории Юкавы был на время отложен.

Открытие искусственной радиоактивности. Вскоре после открытия нейтронов, в 1934 г. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри исследовали взаимодействие α -частиц с ядрами алюминия с целью проверить, не возникают ли нейтроны и при таком взаимодействии. Проводя эксперименты с камерой Вильсона, они заметили, что нейтроны действительно возникают, но что кроме них в камере Вильсона появляются очень тонкие следы каких-то частиц, очень похожих на следы β -частиц. Это само по себе было весьма

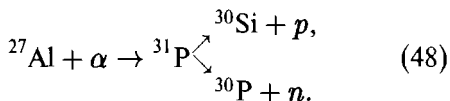


Ирен Жолио-Кюри

странным явлением, так как никаких β -источников в камере не было. Но еще более странным оказалось то, что при помещении камеры Вильсона в магнитное поле эти частицы отклонялись так, как должны отклоняться частицы с положительным зарядом, т. е. это были позитроны. К тому времени позитроны уже были открыты в космических лучах (см. выше), но при ядерных процессах в земных условиях они никогда до этого не наблюдались. И уж совсем странным было то, что позитроны продолжали вылетать

из алюминиевой пластинки в течение некоторого времени после того, как убирали источник α -частиц и ядерные реакции в алюминии, естественно, прекращались.

В то время уже была известна реакция $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$, но при ней возникали стабильные ядра ^{30}Si , и никаких нейтронов не получалось. Для объяснения появления нейтронов были выдвинуты две гипотезы: 1) нейтрон всегда вылетает вместе с протоном, т. е. реакция идет по схеме $^{27}\text{Al}(\alpha, np)^{29}\text{Si}$, а нейтроны раньше просто не замечали, и 2) при попадании α -частицы в ядро алюминия образуется промежуточное ядро фосфора-31, которое может распадаться двумя различными способами:



Фредерик
Жолио-Кюри

Второе предположение казалось менее правдоподобным, так как, во-первых, при нем должны были возникать ядра никому до тех пор неизвестного нуклида ^{30}P , а, во-вторых, промежуточное ядро должно было распадаться двумя различными способами, чего раньше тоже никто не наблюдал. Но именно это предположение и оказалось правильным. А ядра ^{30}P раньше никто не знал потому, что они были нестабильными и распадались с испусканием позитронов $^{30}\text{P} \rightarrow \beta^+ + ^{30}\text{Si}$ с периодом полураспада 2,5 мин. Таким образом, в опытах супругов Жолио-Кюри было установлено сразу несколько фактов:

1. Радиоактивность можно создавать искусственно.
2. Радиоактивность свойственна не только тяжелым элементам (как считалось ранее), но средние и легкие ядра тоже могут быть радиоактивными.
3. У стабильных элементов (фосфор) могут быть нестабильные изотопы.
4. β -распад обладает разновидностью, при которой из ядра вылетают позитроны, которые таким образом связаны не только с космическими лучами, но и с процессами, происходящими на Земле.

5. Составное ядро может распадаться не каким-то одним, а различными способами.

Так были открыты искусственная радиоактивность и позитронный β -распад. Интересно отметить, что чуть позже в том же 1934 г. Энрико Ферми открыл искусственную радиоактивность, возникающую под действием нейтронов (см. с. 113).

Особым видом искусственных радионуклидов являются синтезированные радиоактивные ядра элементов, у которых стабильных изотопов вообще нет, и, следовательно, такие элементы в природе вообще не встречаются — в периодической системе элементов им первоначально оставили пустые клеточки. К таким элементам относятся синтезированный в 1937 г. американскими физиками Э. Сегре и К. Перрье первый полученный искусственно химический элемент технеций ($_{43}\text{Tc}$) и выделенный значительно позже в 1947 г. из продуктов деления урана американскими же учеными Дж. Маринским и Л. Гленденином элемент прометий ($_{61}\text{Pm}$). Самые долгоживущие изотопы этих элементов имеют периоды полураспада $2,6 \cdot 10^6$ лет (^{97}Tc) и 17,7 лет (^{145}Pm). Между этими двумя открытиями в 1939 г. во Франции женщина-физик М. Пере открыла химический элемент, названный ею в честь своей родины францией. Ядра этого элемента хотя и существуют в природе в качестве членов радиоактивных семейств, но из-за крайне малого времени жизни (самый долгоживущий изотоп франция ^{212}Fr имеет период полураспада 23 мин) их содержание столь мало (1 атом франция на $3 \cdot 10^{18}$ атомов урана), что долгое время этот элемент не удавалось обнаружить.

Открытие электронного захвата. Примерно в то же время, когда Лейпунский проводил свои опыты (1936), два японских физика Х. Юкава и С. Саката предсказали возможность захвата ядром одного из электронов из оболочки собственного атома. Этот процесс получил название *электронного захвата* (*E*-захвата), или, поскольку обычно электрон захватывается из наиболее близкой к ядру *K*-оболочки, то его часто называют *K*-захватом (хотя при определенных условиях электроны могут захватываться ядром и из других более далеких оболочек). Отметим, что при *E*-захвате из ядра ничего не вылетает (кроме нейтрино), поэтому, казалось бы, обнаружить этот эффект очень трудно или даже невозможно. Но в 1938 г. он все же был обнаружен американским физиком Л. Альваресом экспериментально. Дело в том, что после захвата электрона,

на его месте остается вакансия («дырка»), которую могут заполнить электроны, переходящие с других оболочек. При таких переходах электронов из одной оболочки в другую испускаются γ -кванты характеристического рентгеновского излучения (см. с. 59), или так называемые Оже-электроны. Вот по ним-то и можно обнаружить E -захват. Легко заметить, что E -захват является процессом как бы обратным по отношению к β -распаду: при нем электрон не вылетает из ядра, а влетает в него. Но превращения нуклонов внутри ядра при этих процессах очень похожи:

при β^- -распаде	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$;
при β^+ -распаде	$p \rightarrow n + e^+ + \nu$;
при E -захвате	$e^- + p \rightarrow n + \nu$

(о различиях обозначений нейтрино будет сказано ниже). Поэтому E -захват рассматривают обычно как третью разновидность β -распада (наряду с β^- и β^+ -распадами).

Исследования свойств нейтронов. Необычные свойства нейтронов привлекли многих физиков к исследованию их свойств. Больше всего в этом отношении удалось сделать итальянским физикам Э. Ферми, Э. Амальди и их сотрудникам. Ими в 1934 г. было установлено, что облучение нейтронами некоторых веществ приводило к тому, что эти вещества становились радиоактивными. Так была открыта *искусственная радиоактивность, вызываемая нейтронами* (вслед за открытием в том же году французскими учеными Ирен и Фредериком Жолио-Кюри искусственной радиоактивности, возникающей совсем в другом процессе — при облучении α -частицами алюминия, о чем говорилось выше). Примером появления искусственной радиоактивности под действием нейтронов может служить реакция радиационного захвата нейтронов ядрами обычного изотопа натрия ^{23}Na , в результате которой возникают ядра радиоактивного изотопа ^{24}Na , распадающиеся путем β -распада с периодом полураспада около



Эдоардо Амальди

15 часов. Таким образом, облучив нейтронами обычную поваренную соль (в состав которой входит натрий), можно получить радиоактивное вещество.

Продолжая опыты с нейтронами, Ферми обнаружил, что при прохождении нейтронов через некоторые легкие вещества (воду или парафин) их способность активировать другие вещества не уменьшалась, а увеличивалась. Почему это происходило? А происходило это потому, что при прохождении через легкое вещество нейтроны сталкивались с ядрами его атомов и отдавали им постепенно свою энергию. Этот процесс был назван *замедлением нейтронов*. Результаты опытов Ферми говорили о том, что замедление нейтронов повышает вероятность проникновения их в ядра различных веществ с превращением их в ядра других радиоактивных нуклидов, или, говоря современным языком, увеличивает величину эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами.

Устанавливая на пути нейтронных пучков перед активируемыми образцами пластинки-фильтры из различных веществ, Ферми обнаружил, что в тех случаях, когда фильтр и образец были сделаны из одних и тех же веществ, наведенная активность образца всегда оказывалась меньше, чем в тех случаях, когда фильтр и образец были сделаны из разных веществ. Отсюда Ферми сделал вывод, что каждое вещество поглощает наиболее интенсивно нейтроны в каких-то определенных «своих» интервалах энергии, пропуская более свободно нейтроны из других интервалов энергии. Так было открыто *резонансное поглощение нейтронов*, что в дальнейшем было подтверждено в более сложных опытах с нейтронными селекторами. Заметим, что нейтронные резонансы оказались очень узкими — их ширина в большинстве случаев не превышала нескольких электронвольт, а то и долей электронвольта.

Продолжая замедляться, нейтроны рано или поздно приходили в равновесие с тепловым движением атомов среды и дальше продолжали двигаться в среднем с постоянной скоростью. Такие нейтроны стали называть «тепловыми» нейтронами. Попутно с проведением экспериментов, Ферми разработал теорию замедления нейтронов и диффузии тепловых нейтронов, оставив целый ряд понятий, названных его именем: уравнение замедляющихся нейтронов Ферми, спектр Ферми, теория «возраста» нейтронов Ферми и др. Таким образом, можно смело утверждать, что именно

Энрико Ферми с сотрудниками заложил основы нейтронной физики, которая со временем нашла практическое приложение при создании ядерных реакторов.

Продолжение исследования ядерной изомерии. Выше отмечалось, как в 1921 г. Хан и Майтнер, работая с ими же открытым элементом протактинием, обнаружили явление, названное позднее ядерной изомерией. В последующие годы долго ничего подобного у других элементов обнаружить не удавалось, и поэтому считалось, что явление изомерии — уникальное свойство одного из изотопов протактиния — ^{234}Pa и свойственно только тяжелым естественно радиоактивным ядрам.

Но в 1935 г. под руководством И. В. Курчатова группа русских физиков в составе Б. В. Курчатова, Л. В. Мысовского и Л. И. Рубина обнаружил аналогичное явление совсем в другой области ядер. Они заметили, что при облучении нейтронами брома, имеющего в естественной смеси два стабильных изотопа — ^{79}Br и ^{81}Br , возникала искусственная радиоактивность, которую можно было легко объяснить образованием в результате радиационного захвата нейтронов ядер искусственных изотопов брома ^{80}Br и ^{82}Br :



Игорь Васильевич
Курчатов

Но при этом наблюдался распад ядер брома не с двумя периодами полураспада, как можно было ожидать, а с тремя: 17,4 мин, 4,4 ч и 1,47 сут. Следовательно, один из вновь образующихся изотопов брома имеет изомеры, распадающиеся с двумя различными периодами полураспада. Для того чтобы установить, с каким именно изотопом связано это явление, был проведен второй эксперимент, заключающийся в облучении образца брома жесткими γ -квантами, которые вырывали из ядер нейтроны:



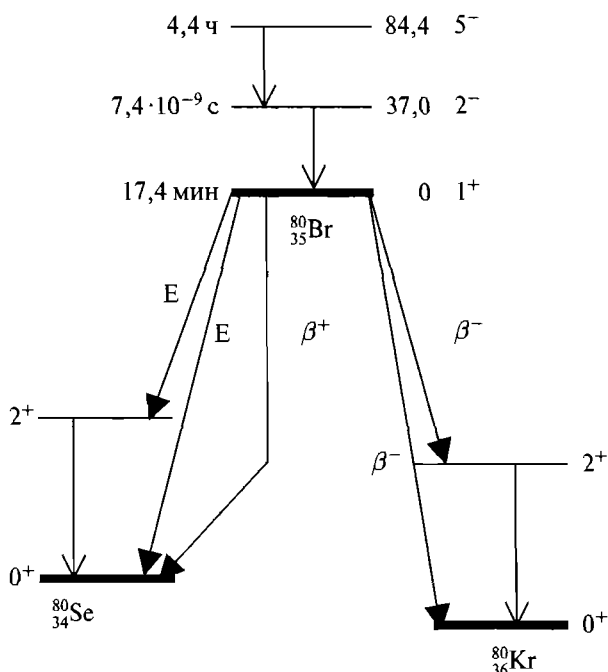


Рис. 7. Схема распада ядер ^{80}Br . Справа от уровней указаны их энергии (в кэВ) и моменты количества движения (I). Значками $+$ и $-$ отмечены состояния, описываемые так называемыми четными и нечетными волновыми функциями соответственно (подробнее о четности см. главу 7)

При этом также наблюдались три периода полураспада: 6,46 мин, 17,4 мин и 4,4 ч. Поскольку в обоих экспериментах возникал один и тот же нуклид ^{80}Br и наблюдались два одинаковых периода полураспада (17,4 мин и 4,4 ч), то отсюда следовало, что именно этот изотоп брома имеет изомеры, распадающиеся с отмеченными периодами полураспада.

Опыты Курчатова положили начало широким исследованиям ядерной изомерии. Оказалось, что природа этого явления связана с различиями значений квантового числа момента количества движения $\Delta I = I_1 - I_2$ у соседних состояний ядра: чем больше это различие и чем меньше разность энергий между этими состояниями, тем больше оказывается время жизни ядра на верхнем уровне. Так, например, у ядер ^{80}Br второй возбужденный уровень с энергией возбуждения всего 84,4 кэВ имеет момент и четность 5^- , тогда

как у основного состояния эти параметры равны 1^+ . Изменение момента ядра на четыре единицы, сопровождающееся изменением четности волновой функции, приводит к сильной задержке его распада. Такие аномально долгоживущие возбужденные уровни ядер стали называть *метастабильными уровнями*, а находящиеся на метастабильных и на основных уровнях ядра — изомерами по отношению друг к другу. Появление у некоторых ядер метастабильных уровней в дальнейшем было объяснено моделью ядерных оболочек. Есть ядра, у которых метастабильные уровни распадаются еще медленнее: так, у ядер нептуния-236 есть метастабильный уровень с периодом полураспада $T = 5\,500$ лет.

Из результатов опытов И. В. Курчатова следовало, что явление ядерной изомерии присуще не только тяжелым природным радиоактивным ядрам, но может наблюдаться также и у значительно более легких ядер. В дальнейшем ядра-изомеры были найдены у очень многих нуклидов с массовыми числами $A \geq 38$.

Модель жидкой капли. Но как расположены протоны и нейтроны в атомном ядре? В 1936 г. Нильс Бор и немецкий физик Вайцсеккер выдвинули самое простое предположение, согласно которому протоны и нейтроны в ядре равномерно перемешаны друг с другом наподобие молекул в капле жидкости. В пользу этого предположения говорил целый ряд экспериментальных фактов. Некоторые свойства ядерных сил (короткодействие, склонность к насыщению) очень похожи на свойства сил, действующих между молекулами в обычных жидкостях. Плотности всех ядер оказались примерно одинаковыми, что говорило о плотной «упаковке» нуклонов в ядрах и практической несжимаемости ядерного вещества, что также напоминает свойства жидкостей. На поверхности ядра, как на поверхности любой жидкости, действуют силы поверхностного натяжения, стремящиеся придать ядру сферическую форму (ср. с формой капель дождя или мыльных пузырей, которые любят выдувать дети).

Модель жидкой капли хорошо сочеталась с выдвинутой Бором концепцией составного ядра. Согласно этой концепции ядерная реакция протекает в две стадии. В первой стадии налетающая частица сливается с ядром-мишенью, в результате чего образуется составное (промежуточное) ядро. Это ядро оказывается в сильно возбужденном состоянии, так как при его образовании выделяется

энергия связи влетевшей частицы, к которой может еще добавиться часть ее кинетической энергии (если частица быстрая). В возбужденном составном ядре все нуклоны энергично движутся, сталкиваются друг с другом и энергично обмениваются при этом энергией — происходит нечто вроде «кипения» ядра. Затем рано или поздно на одной какой-то частице сосредотачивается энергия, превышающая ее энергию связи в ядре, и тогда наступает вторая стадия реакции — частица вылетает из ядра («испаряется»). Такой подход позволил применить к ядру термодинамические представления — ввести понятия температуры, энтропии и т. п., что позволило объяснить многие наблюдаемые явления, например, энергетический спектр испускаемых частиц, который очень напоминает спектр Максвелла для участвующих в тепловом движении молекул жидкости или газа.

Формула Вайцеккера. Несмотря на свою простоту, модель жидкой капли позволила объяснить ряд относящихся к ядру явлений. Так, в том же 1936 г. Вайцеккер вывел формулу для энергии связи ядра, названную его именем:

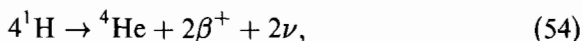
$$E_{\text{св}}(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta(A, Z). \quad (53)$$

Первые три члена этой формулы непосредственно вытекают из модели жидкой капли. Первый из них говорит о том, что благодаря насыщаемости ядерных сил все нуклоны в ядре связаны примерно одинаково, и, следовательно, полная энергия связи ядра оказывается в первом приближении просто пропорциональной числу нуклонов A . Второй член отражает тот факт, что нуклоны, находящиеся на поверхности ядра, связаны слабее, чем нуклоны, находящиеся в середине ядра; такие относительно менее сильно связанные нуклоны уменьшают полную энергию связи ядра, а так как число таких нуклонов пропорционально площади поверхности ядра $S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$, то и весь этот эффект уменьшения энергии связи пропорционален $A^{2/3}$. Третий же член формулы Вайцеккера пропорционален потенциальной энергии электростатического расталкивания протонов, которая уменьшает энергию связи всего ядра. Эта энергия пропорциональна электрическому заряду ядра в квадрате и обратно пропорциональна радиусу ядра, что и определяет вид данного члена.

Последние два члена формулы Вайцзеккера не вытекают из модели жидкой капли и обосновываются другими соображениями, что говорит об ограниченных возможностях этой модели. Однако в дальнейшем модель жидкой капли с успехом применялась для объяснения других явлений. В частности, триумфом этой модели стало объяснение на ее основе процесса деления атомных ядер, о чем будет рассказано в следующей главе.

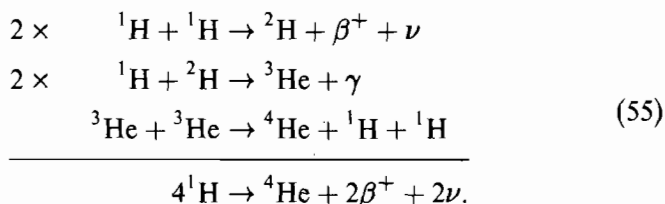
Процесс Оппенгеймера—Филлипса. Теория составного ядра Бора позволила понять протекание многих ядерных реакций. Однако в 1935 г. Оппенгеймер и Филлипс, изучая взаимодействие быстрых дейтронов с тяжелыми ядрами ($Z > 60$), заметили, что наблюдаемые реакции (d, n) и (d, p) ведут себя как-то странно. Согласно теории Бора, при относительно небольших энергиях дейтронов преобладать должна реакция (d, n) , так как нейтрону легче вылететь из ядра, поскольку ему не нужно преодолевать кулоновский потенциальный барьер, как протону. При увеличении энергии дейтронов вероятности этих реакций должны сближаться, так как относительная роль кулоновского барьера будет снижаться, а ядерные свойства протона и нейтрона одинаковы. Однако измерения показали, что при малых энергиях вероятность реакции (d, p) оказывается в несколько раз больше, чем реакции (d, n) , но с ростом энергии вероятности этих реакций действительно сближались. Такое поведение этих реакций невозможно было объяснить в рамках теории Бора. Поэтому Оппенгеймер и Филлипс пришли к выводу, что в данном случае происходит процесс неполного проникновения дейтрона в ядро: при подлете к ядру дейтрон под действием мощного кулоновского поля растягивается, причем нейтрон, не испытывающий кулоновского отталкивания, летит прямо и попадает в ядро, а протон отрывается от него и, так и не попав в ядро, улетает в сторону. Составное ядро при этом не образуется, а нейтрон прямо входит в состав конечного ядра. Поэтому такие реакции стали называть еще и *прямыми реакциями*. Подобные процессы происходят и в других случаях. Так процессы неполного проникновения наблюдаются при столкновениях многозарядных ионов с тяжелыми ядрами. К прямым процессам относится также прямой ядерный фотоэффект, при котором налетающий фотон передает всю свою энергию одному из расположенных на поверхности ядра протонов и вырывает его из ядра, а остающееся ядро оказывается практически «холодным».

Происхождение солнечной энергии. Известно, что наше Солнце, как и большинство других звезд, существует около 10 млрд лет, и в течение всего этого времени непрерывно излучает в мировое пространство громадное количество энергии. Интенсивность солнечного излучения настолько велика, что она приводит к уменьшению массы Солнца на $4,3 \cdot 10^6$ т каждую секунду! Над вопросом о происхождении солнечной энергии люди задумывались давно, но удовлетворительного ответа на него не находили. После открытия ядерных реакций возникла мысль, а не могут ли они быть источником такой энергии. При этом, поскольку Солнце состоит на 90 % из водорода и на 10 % из гелия (примесь остальных элементов не превышает 0,1 %), то главное внимание было уделено поиску возможных процессов с участием этих двух элементов. В принципе, возможен процесс превращения водорода в гелий с выделением энергии около 26 МэВ:



но, как показали расчеты, даже в экстремальных условиях, существующих в центре Солнца (температура 15 млн К, плотность около 100 г/см^3) вероятность такого процесса ничтожно мала, так как трудно ожидать, что четыре протона, преодолевая взаимное отталкивание, смогут строго одновременно столкнуться вместе, да еще чтобы за время этого столкновения успели произойти два акта позитронного распада.

Но в 1938 г. немецкий физик Ханс Бете указал на возможность осуществления этого процесса через последовательность нескольких промежуточных ядерных реакций, имеющих значительно большую вероятность. Так появились два цикла Бете: водородный и углеродно-кислородный. Первый из них выглядит так:



Первые две реакции должны пройти по две, чтобы образовалось два ядра ${}^3\text{He}$ для третьей реакции. В результате происходит тот же процесс образования гелия из водорода, что и отмеченный

выше, и с тем же выделением энергии, но вероятность такого цикла намного больше. Во втором цикле Бете ядра некоторых изотопов углерода, азота и кислорода выступают в роли своеобразных катализаторов: сколько их расходуется, столько же и образуется вновь, а в результате происходит тот же процесс превращения водорода в гелий. Такие ядерные реакции, протекающие при очень высокой температуре, необходимой для придания ядрам энергий, достаточных для преодоления кулоновских барьеров, стали впоследствии называть *термоядерными реакциями*, или *реакциями ядерного синтеза*, поскольку при них происходит процесс образования из простых ядер (протонов) более сложных ядер гелия.



Ханс Бете

Ускорители заряженных частиц. 30-е гг. ознаменовались важным техническим успехом — появились первые ускорители заряженных частиц.

Вообще говоря, первым ускорителем вполне можно считать созданную в 1895 г. рентгеновскую трубку. В ней электроны получали энергию от электрического поля, создаваемого двумя электродами, между которыми поддерживалась высокая разность потенциалов U ; пройдя между этими электродами, электроны приобретали энергию $E = eU$.

Но электроны — частицы, не способные к сильным взаимодействиям, поэтому ядерных реакций они не вызывали и для исследований атомных ядер были мало пригодны. Поэтому физикам приходилось довольствоваться единственным видом имеющихся в природе сильно взаимодействующих с ядрами частиц — α -частицами, возникающими при естественном распаде тяжелых ядер. И как отмечалось выше, с помощью α -частиц был сделан целый ряд выдающихся открытий. Наблюдая рассеяние α -частиц в тонких фольгах, Резерфорд открыл атомное ядро и измерил его размеры; затем, изучая взаимодействие α -частиц с ядрами азота, тот же Резерфорд обнаружил первую ядерную реакцию; ученик Резерфорда Чедвик, облучая α -частицами ядра бериллия, открыл нейтроны, а супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили возникающую при облучении α -частицами алюминия искусствен-

ную радиоактивность. Но возникающие при распаде естественных радиоактивных нуклидов α -частицы обладают энергиями в очень узком диапазоне — от 4 до 9 МэВ. С такими энергиями α -частицы не могут преодолеть мощное электростатическое отталкивание от зарядов средних и тяжелых ядер: так, для проникновения в ядро урана α -частица должна иметь энергию свыше 20 МэВ. Это обстоятельство сильно ограничивало возможности использования α -частиц для исследований таких ядер. К тому же было интересно узнать, как будут взаимодействовать с ядрами другие частицы — протоны, дейтроны (ядра тяжелого изотопа водорода — дейтерия) или ядра друг с другом — скажем, ядра кислорода с ядрами урана. Но такие частицы вообще не возникают при естественном радиоактивном распаде. Следовательно, надо было научиться получать их искусственно. И такая задача была решена.

Первый ускоритель для ускорения протонов был создан в 1932 г. в Кавендишской лаборатории английскими физиками Кокрофтом и Уолтоном. По принципу действия он напоминал рентгеновскую трубку, только вместо катода использовался источник ионов, а высокое напряжение между источником и мишенью создавалось с помощью каскадного генератора со схемой умножения напряжения Грейнахера. На этом ускорителе Кокрофт и Уолтон осуществили первую ядерную реакцию ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$, вызванную искусственно ускоренными протонами. Этот результат имел громадное значение, так как, во-первых, он доказал возможность получения искусственно ускоренных заряженных частиц любых типов, а во-вторых, подтвердил предположение о том, что и протоны могут вызывать ядерные реакции. К концу



Джон Дуглас
Кокрофт

1932 г. аналогичные установки были созданы в Харьковском физико-техническом институте и на них также были осуществлены реакции по расщеплению ядер лития (А. Вальтер, А. Лейпунский, К. Синельников и др.). Несколько позже для получения высоких напряжений стали использовать и установки других типов — например, разработанный еще в 1929 г. генератор Ван де Граафа. Построив такой генератор с диаметром высоковольтного электрода

1 м, американский физик Тьюв в 1933 г. впервые на установке этого типа расщепил атомные ядра ионами, ускоренными до 600 кэВ.

Но работать с высокими напряжениями не всегда удобно, да и здесь имеются свои ограничения — так, получить напряжение выше 2 млн Вт в то время было серьезной проблемой. Поэтому еще в 1924 г. Изинг предложил использовать относительно небольшие разности потенциалов, но прикладывать их к электродам, между которыми пролетают частицы, много раз. Впервые осуществить эту идею удалось в 1928 г. немецкому физiku Видерое, который построил линейный ускоритель в виде стеклянной трубы, внутри которой по центру располагались одна за другой три полые металлические трубки. Крайние трубки заземлялись, а на среднюю подавалось высокое напряжение от высокочастотного генератора. Длина средней трубки и частота генератора подбирались так, чтобы частица, получив в первом зазоре между трубками небольшую порцию энергии, подлетала к следующему зазору за время, равное половине периода работы генератора и, оказавшись опять в ускоряющем поле, получала следующую порцию энергии. Для успешной работы такой системы требовалось, чтобы между скоростью движения частицы и частотой генератора поддерживалось строгое соответствие, т. е. чтобы частица находилась в резонансе с высокочастотным полем. Поэтому такой принцип ускорения стали называть резонансным, а соответствующие ускорители — резонансными ускорителями. В установке Видерое ускоряющее напряжение имело амплитуду 25 кВ и прошедшие два ускоряющих промежутка ионы натрия имели энергию всего 50 кэВ, но в ней впервые экспериментально была доказана возможность резонансного ускорения ионов.



Эрнест Томас
Синтон Уолтон

Немного позже американский физик Лоуренс построил резонансный ускоритель с трубкой длиной 114 см с 30-ю ускоряющими промежутками. В этой установке использовалось высокочастотное напряжение с частотой 10 МГц и амплитудой 42 кВ, и пойдя через все ускоряющие промежутки, ионы ртути ускорялись до энергии 1,26 МэВ.

Для получения с помощью линейного ускорителя больших энергий пришлось бы делать трубки колоссальной длины. Поэтому Лоуренс решил построить ускоритель всего с одним ускоряющим промежутком между двумя полыми электродами, по форме напоминавшими слегка раздвинутые половинки разрезанной по диаметру



Эрнест Орландо
Лоуренс

круглой металлической банки. Эти электроды стали называть дуантами. Источник ионов располагался в центре между дуантами, а вся эта система помещалась в зазоре между полюсами большого магнита. К дуантам подключался высокочастотный генератор. Вылетев из источника, ион получал в зазоре между дуантами определенную порцию энергии и, влетев в дуант, двигался под действием магнитного поля по дуге окружности по инерции (внутри дуанта электрического поля, естественно, не было). За время движения иона внутри дуанта электрическое поле в зазоре успевало измениться на проти-

воположное, так что ион, снова попав в ускоряющий промежуток, получал новую порцию энергии, и, влетев во второй дуант, двигался по дуге несколько большего радиуса, но и с большей скоростью, так что снова попав в промежуток между дуантами, он опять оказывался в ускоряющем поле и получал новую порцию энергии. Двигаясь по спирали дальше, он постепенно долетал до края дуанта, имея уже довольно большую энергию. Действующий по этому принципу ускоритель получил название *циклотрона*. Первую модель циклотрона Лоуренс построил в 1931 г., а уже в 1939 г. он создал циклотрон с диаметром полюсов магнита 150 см, который был способен ускорять дейтроны до энергии 16 МэВ. В том же 1939 г. под руководством И. В. Курчатова был сооружен первый циклотрон в России.

И, наконец, в 1940 г. американский ученый Д. Керст построил для ускорения электронов ускоритель совершенно нового типа, названный *бетатроном*. В нем ускорение электронов осуществлялось вихревым электрическим полем, возникавшим в результате индукции при быстром изменении магнитного поля. Первый бетатрон Керста располагался на обычном столе и ускорял электроны до энергии 2,3 МэВ. В дальнейшем были построены бетатроны, ускорявшие электроны до значительно более высоких энергий —

вплоть до 20 МэВ (1942). Ускорители электронов были интересны для физиков-ядерщиков тем, что они позволяли путем торможения электронов в мишенях получать мощные потоки так называемого *тормозного излучения*, состоящего из фотонов, максимальная энергия которых равнялась энергии ускоренных электронов. Такие фотоны позволяли получать и исследовать фотоядерные реакции на любых ядрах.

Таким образом, на протяжении 30-х гг. физики получили в свои руки ускорители заряженных частиц сразу трех типов: высоковольтные, резонансные и индукционные, с помощью которых они могли получать пучки разных частиц, ускоряемых до энергий, достаточных для проникновения в любые ядра, вплоть до самых тяжелых. Это значительно расширило возможности экспериментальных исследований атомных ядер.

Некоторые итоги. Итак, к концу 30-х гг. XX в. физики получили довольно много данных об атомных ядрах. Было установлено, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Были созданы первая теория ядерных сил и первая модель атомного ядра — модель жидкой капли. В дополнение к электрону и протону был открыт целый ряд новых элементарных частиц — нейтрино, нейтрон, позитрон, мюон. Были осуществлены новые типы ядерных реакций, вызываемых нейтронами, протонами, дейтронами, фотонами. Была существенно усовершенствована техника физического эксперимента и, в частности, созданы первые ускорители заряженных частиц.

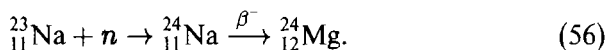
В то же время, видя на примере многих процессов — радиоактивного распада и ядерных реакций, что ядра содержат громадные запасы энергии, физики не видели возможностей извлечь эту энергию в больших масштабах, достаточных для удовлетворения растущих потребностей человечества в энергии. В некоторых ядерных реакциях в расчете на одно ядро энергии выделялось в миллионы раз больше, чем при любой химической реакции в расчете на один атом. Но для того, чтобы такую реакцию осуществить, надо было сначала получить пучки частиц, способных ее вызвать, а с учетом крайне малой вероятности попадания частицы в ядро, энергии на создание таких пучков приходилось затрачивать во много раз больше, чем выделялось энергии при самой реакции. Поэтому многие ученые крайне скептически относились к перспективам развития ядерной физики, поскольку, как им казалось,

от нее вряд ли можно ожидать чего-нибудь полезного. И даже великий Резерфорд, так много сделавший для развития ядерной физики, до самой своей смерти в 1937 г. был уверен в том, что люди так никогда и не получат ядерную энергию в свои руки. Но уже в следующем 1938 г. было сделано открытие, опровергнувшее эти пессимистические прогнозы.

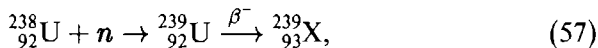
От ядерной физики к ядерной технике (середина XX века)

Открытие деления ядер урана. Одно из величайших открытий XX в. — открытие деления ядер урана, — как и большое число других открытий в науке, было сделано случайно в процессе поиска совсем другого явления.

Вскоре после открытия в 1932 г. нейтрона было обнаружено, что при попадании этой частицы в атомное ядро возникает новое ядро, которое, оказавшись перегруженным нейтронами, становится нестабильным, и в результате β^- -распада превращается в ядро элемента с порядковым номером на единицу больше исходного. Конкретным примером такого процесса может служить реакция превращения натрия в магний:



Это обстоятельство натолкнуло физиков на мысль о возможности получения из самого тяжелого природного элемента — урана — еще более тяжелых элементов, не существующих на Земле в естественных условиях. При этом предполагалось, что процесс пойдет по аналогичной схеме:



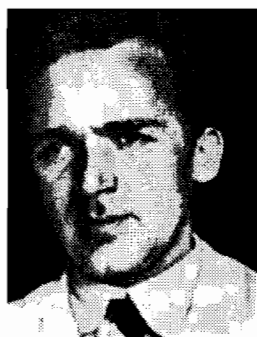
в результате чего должен был появиться новый, доселе неизвестный 93-й элемент X . Опыты по облучению урана нейтронами проводили Э. Ферми, Жолио-Кюри и многие другие физики. Было обнаружено, что в результате облучения урана нейтронами действительно возникала β -активность, но ее поведение во времени оказалось весьма странным — оно явно не следовало экспоненциальному закону, по которому происходит любой радиоактивный распад.

Интересно отметить, что еще в 1934 г. в Германии женщина-физик Ида Ноддак пришла к заключению, что эти явления можно

объяснить делением ядер урана на части. Но это предположение казалось столь невероятным, что оно не нашло поддержки у других физиков, в том числе и у Отто Хана, к которому обратилась Ида Ноддак за консультацией. Все же она опубликовала в одном из химических журналов статью с изложением своей гипотезы, но и эта статья осталась незамеченной. Возможно, что это произошло еще и потому, что, как с юмором заметил Ю. Б. Харитон, «физики не читают химические журналы». Во всяком случае, данное обстоятельство сработало на благо человечества, потому что, если бы в условиях готовящейся к захвату мира фашистской Германии статья И. Ноддак была оценена по достоинству, то еще неизвестно, по какому пути пошла бы история.

Очень близко к открытию деления подошли Ирен Жолио-Кюри и П. Савич. Как писал А. Абрагам, «Ирен Жолио наблюдала (в 1938 г.), что химические свойства некоторых предполагаемых трансурановых элементов, полученных при облучении урана нейтронами, поразительно похожи на свойства лантана; но, как и другие крупные радиохимики того времени, она не смогла сделать последнего решающего шага и признать, что то, что так смахивало на лантан, и есть лантан, и тем самым прошла мимо открытия ядерного деления, наложившего неизгладимую печать на XX столетие».

Этот последний шаг сделали в конце 1938 г. немецкие ученые Хан и Штрассман, которые радиохимическими методами показали, что при облучении урана нейтронами возникает не один, а много



Фриц Штрассман

различных радионуклидов, каждый из которых распадался со своим периодом полураспада, из-за чего общий спад активности во времени и не следовал экспоненциальному закону. Но самым удивительным было то, что эти β -активные нуклиды проявляли химические свойства не те, которые можно было ожидать от урана и следующих за ним элементов, а те, которые характерны для элементов со средними атомными массами, таких как барий, стронций, цезий, цирконий, лантан и др. Статья Хана и Штрассмана об их открытии была датирована 22 декабря 1938 г.

Объяснение этому факту дала соотечественница Хана и Штрассмана Лизе Майтнер, которая вместе с О. Фришем в начале 1939 г.

предположила, что нейтрон, попадая в ядро урана, раскалывает его на две примерно равные части, которые и образуют ядра средних по массе элементов. Этот новый процесс ядерного превращения, существенно отличавшийся от всех ранее известных ядерных реакций, и был назван делением атомных ядер. Статья Л. Майтнер и О. Фриша была отправлена в печать 16 января 1939 г. и уже через месяц напечатана в английском журнале "Nature".

Теория процесса деления была разработана в 1939 г. Н. Бором, Уиллером и независимо от них — советским физиком Френкелем на основе модели жидкой капли. Согласно этой теории, при попадании нейтрона в ядро урана последнее возбуждается, начинает колебаться и в какой-то момент времени может принять вытянутую форму. При этом происходит противоборство двух сил: силы поверхностного натяжения стремятся вернуть ядру сферическую форму, а силы кулоновского отталкивания протонов, напротив, стремятся еще больше растянуть ядро. Исход этого противоборства может быть двояким: если «победят» силы поверхностного натяжения, то ядро вернется к сферической форме, а лишняя энергия уйдет из него в виде испущенного γ -кванта — в результате произойдет обычный радиационный захват нейтрона. Если же верх возьмут силы кулоновского отталкивания, то деформация ядра будет увеличиваться, оно примет форму гантели, и при дальнейшем растяжении соединяющая две половинки этой «гантели» перемычка разорвется, после чего две обособившиеся части ядра, которые получили название осколков деления, под действием сил взаимного кулоновского отталкивания разлетятся в противоположные стороны.



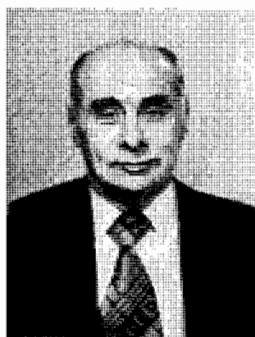
Яков Френкель

Очень скоро был установлен ряд важных фактов. Во-первых, Нильс Бор теоретически предсказал, что под действием медленных нейтронов могут делиться ядра только одного изотопа урана — урана-235, содержащиеся в природном уране в количестве всего 0,7 %, тогда как ядра основного изотопа — урана-238 — способны только захватывать нейтроны без деления. В мае 1940 г., т.е. примерно за 18 месяцев до нападения японцев на Пирл-Харбор и вступления США в войну, ученые Миннесотского университета

методом масс-спектрометрии произвели в ничтожных масштабах разделение двух изотопов урана и экспериментально подтвердили это предсказание Бора. Во-вторых, было установлено, что при делении ядра урана выделяется громадная по ядерным масштабам энергия — около 200 МэВ.

Открытие нейтронов деления. В 1939 г. Жолио-Кюри обнаружил, что при делении, наряду с осколками, выделяются так называемые вторичные нейтроны (первичными называются нейтроны, вызывающие деление). При этом уже первые оценки показали, что в каждом акте деления возникает не один, а два или даже три вторичных нейтрона. Основная масса вторичных нейтронов вылетает из осколков деления очень быстро, примерно за время порядка 10^{-15} с, т.е. практически в то же мгновение, когда происходит деление ядра. Поэтому такие нейтроны стали называть *мгновенными нейтронами* деления. Однако в том же 1939 г. Р. Робертс с сотрудниками обнаружил, что очень малая доля нейтронов (менее одного процента) вылетает спустя значительное время после момента деления. Эти нейтроны получили название *запаздывающих нейтронов*. По оценке Робертса, среднее время запаздывания вылета таких нейтронов составляет около 12,5 с. В дальнейшем оказалось, что запаздывающие нейтроны играют очень важную роль в деле управления работой ядерных реакторов.

Открытие спонтанного деления. В 1940 г. два советских физика Г. Н. Флеров и К. А. Петржак, работавшие под руководством И. В. Курчатова, открыли спонтанное, т.е. самопроизвольное де-



Георгий Николаевич
Флеров

ление ядер урана-238 и измерили его период полураспада, который оказался очень большим — около 10^{16} лет. Теорию спонтанного деления разработал упоминавшийся выше советский физик Френкель, который построил ее по аналогии с теорией α -распада, основываясь на представлениях о туннельном эффекте. В дальнейшем оказалось, что спонтанно делиться могут многие тяжелые ядра. Поэтому спонтанное деление вполне можно считать четвертым видом радиоактивного распада в дополнение к α -, β - и γ -распадам.

Принципиальная возможность цепной реакции деления. Как только стал известен факт появления при делении вторичных нейтронов, физикам стала ясна возможность осуществления *цепной реакции деления*, т. е. саморазвивающегося процесса, при котором выделяющиеся при делении одного ядра нейтроны вызывают деление следующих ядер, при этом возникают новые нейтроны и т. д. Один из первых расчетов цепной реакции деления был сделан советскими физиками Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном в 1939–1940 гг. При этом стало ясно, что такой процесс может развиваться очень быстро, за миллионные доли секунды, т. е. носить характер взрыва. А так как при делении одного ядра выделяется энергия в количестве 200 МэВ, а не 2–4 эВ, как при химических реакциях, в том числе и взрывных, то стала очевидной возможность создания на основе этого процесса оружия колоссальной разрушительной силы. В те годы уже началась Вторая мировая война, в связи с чем вопрос о создании такого оружия приобрел особое значение. Поэтому с начала 40-х гг. все работы по делению урана во всех странах мира были строго засекречены. В связи с этим интересно отметить, что первые две статьи Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона о теории цепной реакции деления ядер урана были напечатаны в журнале «Успехи физических наук» в 1940 и 1941 гг., а третья статья того же цикла появилась в том же журнале лишь через сорок три года после ее написания!



Яков Борисович
Зельдович



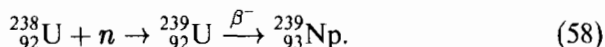
Юлий Борисович
Харитон

Осуществление цепной реакции деления ядер урана. Но для практического осуществления цепной реакции деления было необходимо решить целый ряд проблем. Из-за малого содержания урана-235 цепная реакция в естественном уране невозможна. В принципе можно было попытаться разделить изотопы урана и выделить чистый уран-235 (вспомним, что на возможность разделения изотопов с помощью электрического и магнитного полей

указал еще Томсон в 1911 г.), однако этот метод оказался мало производительным. Поэтому группа физиков из разных стран, собравшаяся в США, под руководством Э. Ферми решила пойти другим путем.

В естественном уране цепная реакция не идет потому, что возникающие при делении быстрые нейтроны, сталкиваясь с ядрами, с гораздо большей вероятностью испытывают акты неупругого и упругого рассеяния, замедляются, и в процессе замедления захватываются ядрами урана-238 без деления. Однако, если дать нейтронам возможность замедлиться до тепловых скоростей так, чтобы они *в процессе замедления не сталкивались с ядрами урана*, то благодаря очень большому сечению деления ядер урана-235 тепловыми нейтронами, процесс цепной реакции становится возможным. Для этого блочки урана надо было разместить в веществе, способном эффективно замедлять нейтроны и мало их поглощать. В качестве одного из таких веществ, называемых *замедлителями нейтронов*, Э. Ферми решил использовать графит. Первая система из графита и блочков естественного урана, названная по-английски *pile* (куча, штабель; в России стали применять термин «котел») была собрана в 1942 г. и на ней **2 декабря 1942 г. впервые в истории человечества была осуществлена контролируемая цепная реакция деления ядер урана**. Мощность этой установки была небольшой, всего несколько ватт, но полученный на ней опыт позволил перейти к постройке больших систем с мощностью, измеряемой тысячами и даже миллионами киловатт, которые стали называть *ядерными реакторами*.

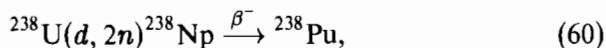
Открытие и получение плутония. Как отмечалось выше, деление ядер урана было открыто в процессе попыток получения более тяжелых элементов. В результате продолжения таких попыток американский физик Макмиллан в 1939 г. синтезировал 93-й элемент, который был назван *нептунием*, причем именно тем путем, которым шли физики до него:



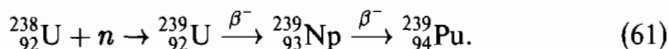
Другой изотоп нептуния был получен путем облучения урана дейтронами с энергией 16 МэВ:



В 1940 г. Макмиллан и Сиборг обнаружили, что в последней реакции в результате β -распада нептуния образуются ядра 94-го элемента — *плутония*:



а в 1941 г. Сиборг и другой американский ученый, итальянец по происхождению, Э. Сегре обнаружили, что и первый изотоп нептуний-239 в результате еще одного акта β -распада превращается в изотоп плутония-239:



Так были открыты первые два элемента, лежащие в таблице Менделеева за ураном и поэтому названные *трансурановыми элементами* (названия этим последним на то время элементам были даны по аналогии с названиями последних планет Солнечной системы: Ураном—Нептуном—Плутоном).

Открытие изотопа плутония-239 имело громадное значение потому, что он оказался столь же хорошо делящимся нуклидом, как и уран-235. Но, в отличие от последнего, это был другой химический элемент, поэтому его можно было выделять из облученного урана обычными химическими методами, не прибегая к дорогостоящим методам разделения изотопов. К концу 1942 г. было собрано около 0,5 мг плутония. Этого количества оказалось достаточно для изучения химических свойств плутония и для разработки методов отделения его от урана в промышленных масштабах. Для производства плутония-239 в количествах, достаточных для создания атомных бомб, американцам потребовались мощные ядерные реакторы, которые были построены в Хенфорде на крайнем западе страны. Эти реакторы давали по несколько граммов плутония в сутки. С их помощью американцам удалось накопить к концу войны достаточное количество плутония-239 для создания первых атомных бомб.

Решение проблемы разделения изотопов урана. Но и от попыток разделения изотопов урана американцы не отказались. Попытки использования для этого электромагнитного метода оказались не очень удачными. Он, правда, дает почти 100 % обогащение за одну стадию, но оказывается чрезвычайно мало производительным. На первых порах для получения 1 мг обогащенного урана



Гленн Сиборг



Эмилио Серге

требовалось несколько месяцев работы. Для повышения производительности были созданы громадные установки с очень мощными электромагнитами массой до 5 000 т и диаметром полюсов 460 см, обмотки которых с целью уменьшения омического сопротивления были сделаны из серебра, для чего потребовалось изъять серебро из форта Нокс — хранилища национальных запасов драгоценных металлов страны. Но производительность даже этих установок была столь низкой, что накопить с их помощью достаточные количества урана-235 за короткое время не представлялось возможным. Поэтому был разработан другой метод разделения изотопов урана, основанный на газовой диффузии. Для его осуществления уран переводился в соединение, называемое шестифтористым ураном UF_6 , которое при температуре выше 56°C превращается в газ. При диффузии через перегородки с мелкими порами, относительно более легкие молекулы $^{235}\text{UF}_6$ двигались несколько быстрее более тяжелых молекул $^{238}\text{UF}_6$, в результате чего, после прохождения сотен таких перегородок,

газ оказывался в значительной степени обогащенным изотопом урана-235. Построенный для реализации этого метода завод в Окридже дал к концу войны количество урана-235, достаточное для одной атомной бомбы.

Создание первых атомных бомб. Для создания атомных бомб американцы построили в малодоступной горной местности в штате Нью-Мексико специальный секретный атомный центр в Лос-Аламосе, в котором всеми работами руководил талантливый физик Роберт Оппенгеймер. К лету 1945 г. удалось собрать три атомных бомбы: одну из обогащенного урана-235, две другие — из плутония. Одна из них была использована для испытательного взрыва в пустыне Невада, а остальные сброшены 6 и 9 августа 1945 г. на японские города Хиросима и Нагасаки, которые были практически полностью разрушены, и общее число жертв исчислялось

сотнями тысяч человек. Сила взрыва каждой из этих первых бомб была эквивалентна 20–22 тыс. тонн обычного взрывчатого вещества — тринитротолуола (ТНТ). Так достижения ядерной физики были впервые практически использованы в военных целях.

Работы над созданием атомного оружия велись и в других странах. Так, во Франции Перрен сделал расчет критмассы и начались работы группы физиков в составе Жолио-Кюри, Халбана, Коварски, Перрена и других над созданием реактора на тяжелой воде. Однако оккупация Франции Германией не позволила довести эти работы до конца. И первый французский тяжеловодный реактор был пущен уже после войны в 1948 г. В самой Германии в 1941 г. физик Боте сделал неверное заключение о невозможности использования графита в качестве замедлителя нейтронов, после чего немецкие ученые также сделали ставку на тяжелую воду. Производили они ее на заводе в оккупированной Норвегии, но диверсия на этом заводе в 1943 г. и затопление немецкого корабля с 10 тоннами тяжелой воды английской подводной лодкой в 1944 г. серьезно задержали работы в Германии над созданием атомной бомбы, которая так и не была сделана.

В СССР в самом начале войны Г. Н. Флеров обратился с письмом к И. В. Сталину, обращая его внимание на необходимость развертывания работ над ядерным оружием. После ряда совещаний в 1942 г. было принято решение о создании в Москве центра работ в данном направлении и о назначении его начальником И. В. Курчатова, который руководил в дальнейшем всеми работами по созданию ядерного оружия. Для осуществления этих работ была собрана мощная группа физиков, многие из которых были отозваны с фронтов. 11 февраля 1943 г. было принято специальное решение ГКО о создании первого в стране научного центра специально для работ по атомной проблеме. Вначале этот центр назывался Лабораторией измерительных приборов № 2 АН СССР (сокращенно ЛИПАН). В нем 25 декабря 1946 г. под непосредственным руководством И. В. Курчатова впервые не только в нашей стране, но и на всем Евро-Азиатском континенте была осуществлена цеп-



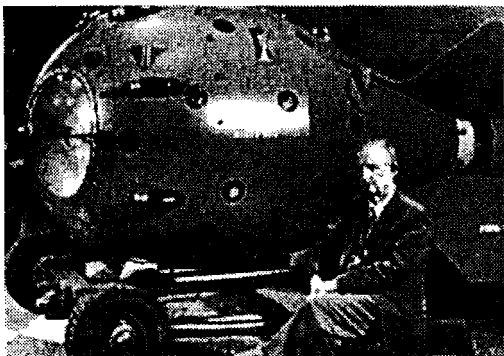
Юлиус Роберт
Оппенгеймер

ная реакция деления ядер урана. В дальнейшем этот центр стал называться Институтом атомной энергии. Для непосредственного создания атомной бомбы был создан другой атомный центр по соседству с городом Арзамасом. Сейчас этот центр называется Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (ВНИИЭФ). Созданное в нем «изделие» было перевезено на полигон под Семипалатинском, и там 29 августа 1949 г. был проведен испытательный взрыв первой советской атомной бомбы РДС-1. Этот взрыв положил конец монополии США на атомное оружие, и, возможно, спас мир от ядерной катастрофы.

Создание термоядерного оружия. Громадные количества энергии, выделяющиеся в недрах звезд в ходе ядерных реакций, в которых водород превращается в гелий, наводили на мысль: а нельзя ли использовать эту энергию для создания нового типа оружия, по силе взрыва намного превосходящего силу взрыва обычных атомных бомб? При этом было ясно, что просто копировать идущие в звездах процессы и невозможно, и не выгодно, так как они идут слишком медленно — миллиарды лет. Надо было найти реакции, протекающие намного быстрее — в миллионные доли секунды. И такие реакции были найдены. Ими оказались давно известные реакции с участием тяжелых изотопов водорода: $D(d, n)^3\text{He}$ и $T(d, n)^4\text{He}$, которые широко использовались физиками для получения нейтронов на ускорителях. Для того чтобы такие реакции могли протекать именно как термоядерные реакции, необходимо было нагреть дейтерий или смесь дейтерия с тритием до сотни миллионов градусов. Такую температуру мог создать взрыв обычной (урановой или плутониевой) атомной бомбы, помещенной в центре баллона, содержащего тяжелые изотопы водорода. В США работы над созданием водородной бомбы проводились, в основном, в Ливерморской лаборатории под руководством Э. Теллера. И 1 ноября 1952 г. американскими физиками был осуществлен первый термоядерный взрыв мощностью 10,4 Мт ТНТ с помощью грандиозного устройства высотой с двухэтажный дом и с массой в несколько десятков тонн. Совершенно очевидно, что для использования в военных целях такое устройство совершенно не годилось.

Параллельно работы над созданием водородной бомбы велись и в нашей стране. Основные расчеты этого «изделия» были выполнены академиком А. Д. Сахаровым. И вот 12 августа 1953 г.

был осуществлен первый опытный взрыв советского термоядерного устройства РДС-6, которое в отличие от американского было вполне пригодно для применения в качестве оружия. 22 ноября 1955 г. на Семипалатинском полигоне с бомбардировщика ТУ-16 была сброшена водородная бомба с мощностью взрыва 1,7 Мт ТНТ, и только 20 мая 1956 г. было проведено первое испытание настоящей водородной бомбы в США. Через несколько лет (30.10.1961) в СССР была испытана и самая мощная термоядерная бомба в мире с силой взрыва, эквивалентной 50 млн тонн ТНТ (этот своеобразный «рекорд» не превзойден и поныне). Над разработкой и созданием ядерного и термоядерного оружия в нашей стране работали такие выдающиеся ученые-физики, как академики Ю. Б. Харитон, А. Д. Сахаров, И. Е. Тамм и многие другие. Благодаря их усилиям наша страна превратилась в мощную ядерную державу, которой не были страшны никакие провокации внешних врагов.

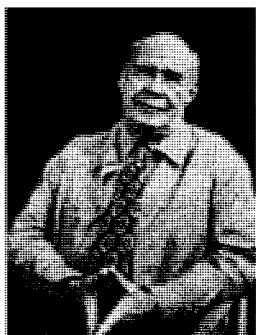


Юлий Борисович Харитон около макета первой советской атомной бомбы

Разработка и создание ядерного и термоядерного оружия в нашей стране работали такие выдающиеся ученые-физики, как академики Ю. Б. Харитон, А. Д. Сахаров, И. Е. Тамм и многие другие. Благодаря их усилиям наша страна превратилась в мощную ядерную державу, которой не были страшны никакие провокации внешних врагов.

Мирное использование ядерной энергии. Параллельно с работами над ядерным оружием, в нашей стране велись работы и над проблемой использования ядерной энергии в мирных целях, в первую очередь — для получения электроэнергии. С этой целью в г. Обнинске в Физико-энергетическом институте, директором которого в то время был член-корреспондент АН СССР Д. И. Блохинцев, под общим руководством И. В. Курчатова была построена и **27 июня 1954 г. введена в строй Первая в мире атомная электростанция (АЭС) мощностью в 5 000 кВт.** Это событие явилось началом развития во многих странах мира новой мощной отрасли промышленности — ядерной энергетики. В настоящее время во всем мире действует более 400 ядерных энергетических реакторов, которые вырабатывают около 17 % всей электроэнергии.

подавляющее большинство энергетических и промышленных реакторов в мире работают на замедлившись тепловых нейтронах,



Дмитрий Иванович
Блохинцев

которые не требуют высоко обогащенного ядерного топлива. Однако американские и советские физики показали, что реакторы, работающие на не замедлившись быстрых нейтронах, обладают целым рядом преимуществ перед тепловыми реакторами. Главное из этих преимуществ заключается в том, что благодаря более выгодному балансу между процессами деления и радиационного захвата нейтронов, в реакторе на быстрых нейтронах можно осуществить процесс расширенного воспроизводства ядерного топлива. При этом процессе в ходе работы реактора не только вырабатывается энергия, но и вос-

создается новое ядерное топливо — плутоний-239, причем в больших количествах, чем «сгорает» ядер первичного топлива. Первый реактор на быстрых нейтронах «Клементина» был запущен в США в 1946 г., но уже через несколько лет в СССР под руководством академика А. И. Лейпунского в Физико-энергетическом институте (ФЭИ, г. Обнинск) была создана целая серия таких реакторов: БР-1 (1955), БР-2 (1956), БР-5 (1959); под научным руководством ФЭИ были построены также реакторы на быстрых нейтронах БОР-60 в Димитровграде (1969), БН-350 в Казахстане (1973) и БН-600 на Белоярской АЭС на Урале (1980). Последний из них с электрической мощностью 600 тыс. кВт продолжает успешно работать и по настоящее время.

Создание и деятельность МАГАТЭ. Для развития международного сотрудничества и помощи отдельным странам в решении их проблем в мирном использовании ядерной энергии, в 1957 г. по инициативе ООН было создано Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) со штаб-квартирой в Вене (Австрия), членами которого являются более 100 государств. Ядерная энергетика — это не только атомные электростанции, но и горнорудная промышленность по добыче урана, обогатительные заводы, заводы по изготовлению оборудования для АЭС и топливных элементов, заводы по переработке отработанного ядерного топлива и многое другое. По всем этим проблемам МАГАТЭ оказывает всестороннюю помощь различным странам, начиная от предоставления научной

и технической информации и кончая содействием получению делящихся материалов и помощью при строительстве ядерных объектов.

Продолжают вносить свой вклад в развитие ядерной энергетики и физики-ядерщики. Дело в том, что для создания новых, более совершенных и безопасных ядерных реакторов непрерывно требуются все новые и новые данные о взаимодействии различных излучений с материалами ядерных реакторов и уточнение уже имеющейся информации. А если вспомнить, сколько имеется разновидностей нуклидов, сколько различных реакций может идти на каждом из них, сколько потребуется точек, чтобы описать зависимость от энергии первичных частиц вероятности каждой из этих реакций, то станет ясно, что речь идет о громадных объемах информации, которые к тому же продолжают непрерывно увеличиваться благодаря труду многочисленных физиков-экспериментаторов в десятках научно-исследовательских институтов мира. Пока таких данных было мало, их публиковали в различных справочниках. Но потом стало ясно, что справиться с такими потоками информации под силу только ЭВМ. Но надо еще обеспечить возможность получения любых добытых сведений всеми специалистами в различных странах мира, которым эти данные нужны. Поэтому в 1963 г. под эгидой МАГАТЭ для выработки наиболее эффективных способов обмена ядерной информацией была создана Международная рабочая группа специалистов, через несколько лет превратившаяся в Международный комитет по ядерным данным (МКЯД). Интересно отметить, что это произошло в разгар «холодной войны» и еще не закончившейся «горячей войны» во Вьетнаме, когда международная обстановка была накалена до предела, а Карибский кризис чуть было не привел мир к всеобщей ядерной катастрофе. И вот именно в этой атмосфере всеобщего недоверия отдельных стран и политиков друг к другу и связанной с этим особенно строгой секретностью, ученые смогли наладить обмен информацией в области, очень близкой к секретам ядерного оружия. Это говорит о том, что настоящие ученые думают, прежде всего, о благе людей и понимают свою гражданскую ответственность за свои действия и при необходимости умеют находить пути для взаимного диалога на пользу всему человечеству.

В настоящее время МКЯД координирует работу целой сети региональных и национальных ядерных центров, которые обмениваются ядерными данными напрямую через электронные носители

информации. Есть такие центры и в нашей стране. Первый из них был создан и функционирует и сейчас в ГНЦ ФЭИ в г. Обнинске, а в работе МКЯД, как и всего МАГАТЭ, на протяжении уже более 30 лет непрерывно принимают участие представители России.

Следует отметить, что ядерно-физические методики находят применение не только в энергетике. Сейчас трудно назвать науку или техническое направление, в которых так или иначе не использовались бы результаты работ физиков-ядерщиков. Химия, биология, геология, медицина, метеорология, астрофизика и даже археология используют методы ядерной физики в своих исследованиях.

Некоторые итоги. Благодаря открытию процесса деления ядер урана, физики-ядерщики получили возможность найти широкое практическое применение результатам своих работ для решения различных задач сначала в военной, а затем и в мирной областях. Возникшая ядерная энергетика и промышленность стали важнейшими и сильнейшими направлениями всего мирового хозяйства. Бурные успехи этих направлений даже породили у части специалистов мнение, что все основные задачи уже решены и больше ядерной физикой заниматься не стоит. Однако после войны и начала постройки атомных электростанций ядерная физика продолжала развиваться и получать важные результаты, направленные на более глубокое понимание свойств атомных ядер и элементарных частиц.

И снова ядерная физика (вторая половина XX века)

Ядерная физика после Второй мировой войны. Если во время войны основная часть ядерно-физических исследований была направлена на военные цели, то после окончания войны вновь проявилось внимание к фундаментальным исследованиям. В значительной мере развитию соответствующих экспериментов способствовало появление в 50-х гг. новых приборов — пузырьковых и искровых камер, черенковских детекторов и многих других с уникальными возможностями. При этом интересы физиков постепенно смещались в сторону более высоких энергий, что стимулировало развитие ускорительной техники и исследований космических лучей. Это, в свою очередь, привело к открытию новых «экзотических» видов радиоактивных превращений и большого числа новых частиц, что породило новое направление в физике — *физику элементарных частиц*, увлекательная история развития которой выходит за рамки настоящей книги. Но одновременно был сделан ряд важнейших открытий и в, казалось бы, хорошо изученной области низких энергий (таких, например, как эффект Мёссбауэра и более глубокое изучение свойств нейтрино). Особое место занимали поиск и изучение свойств новых трансурановых элементов, которых было открыто свыше двух десятков. Благодаря столь широкому диапазону различных исследований, будет целесообразно отойти от строго хронологической последовательности изложения развития событий и рассмотреть каждое направление отдельно. При этом, поскольку большинство новых открытий было сделано с помощью новых ускорителей, именно с их развития мы и продолжим наш рассказ.

Дальнейшее развитие ускорителей. Предельная энергия, достижимая при ускорении протонов в циклотроне, составляет около 25–30 МэВ. Дальнейшее ускорение оказывается невозможным из-

за предсказанного теорией относительности увеличения массы частицы с увеличением скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

По мере увеличения скорости частицы ее масса возрастает, и частица начинает отставать от изменений поля между дуантами циклотрона. В результате, пролетая через ускоряющий промежуток, частица получает все меньшую и меньшую порцию энергии, и, наконец, попадает в щель между дуантами, когда поле в ней уже изменяется на противоположное, т. е. из ускоряющего становится замедляющим. Положение казалось безвыходным, пока советский физик В. И. Векслер и независимо от него американский физик Макмиллан не открыли в 1944 г. *принцип автофазировки*. Оказалось, что можно создать такие условия, при которых частица в процессе ускорения сама «следит» за ускоряющим полем и проскакивает ускоряющий



Владимир
Иосифович Векслер

промежуток в нужной для ускорения фазе. Открытие принципа автофазировки позволило создать целую «семью» ускорителей разных типов — синхротрон, фазотрон, синхрофазотрон, микротрон, линейные резонансные ускорители, — в которых были получены частицы со значительно более высокими энергиями, чем раньше. Так, в 1947 г. заработал первый советский синхротрон, а в 1949 г. в ОИЯИ в г. Дубне под Москвой вступил в строй



Эдвин Маттисон Макмиллан

фазотрон, ускоряющий протоны до энергии 680 МэВ. Его магнит с диаметром полюсов 6 м имеет высоту трехэтажного дома и весит 7 000 т. В 1957 г. в том же институте начал работать синхрофазотрон, ускорявший протоны до 10 ГэВ (10 000 МэВ). Магнит этого ускорителя имеет массу 36 000 тонн.

Дальнейшее увеличение энергии требовало создания еще боль-

ших магнитов, что было весьма затруднительно и дорого. Но в 1950 г. в Греции Н. Кристофилос и в 1952 г. в США Э. Курант, М. Ливингстон и Х. Снайдер разработали *принцип жесткой (сильной) фокусировки*, позволивший существенно уменьшить размеры ускоряющей камеры, а следовательно — и вес магнитов. Первый синхрофазотрон с жесткой фокусировкой начал работать в Женеве в Международном центре ядерных исследований (ЦЕРН). Он ускорял протоны до энергии 29,5 ГэВ, а вес его магнитов составлял всего 4 000 т. В СССР первый ускоритель с жесткой фокусировкой был построен в 1961 г. в Москве. Он явился моделью для постройки самого большого в те годы в мире синхрофазотрона в Протвино под Серпуховым. Кольцо этого гигантского ускорителя имеет длину около 1,5 км. В 1967 г. на нем были получены протоны с энергией 76 ГэВ.

Но, как оказалось, и это еще не предел. В США на синхрофазотроне в Батавии в 1972 г. была достигнута энергия протонов свыше 500 ГэВ, а в России в Протвино начато строительство циклического ускорителя, рассчитанного на получение протонов с энергией 3 000 ГэВ. Диаметр кольца этого ускорителя составляет 6 км и он располагается в туннеле глубоко под землей.

Значительное развитие получили и линейные ускорители. Так, в Харькове был построен *линейный ускоритель электронов* на энергию 1,8 ГэВ (1964), а в Стэнфорде (США) — на энергию 22 ГэВ (1966).

Особое значение, в основном для синтеза ядер трансурановых элементов, приобрели ускорители многозарядных ионов: синхрофазотроны в Дубне (1970 г., 4 ГэВ/нуклон) и в Беркли (1980 г., 2 ГэВ/нуклон), а также линейный ускоритель в Дармштадте (1976 г., 10–14 МэВ/нуклон).

Получение на ускорителях частиц со столь высокими энергиями позволило ядерной физике выйти из первоначально традиционной области низких энергий в область средних, а затем — и высоких энергий. При этом был сделан ряд выдающихся открытий, и, в частности, открыто много новых элементарных частиц. В результате зародившийся в ядерной физике один из ее разделов «физика элементарных частиц» выделился в самостоятельное научное направление, требующее отдельного рассмотрения. А мы продолжим рассказ о развитии традиционной ядерной физики в послевоенные годы.

Продолжение исследований космических лучей. До появления мощных ускорителей космические лучи были единственным источником частиц высоких энергий. Выше отмечалось, как в космических лучах были открыты новые частицы — позитроны и мюоны. Поэтому физики продолжали интенсивные исследования космических лучей, надеясь обнаружить в них еще много интересного. И эти надежды себя вполне оправдали.

Открытие π -мезонов. В 1947 г. английский физик Пауэлл обнаружил в фотоэмульсиях, облученных космическими лучами, следы каких-то новых частиц, распадавшихся на мюоны и, как выяснилось в дальнейшем, особые так называемые мюонные нейтрино.



Сесил Пауэлл

Эти частицы были лишь немного тяжелее открытых ранее μ -мезонов и были названы π -мезонами, или пионами. Годом позже пионы были получены в лабораторных условиях на ускорителе в Беркли (США). Оказалось, что существует три типа пионов, два из них заряженные, а третий — нейтральный. Заряженные пионы распадаются по схеме:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \quad (62)$$

а нейтральные — на два γ -кванта:

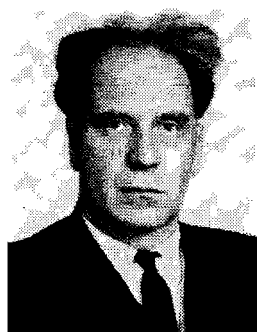
$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma. \quad (63)$$

Время жизни заряженных пионов составляет $2,6 \cdot 10^{-8}$ с, а нейтральных еще меньше: $8,3 \cdot 10^{-17}$ с. По массе заряженные и нейтральные пионы различаются не очень сильно: $m(\pi^\pm) = 139,57$ МэВ, а нейтрального $m(\pi^0) = 134,96$ МэВ. Все они имеют нулевой спин и отрицательную внутреннюю четность и образуют так называемый *изобарический триплет*. Но самым замечательным свойством пионов оказалось то, что они являются сильно взаимодействующими частицами, что позволяет отождествить их с мезонами, предсказанными Юкавой в его теории ядерных сил. Попадая в ядра, пионы расщепляют их на множество осколков, образуя в фотоэмульсиях так называемые «звезды». При этом отрицательные пионы сначала захватываются полем ядра на орбиту, образуя *мезоатом*, а лишь потом поглощаются ядром.

Обнаружение первичной компоненты космических лучей. Открытие пионов объяснило происхождение жесткой компоненты космических лучей, состоящей, как было установлено ранее, из мюонов. Но как в космических лучах возникают пионы? Прилететь из космоса они не могли, так как их время жизни еще меньше, чем у мюонов. В опытах на ускорителях они получаются в результате взаимодействия ускоренных до очень высоких энергий протонов с атомными ядрами. Но при исследованиях космических лучей вблизи поверхности Земли быстрые протоны в них не обнаруживаются. Значит, надо было перенести исследования в высшие слои атмосферы.

Еще в 1942 г. советские физики А. И. Алиханов и А. И. Алиханян организовали первую экспедицию на гору Арагац в Армении на высоту 3 260 м над уровнем моря. Во время этой экспедиции была открыта третья компонента космических лучей, состоящая из протонов. И, наконец, серия опытов, проводившихся в стратосфере под руководством академика С. Н. Вернова в 1949 г., доказала, что приходящее на Землю из далекого космоса первичное космическое излучение состоит, в основном, из протонов с небольшой примесью более тяжелых ядер.

Таким образом, стала ясна общая картина явлений, связанных с космическим излучением, которая схематически выглядит следующим образом. Быстрые протоны и другие ядра из состава первичных космических лучей, попадая в земную атмосферу, сталкиваются с ядрами входящих в ее состав газов и расщепляют их. При этом возникают осколки ядер и быстрые пионы. Заряженные пионы частично расщепляют атомные ядра, а частично распадаются на мюоны и нейтрино, образуя жесткую компоненту космического излучения. Нейтральные пионы распадаются на фотоны и дают начало электрон-фотонной компоненте космического излучения. Электроны и фотоны возникают также при распаде мюонов и при ионизационных и радиационных потерях энергии всеми заряженными частицами. Все эти процессы лавинообразно развиваются, и на земную поверхность обрушиваются широкие ливни частиц, охватывающих площади, измеряемые сотнями и даже тысячами квадратных метров. Изучая



Сергей Николаевич
Вернов

интенсивности таких ливней и энергетические спектры образующих их частиц, легко прийти к выводу, что в составе первичного космического излучения изредка встречаются протоны с энергиями вплоть до 10^{21} – 10^{22} эВ. Это на много порядков больше самой большой энергии, полученной на ускорителях ($500 \text{ ГэВ} = 5 \cdot 10^{11} \text{ эВ}$). Такими образом, первичное космическое излучение и сейчас является для физиков уникальным источником частиц предельно высоких энергий.

Открытие радиационных поясов вокруг Земли. В 1958 г. американский физик Аллен открыл внутренний, а советский физик Вернов — внешний радиационные пояса, состоящие из частиц первичных космических лучей (протонов и электронов), захваченных магнитным полем Земли и вращающихся вокруг нее. Внутренний радиационный пояс состоит в основном из протонов с энергиями от 20 до 800 МэВ и электронов с энергиями от 20 кэВ до 1 МэВ. Этот пояс простирается от высот 200–300 км до 1,5 радиуса Земли. Максимальная интенсивность протонов в нем составляет 10^4 протонов/(см² · с · ср). Внешний пояс расположен на расстояниях от поверхности Земли, равных от 3 до 6 ее радиусов. Он состоит, в основном, из электронов с энергиями от 40 до 100 кэВ, интенсивность которых в максимуме составляет до 10^7 электронов/(см² · с · ср). С радиационными поясами Земли связаны определенные опасности для космонавтов, особенно при межпланетных полетах.

Очень интересным является вопрос о происхождении первичного космического излучения, но это уже совсем другая проблема. А сейчас вернемся с космических высот обратно на Землю.

Опыты Хофстедтера. Используя новый мощный ускоритель электронов на высокие энергии, в начале 1950-х гг. американский физик Хофстедтер провел серию экспериментов по изучению рассеяния быстрых электронов атомными ядрами. Электроны не способны к сильному взаимодействию, поэтому ядерные реакции они не вызывают, но кулоновское взаимодействие электрических зарядов электронов и ядер заставляет электроны отклоняться от своего первоначального пути, и по этому отклонению можно получить информацию о распределении плотности электрических зарядов по объему ядра. При энергии электрона в несколько сотен мегаэлектронвольт его длина волны оказывается порядка 10^{-13} см, т. е.

меньше радиуса средних и тяжелых ядер. Поэтому при таких энергиях электроны «чувствуют» распределение зарядов внутри ядра, что отражается на характере их рассеяния. Сравнивая результаты своих экспериментов по измерениям угловых распределений рассеянных электронов с теоретическими расчетами, Хофстедтер установил, что электрический заряд в ядре распределен не равномерно: в середине ядра имеется область, где плотность зарядов примерно постоянна, а у краев ядра она постепенно спадает до нуля, т. е. края у ядра оказываются «размытыми». Такое распределение заряда может быть описано формулой:



Роберт Хофстедтер

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp \left\{ \frac{r - R_0}{\delta} \right\}}, \quad (64)$$

где ρ_0 — средняя плотность заряда в центре ядра, $\rho(r)$ — плотность заряда на расстоянии r от центра ядра, $R_0 = 1,08 \cdot 10^{-13}$ А^{1/3} см — средний радиус ядра и $\delta = 0,55 \cdot 10^{-13}$ см — ширина области «размытости» края ядра. Этот факт противоречит представлениям о ядре, как о капле жидкости, но зато он очень хорошо согласуется с созданными позже оптической моделью ядра и моделью ядерных оболочек.

В дальнейших опытах энергия электронов была увеличена до 10–20 ГэВ, чему соответствовала длина волны 10^{-15} см. Это позволило исследовать структуру нуклонов и измерить их так называемые форм-факторы.

Дальнейшие исследования β -распада. Выше уже отмечалось, сколь сложным явлением является β -распад. Продолжение исследования этого явления в послевоенные годы привело к новым замечательным открытиям.

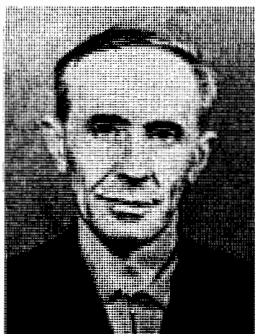
β -распад свободных нейтронов. Поскольку масса нейтрона (1,008665 а. е. м.) несколько превышает суммарную массу протона и электрона (1,007825 а. е. м.), то в принципе оказывается возможным процесс β -распада свободного нейтрона с превращением

избытка массы в энергию разлетающихся частиц:

$$n \rightarrow p + e + \nu.$$

Но как обнаружить этот процесс? И главное — как для этого изготовить «образец» из нейтронов, которые благодаря своей высокой проникающей способности свободно проходят через любые материалы? И все же почти одновременно в 1948 г. Снеллу и Миллеру и в 1949 г. советскому физики Спиваку удалось наблюдать распад свободного нейтрона.

В эксперименте Спивака узкий пучок выходящих из ядерного реактора тепловых нейтронов пропусклся через специальную камеру, представлявшую собой электрический конденсатор с изогнутыми особым способом пластинами. Хотя нейтроны и пролетали



Петр Ефимович
Спивак

через эту камеру со скоростями порядка 2 200 м/с, в любой момент времени между пластинами конденсатора находилось какое-то число нейтронов. Вот вам и нейтронный «образец»! В одной из пластин конденсатора находилось небольшое окошко, затянутое тонкой пленкой, за которым помещался детектор протонов. На противоположную пластину подавался высокий положительный потенциал около 20 кВ. Если в процессе пролета между пластинами какой-нибудь нейтрон распадался на лету, то образовавшийся при этом протон электрическим полем вгонялся через пленку в детектор и вызывал в нем появление электрического импульса. Так можно было не только зарегистрировать сам факт распада нейтронов, но и определить их период полураспада, который оказался близким к 10,5 мин. β -распад свободных нейтронов является простейшим видом этого явления, не искаженным различными внутриядерными явлениями, имеющими место при β -распадах сложных ядер. Поэтому его открытие и исследование имело громадное значение для изучения β -распада в целом.

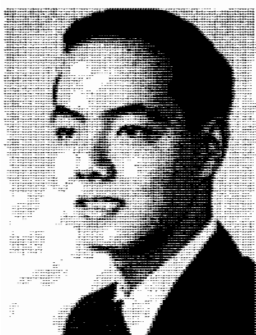
Несохранение четности при β -распаде. Все волновые функции квантовой механики подразделяются на два больших класса в зависимости от того, как они ведут себя при инверсии (изменении

Несохранение четности при β -распаде. Все волновые функции квантовой механики подразделяются на два больших класса в зависимости от того, как они ведут себя при инверсии (изменении

направления) координатных осей: если при такой операции функция ψ не изменяет знак, то она называется *четной*, если знак изменяется на противоположный — то функция называется *нечетной*. Соответственно называются и состояния ядер и других систем частиц, в зависимости от того, какими функциями они описываются, причем четные состояния обозначаются значком «+», а нечетные значком «-», которые пишутся обычно справа сверху от квантового числа момента количества движения, например, так: 0^+ , 0^- , 2^+ , 1^+ , 1^- , $1/2^+$, $1/2^-$ и т. д. Для удобства четность стали обозначать особым символом π , который может иметь только одно из двух значений: $\pi = +1$ для четных состояний, и $\pi = -1$ — для нечетных. Если система состоит из нескольких частиц a , b , c , то ее четность определяется произведением четностей отдельных частиц и функции f , описывающих их движение: $\pi = \pi_a \pi_b \pi_c \pi_f$.

С 1925 г., когда был открыт закон сохранения четности, и до 1956 г. считалось, что четность является такой же сохраняющейся величиной, как энергия, импульс, момент количества движения и др. Поэтому, если происходит распад $a \rightarrow b + c$, то должно выполняться равенство: $\pi_a = \pi_b \pi_c \pi_{bc}$, где π_{bc} — четность волновой функции, описывающей движение частиц b и c относительно друг друга. Этот закон сохранения четности был многократно проверен в случаях сильных и электромагнитных взаимодействий и считался столь же незыблемым, как и другие законы сохранения физических величин. Но в 1956 г. было обнаружено, что так называемые К-мезоны (каоны) способны распадаться либо на два, либо на три π -мезона, причем последние две системы обладали различной четностью. Отсюда следовал вывод о том, что, по крайней мере, при некоторых распадах каонов, четность не сохранялась.

Распад каонов относится также к слабым взаимодействиям, как и β -распад. Было высказано предположение, что при всех слабых взаимодействиях четность не сохраняется. И вот в 1956 г. два американских физика-теоретика китайского происхождения Ли Цзун-дао и Янг Чень-нин показали, что теорию β -распада можно построить и без опоры на закон сохранения четности. Созданная ими новая теория β -распада описывала все известные до этого экспериментальные факты (форму спектра β -частиц, правила отбора для разрешенных переходов и др.) так же, как и старая теория, поэтому результаты прежних опытов не позволяли решить вопрос о том, какая из двух теорий правильна. Для проверки новой теории



Ли Цзун-дао



Янг Чень-нин

было необходимо найти какое-то новое явление, которое старая и новая теория описывали бы по-разному. Ли и Янг предложили схему возможного опыта, который смог бы показать, сохраняется четность при β -распаде или нет.

Такой опыт был осуществлен в 1957 г. в США женщиной-физиком, также китайской по происхождению, мадам Ву Цзяньсюн. Цель этого опыта состояла в измерении углового распределения β -частиц относительно направления спина исходных ядер ^{60}Co . Ориентация спинов ядер осуществлялась помещением образца в сильное магнитное поле, а чтобы тепловое движение не расстраивало эту ориентацию, образец охлаждался до температуры почти абсолютного нуля: $T = 0,01$ К. В результате измерений была обнаружена асимметрия вылета β -частиц: против направления спинов ядер вылетало больше частиц, чем по направлению спинов. Эта асимметрия подтверждала несохранение четности при β -распаде. В дальнейшем было установлено, что и при

других видах слабого взаимодействия четность не сохраняется, тогда как для сильных и электромагнитных взаимодействий закон сохранения четности считается справедливым и сейчас.

Продолжение поисков нейтрино. Открытие К-захвата помогло несколько лет спустя, в 1942 г., американскому физiku Аллену, использовав по существу идею Лейпунского, дополненную предложениями других советских физиков А. И. Алиханова и А. И. Алиханяна, получить более убедительные доказательства существования нейтрино. В отличие от Лейпунского, Аллен использовал нуклид ^7Be , ядра которого, испытав К-захват, превращаются в ядра лития. Это намного облегчило эксперимент и повысило достоверность получаемых результатов. Во-первых, при К-захвате из ядер не вылетают никакие заряженные частицы, что способствовало значительному уменьшению фона установки. Во-вторых, если нейтрино нет, то из ядра при К-захвате не вылетали бы вообще никакие

частицы, и оно оставалось бы на месте, поэтому сам факт обнаружения ядер отдачи при K -захвате однозначно указывал на то, что какая-то частица из ядра вылетает. В третьих, в отличие от других видов β -распада, при K -захвате образуются не три частицы (ядро отдачи, электрон и нейтрино), а только две (ядро отдачи и нейтрино), поэтому энергия распределяется между ними *однозначно* (как при α -распаде). Зная энергию, освобождающуюся при захвате электронов ядрами ${}^7\text{Be}$ (0,864 МэВ), и используя закон сохранения количества движения, Аллен рассчитал, что если нейтрино существует, то должны возникать ядра отдачи лития-7 с энергией 57,3 эВ, что прекрасно совпадало с измеренной им энергией вылетающих из образца ядер отдачи лития ($56,6 \pm 1,0$) эВ.

Таким образом, результаты опытов Лейпунского и особенно Аллена дали весьма убедительные подтверждения гипотезе существования нейтрино. Но все же это были косвенные доказательства. Поэтому задачу регистрации нейтрино, т. е. обнаружения факта взаимодействия нейтрино с какой-нибудь другой частицей или с ядром, еще предстояло решить.

Оценка массы нейтрино. С самого начала появления гипотезы о существовании нейтрино было ясно, что масса покоя этой частицы если и отлична от нуля, то, во всяком случае, очень мала. Это следовало из того факта, что измеряемая экспериментально максимальная энергия β -частиц прекрасно соответствовала разности масс исходного и конечного атомов:

$$E_{\beta}^{\max} = Q_{\beta} - E_{\text{я.о.}} = M_1 - M_2 - E_{\text{я.о.}}, \quad (65)$$

в то время как если бы масса нейтрино имела заметную величину, то максимальная энергия β -частиц была бы несколько меньше:

$$E_{\beta}^{\max} = M_1 - M_2 - E_{\text{я.о.}} - m_{\nu}. \quad (66)$$

Обнаружить отличие максимальной энергии β -частиц от значения, даваемого формулой (65), очень трудно, так как на конце β -спектра частиц мало, статистические ошибки относительно велики, и при наличии фона посторонних импульсов (который всегда есть) определить точно максимальную энергию β -частиц очень трудно. Но именно на поиске отклонения экспериментальных данных от результатов расчетов по соотношению (65) и были основаны все попытки оценки массы нейтрино.

Массу элементарных частиц часто выражают в единицах энергии, используя для этого известное соотношение теории относительности $E = mc^2$. Напомним, что в этих единицах масса покоя электрона равна 511 кэВ. Первую оценку массы покоя нейтрино



Бруно Максимович
Понтекорво

описанным выше методом сделал в 1949 г. итальянский физик Бруно Понтекорво, показавший, что $m_\nu < 1$ кэВ. В дальнейшем, по мере развития экспериментальной техники, верхняя граница оценки массы нейтрино постепенно снижалась, и в 1976 г. в московском ИТЭФ группой Третьякова был получен результат: $m_\nu < 35$ эВ. В 1980 г. в том же ИТЭФ группой Любимова был проведен эксперимент, на основании результатов которого был сделан вывод о том, что масса покоя нейтрино существенно отличается от нуля: $(28 \leq m_\nu \leq 41)$ эВ, однако этот результат

пока не подтвержден другими исследованиями. Согласно данным, полученным при изучении так называемого двойного β -распада (см. ниже), $m_\nu < 5$ эВ. Некоторые физики считают, что массы покоя нейтрино и антинейтрино точно равны нулю, и что эти частицы, являющиеся квантами поля слабых сил, больше похожи на γ -кванты, чем на другие частицы с отличными от нуля массами покоя. В целом приходится признать, что вопрос о том, есть ли у нейтрино отличная от нуля масса покоя, пока остается открытым. В то же время, решение этого вопроса имеет большое принципиальное значение не только для ядерной физики, но и для некоторых смежных направлений науки, например — для астрофизики, потому что, если масса покоя нейтрино действительно превышает 30 эВ, то согласно модели горячей Вселенной, общая масса всех нейтрино во Вселенной более чем на порядок превышает массу всего остального вещества. Это, в свою очередь, ведет к фундаментальным космологическим и астрофизическим следствиям. Следует отметить, что для масс покоя введенных впоследствии так называемых мюонных и таонных нейтрино и антинейтрино существуют лишь весьма приблизительные верхние оценки, но этот вопрос относится уже к физике элементарных частиц.

Частицы и античастицы. Открытый Андерсеном позитрон (см. с. 108) был первой обнаруженной античастицей по отношению

к известной ранее «частице» — электрону. Помимо различия знаков электрического заряда, пары «частица — античастица» обладают более глубоким различием, заключающимся в их способности к аннигиляции, т. е. взаимному уничтожению при столкновениях с передачей всей их энергии, включая и энергию покоя, двум γ -квантам: $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$. В дальнейшем была обнаружена еще одна подобная «парочка» — положительно и отрицательно заряженные мюоны: μ^+ и μ^- . У всех этих частиц спины равны $1/2$. Это наводило на мысль о существовании античастиц у всех частиц со спином $1/2$. И действительно, в опытах на ускорителе при энергии ускоренных протонов 6,3 ГэВ в 1955 г. были открыты *антипротоны* (О. Чемберлен, Э. Сегре и др., Беркли, США), а в следующем 1956 г. — *антинейтроны* (Б. Корк, Г. Ламбертсон и др., США). У нейтрино спин тоже равен $1/2$, следовательно, и у этой частицы может быть античастица. Это обстоятельство необходимо было принять во внимание при разработке методов регистрации взаимодействия нейтрино с веществом.

Регистрация взаимодействия нейтрино с веществом. Описанные выше опыты Лейпунского и особенно Аллена косвенно подтвердили факт существования нейтрино путем наблюдения ядер отдачи. Но это не были опыты по регистрации нейтрино, поэтому они ничего не говорили о том, может ли нейтрино взаимодействовать с веществом, и если да, то какова вероятность этого взаимодействия.

Предсказание возможности взаимодействия нейтрино с протонами основывалось на так называемой «алгебре частиц» — установленные ранее правилах, согласно которым, если известно, что с участием частиц a, b, c, d может происходить процесс

$$a + b \rightarrow c + d, \quad (67)$$

то возможен и обратный процесс

$$c + d \rightarrow a + b, \quad (68)$$

а также и любой другой процесс, схема которого получается из вышеприведенных схем переносом любой частицы из одной части записи в другую с заменой ее на соответствующую античастицу, например:

$$d \rightarrow a + b + \bar{c}, \quad (69)$$

где s и $\bar{s}$ — частица и античастица. Применительно к β -распаду это означает, что раз в ядре может происходить процесс превращения нейтрона в протон:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}, \quad (70)$$

то должен быть возможным и процесс поглощения нейтрино протоном:

$$p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+. \quad (71)$$

Отметим, что так уж сложилось в истории физики, что частицу, возникающую при превращении нейтрона в протон, стали называть *antineйтрино*, а при превращении протона в нейтрон — просто *нейтрино*, хотя, конечно, можно было бы сделать и наоборот.

Опыты Рейнеса и Коуэна. В 1953–1954 гг. два американских физика Фредерик Рейнес и Клайд Коуэн создали очень сложную установку, с помощью которой им удалось зарегистрировать такие процессы. Работа проводилась в Хэнфорде на севере США. Источником антинейтрино в их опытах служил расположенный поблизости ядерный реактор большой мощности. В результате очень длительных измерений (продолжительность одного замера составляла 1400 часов) они установили, что их установка регистрировала в среднем $2,88 \pm 0,22$ события в час. Отсюда, зная мощность потока антинейтрино от реактора и параметры установки, можно было определить эффективное сечение взаимодействия этих частиц с протонами. Оно оказалось равным $(1,1 \pm 0,26) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$. Столь малая величина эффективного сечения говорила о феноменально высокой проникающей способности антинейтрино: толщина слоя свинца, кото-



Фредерик Рейнес

рая потребовалась бы для ослабления потока антинейтрино в два раза, равнялась бы расстоянию от Земли до Солнца, увеличенному в миллион раз! Поэтому нейтрино, возникающие в процессе термоядерных реакций в недрах Солнца, практически свободно выходят наружу, долетают до Земли и, пронзив ее насквозь, также свободно улетают в космическое пространство. При этом они уносят с собой весьма заметную долю энергии — около 6 % от тех 26 МэВ, что выделяются при превращении четырех протонов в ядро гелия.

За эксперименты, приведшие к регистрации нейтрино (получившие название «проект Полтергейст»), и за другие исследования Фредерик Рейнес в 1995 г. был удостоен Нобелевской премии.

Нейтрино и антинейтрино. Как отмечалось выше, просто по аналогии с другими частицами, обладающими полущелым спином и имеющими античастицы, было предположено, что и у нейтрино, поскольку спин у него равен $\frac{1}{2}$, должна быть античастица. Другими словами, должно быть две частицы — нейтрино и антинейтрино с различающимися свойствами.

Опыт Дэвиса. Справедливость этого утверждения была установлена экспериментально американским физиком Раймондом Дэвисом, который в 1956–1959 гг. провел серию экспериментов на специально созданной установке. Идея эксперимента Дэвиса состояла в том, что согласно «алгебре частиц» под действием нейтрино должна идти реакция



Если свойства нейтрино и антинейтрино тождественны (т. е. фактически существует только одна частица — нейтрино), то такая реакция может иметь место под действием любых нейтрино независимо от того, в каких процессах они получены, в частности — антинейтрино от β^- -распада осколков деления, мощным источником которых является ядерный реактор. Если же свойства нейтрино и антинейтрино различны, то под действием излучения реактора такая реакция не должна происходить. Отрицательный результат опыта Дэвиса (радиоактивный аргон-37 не был обнаружен) говорит о том, что нейтрино и антинейтрино — различающиеся по своим свойствам частицы.



Раймонд Дэвис

Нейтрино разных типов. Открытием различия свойств нейтрино и антинейтрино дело не закончилось — оказалось, что имеется еще несколько разновидностей нейтрино.

Было установлено, что открытые в 1937 г. мюоны распадаются на электроны и пары нейтрино — антинейтрино:

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}. \quad (73)$$

Но что это были за нейтрино? Тождественны ли они тем нейтрино и антинейтрино, которые возникают при β -распаде? В 1962 г. в США на одном из ускорителей был проведен эксперимент, доказавший, что существует по крайней мере два типа нейтрино: электронные нейтрино ν_e (которые возникают при β -распаде) и мюонные нейтрино ν_μ (возникающие при распаде мюонов), причем как те, так и другие имеют свои античастицы. Поэтому распад мюонов правильно следует записать так:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (74)$$

Мюонные нейтрино возникают также и при распаде пионов:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu). \quad (75)$$

Но и это еще не все. В 1975 г. в Стэнфорде (США) группой Мартина Перла был открыт новый тяжелый лептон, названный τ -частицей (или таоном). Лептонами называют частицы, не обладающие сильным взаимодействием: к ним относятся нейтрино, электроны, мюоны и таоны. Все лептоны имеют спин $1/2$, и поэтому у всех у них есть свои античастицы. Исследования показали, что таоны имеют массу в 3 500 раз большую, чем электрон, и распадаются по схеме:

$$\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \nu_\tau(\bar{\nu}_\tau), \quad (76)$$

причем при этом распаде возникают нейтрино третьего типа, названные таонными нейтрино (и антинейтрино). Экспериментальное подтверждение существования таких частиц и уточнение их свойств были получены только в 2000 г.

Таким образом, в настоящее время известны три типа нейтрино — электронное, мюонное и таонное, и их античастицы, т. е. всего шесть типов новых частиц.

Нейтрино естественного происхождения имеют три принципиально разных источника. Первый из них — это реликтовые нейтрино, оставшиеся от Большого Взрыва. Согласно модели горячей Вселенной в настоящее время их температура близка к абсолютному нулю (около 2 К). И хотя в 1 см^3 пространства содержится от 300 до 400 реликтовых нейтрино всех трех типов, зарегистрировать их практически невозможно, потому что подходящего для этого экспериментального метода пока нет.

Вторым источником нейтрино служат ядерные реакции, идущие в недрах звезд. Наше Солнце испускает каждую секунду порядка 10^{38} нейтрино, а при взрывах сверхновых звезд за один раз

может вылететь в тысячу раз больше нейтрино, чем испускает Солнце за 10 млрд лет своей жизни.

Третьим источником нейтрино служат космические лучи, пронизывающие все пространство во всех направлениях.

Поиски солнечных нейтрино. Как отмечалось выше, энергия Солнца вырабатывается за счет термоядерных реакций превращения водорода в гелий, и при этом образуются нейтрино, которые свободно вылетают из недр Солнца наружу, долетают до Земли, и так же свободно пронзив ее, улетают безвозвратно в космическое пространство. Эти солнечные нейтрино чрезвычайно важно было бы зарегистрировать и измерить их поток, так как это дало бы подтверждение теоретическим гипотезам о происхождении энергии звезд. Заметим, что Солнце производит только электронные нейтрино, но с различными энергиями.

Один из первых экспериментов с этой целью провел в 1967 г. американский физик Раймонд Дэвис. Как отмечалось выше, его детектор, содержащий хлор-37, не регистрировал антинейтрино, идущие от ядерного реактора, и тем самым доказал различие свойств нейтрино и антинейтрино. Но от Солнца идет поток именно нейтрино, поэтому Дэвис попытался использовать свой детектор для их регистрации. И это ему удалось! Однако интенсивность потока солнечных нейтрино оказалась в три раза меньше ожидаемой: в экспериментах, проводившихся в течение нескольких лет, по расчету в детекторе Дэвиса ожидалось образование в среднем одного ядра радиоактивного нуклида аргона-37 в сутки, а образовывалось только одно ядро за трое суток.

Другой эксперимент осуществили японские физики в 1988 г. на установке Kamiokande-II. Эта установка представляла собой громадный бак из нержавеющей стали, содержащий 3 000 тонн чистой воды. Быстрые нейтрино, рассеиваясь на электронах молекул воды, выбивали их из атомов, и летя с большой скоростью в воде, эти электроны генерировали черенковское излучение, которое регистрировалось с помощью 1 000 фотоумножителей, расположенных на внутренней поверхности бака. Но и японские ученые получили результат в два раза меньше ожидаемого.

Обе упомянутые установки по своей природе могли регистрировать только самые энергичные нейтрино, которых в спектре солнечного излучения не так уж много. Гораздо важнее было зарегистрировать нейтрино с относительно низкими энергиями, ха-

актерными для ядерных реакций водородного цикла. Это можно было сделать с помощью галлия, атом которого при попадании в него нейтрино превращался в атом нестабильного изотопа германия с периодом полураспада 11 суток. Но галлий — редкий и очень дорогой металл, а для получения надежных результатов его требовалось около 40 тонн. Российско-американский галлиевый эксперимент под названием SAGE был проведен в Баксанской нейтринной лаборатории, расположенной глубоко в горе в Баксанском ущелье на Кавказе на территории России. В течение 1990–2000 гг. было проведено около 100 измерений, но и они зафиксировали только половину потока нейтрино от ожидаемой.

Причины выявленных расхождений между теорией и экспериментом до конца не ясны до сих пор. Напрашиваются два возможных заключения: либо ученые не знают действительные процессы, обеспечивающие светимость звезд, либо они не понимают до конца природу нейтрино. Необычность этой частицы уже принесла физикам ряд сюрпризов, возможно выявятся и другие. Еще в 1957 г. Бруно Понтекорво сформулировал теорию нейтринных преобразований, согласно которой при наличии нескольких видов нейтрино они могут трансформироваться из одного вида в другой и обратно. Эти так называемые нейтринные осцилляции могут происходить за время полета нейтрино от Солнца к Земле, благодаря чему плотность потока электронных нейтрино у Земли может быть не такой, как ожидалось. Но для того, чтобы нейтринные осцилляции могли происходить, у нейтрино должна быть хотя бы маленькая, но отличная от нуля масса покоя. Поэтому целью ближайших экспериментов будут попытки обнаружения нейтринных осцилляций. И такие попытки уже начаты.

Частицы, античастицы и «антивещество». На основании изложенных выше фактов можно заключить, что все основные частицы, из которых состоит наш мир — протоны, нейтроны, электроны и даже нейтрино, имеют свои античастицы. Это говорит о возможности существования «антивещества», в котором все частицы заменены античастицами. Ядра такого антивещества должны состоять из антинейтронов и отрицательно заряженных антипротонов. И такие антиядра действительно были обнаружены. В 1965 г. группой Л. Ледермана в Брукхэвенской лаборатории (США) был обнаружен антидейтрон, в 1970 г. Ю. Д. Прокошкин с сотрудниками на Серпуховском ускорителе синтезировали ядро антигелия-3, состоящее

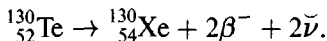
из двух антипротонов и одного антинейтрона, а в 1974 г. усилиями двух групп В. И. Рыкалина и В. И. Петрухина было получено доказательство существования ядра антитрития. Эти факты не оставляют сомнений в возможности существования и более тяжелых антиядер. Вокруг них могут вращаться положительно заряженные антиэлектроны (позитроны), образуя антиатомы. В принципе, из такого антивещества может состоять целый антимир со своими планетами, звездами и целыми галактиками. На таких планетах могут быть условия, сходные с земными, и существовать живые существа. Но поскольку общим свойством всех пар «частица — античастица» является их способность к аннигиляции, то в случае столкновения двух миров (например, галактик), состоящих из обычного вещества и антивещества, начнется их взаимное уничтожение с превращением массы всех частиц в энергию. На этом основаны попытки астрофизиков найти подобные случаи во Вселенной по мощным потокам γ -излучения, которые должны исходить из мест столь нежелательных встреч. Однако пока таких случаев обнаружить достоверно не удалось, что говорит о том, что, по-видимому, вся Вселенная состоит из обычного вещества, а античастицы могут рождаться лишь при определенных процессах и тут же исчезать. Но тогда возникает другой вопрос: почему Вселенная оказалась созданной столь несимметрично? Чем протон лучше антипротона? Но эти вопросы уже очень далеко уходят за границы традиционной ядерной физики.

Двойной β -распад. Так называется процесс, при котором из ядра строго одновременно вылетают два электрона (или позитрона) и заряд ядра изменяется сразу на две единицы. Возможность двойного β -распада ($2\beta 2\nu$), при котором в ядре параллельно два нейтрона превращаются в два протона, два электрона и два антинейтрино:



была предсказана в 1935 г. Марией Гепперт-Майер. Ее предсказание было основано на том, что в группах соседних ядер-изобар с четным значением массового числа, например в такой, как $^{130}_{51}\text{Sb}$, $^{130}_{52}\text{Te}$, $^{130}_{53}\text{I}$, $^{130}_{54}\text{Xe}$ и $^{130}_{55}\text{Cs}$, все нечетно-нечетные нуклиды ($^{130}_{51}\text{Sb}$, $^{130}_{53}\text{I}$ и $^{130}_{55}\text{Cs}$) имеют массы больше своих четно-четных соседей и поэтому могут превращаться в них путем β^- или β^+ -распадов, тогда как четно-четные нуклиды $^{130}_{52}\text{Te}$ и $^{130}_{54}\text{Xe}$ не имеют более легких соседей и поэтому для них обычный β -распад оказывается невозможным.

Однако, как заметила Гепперт-Майер, масса ядра $^{130}_{52}\text{Te}$ немного больше массы ядра $^{130}_{54}\text{Xe}$, поэтому *при строго одновременном* вылете двух β -частиц и двух антинейтрино в принципе возможен процесс:



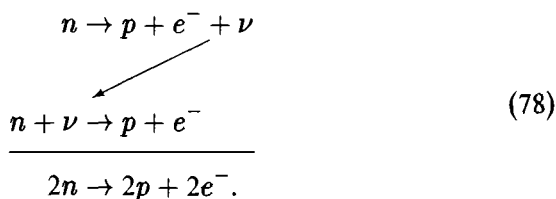
Теоретические оценки показали, что вероятность такого процесса чрезвычайно мала, и он должен иметь громадный период полураспада, превышающий 10^{21} лет. Подчеркнем, что строгая од-



Мария
Гепперт-Майер

новременность вылета всех четырех частиц ($2\beta 2\nu$) здесь имеет принципиальное значение, так как если первый электрон вылетит хоть на мгновение раньше второго, то это будет означать образование на это мгновение ядра $^{130}_{53}\text{I}$ с массой больше массы исходного ядра $^{130}_{52}\text{Te}$, что запрещено законом сохранения энергии.

Два года спустя в 1937 г. Э. Майорана заметил, что если нейтрино и антинейтрино тождественно совпадают (т. е. фактически имеется только одна частица — нейтрино), то возможен другой процесс, при котором возникшее при распаде первого нейтрона нейтрино тут же поглощается вторым нейтроном с превращением его в протон:



Этот процесс получил название *безнейтринного двойного β -распада* ($2\beta 0\nu$). Если бы этот процесс действительно существовал, то он существенно увеличивал бы вероятность двойного β -распада и уменьшал бы его период полураспада до 10^{15} лет. Таким образом, обнаружение двойного β -распада и измерение его периода полураспада могло бы явиться существенным доводом за или против гипотезы о различии свойств нейтрино и антинейтрино.

Обнаружить двойной β -распад и оценить его период полураспада можно двумя способами: либо по накоплению ксенона

в породе, содержащей теллур, либо путем непосредственной регистрации возникающих β -частиц.

Первым способом первый результат для теллура был получен еще в 1949 г. Инграмом и Рейнольдсом, согласно которому $T_{1/2}({}^{130}_{52}\text{Te}) = 1,4 \cdot 10^{21}$ лет. В 1992 г. Бернатович с сотрудниками уточнили этот результат: $T_{1/2}({}^{130}_{52}\text{Te}) = (2,7 \pm 0,1) \cdot 10^{21}$ лет. Одновременно были определены периоды двойного β -распада еще для нескольких ядер, которые оказались примерно того же порядка. Следует отметить, что по накоплению конечного продукта (в данном случае ксенона) невозможно определить, каким путем идет двойной β -распад: $(2\beta 2\nu)$ или $(2\beta 0\nu)$.

Методом регистрации β -частиц такое разделение возможно, так как в случае $(2\beta 2\nu)$ -распада сумма энергий двух β -частиц будет иметь такое же непрерывное распределение, как при обычном β -распаде, тогда как в случае $(2\beta 0\nu)$ -распада сумма энергий двух β -частиц будет точно равна всей энергии распада (за исключением малой доли энергии, достающейся ядру отдачи), благодаря чему распределение суммы энергий двух частиц должно иметь форму узкого пика. Основные трудности таких измерений связаны с крайне низкой скоростью счета (порядка одного события в неделю) и трудности борьбы с фоном, для снижения которого опыты приходится проводить глубоко под землей. Одна из первых установок такого рода была создана в 1995 г. В качестве рабочего вещества, которое служило одновременно и излучателем, и детектором, использовались 180 л ксенона, обогащенного до 62,5 % ${}^{136}_{54}\text{Xe}$, находящимся под давлением 5 атм. Специальная конструкция установки позволяла выделять треки электронов, выходящих из одной точки, и записывать проекции их координат. Для снижения фона установка размещалась в одном из туннелей в Швейцарии на глубине, соответствующей 3 км водного эквивалента. В результате проведенных экспериментов получены две оценки для периодов полураспада ${}^{136}_{54}\text{Xe}$:

$$T_{1/2}(2\beta 2\nu) \geq 5,6 \cdot 10^{20} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta 0\nu) \geq 4,2 \cdot 10^{23} \text{ лет}.$$

Другая установка была создана совместными усилиями физиков Гейдельберга и Москвы. В ней в качестве рабочего вещества (которое также является одновременно излучателем и детектором) используется 11,5 кг германия, обогащенного до 86 % изотопом ${}^{76}_{32}\text{Ge}$. Измерения проводились в подземной лаборатории в Италии

на глубине 3,5 км водного эквивалента. Германиевые детекторы обладают более высоким энергетическим разрешением, чем газовый сцинтилляционный детектор, поэтому в данной работе получены более определенные оценки периодов полураспада двойного β -распада для $^{76}_{32}\text{Ge}$:

$$T_{1/2}(2\beta 2\nu) = (1,7^{+0,13}_{-0,11}) \cdot 10^{21} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta 0\nu) > 6,4 \cdot 10^{24} \text{ лет}.$$

Третий тип установок этого класса под общим названием NEMO был создан во Франции. В них источник излучения и детекторы были разделены. Так, в установке NEMO-2 в качестве источника использовались фольги размером 1×1 м, покрытые тонким слоем (40 мкм) исследуемого нуклида ($^{100}_{42}\text{Mo}$ или $^{116}_{48}\text{Cd}$), а в качестве детекторов использовались 20 слоев гейгеровских счетчиков по 32 счетчика в каждом слое и еще два слоя пластиковых счетчиков. В результате измерений на этой установке были получены следующие результаты:

$$\text{для } ^{100}_{42}\text{Mo} \quad T_{1/2}(2\beta 2\nu) = (0,95 \pm 0,1) \cdot 10^{19} \text{ лет};$$

$$\text{для } ^{116}_{48}\text{Cd} \quad T_{1/2}(2\beta 2\nu) = (3,4 \pm 0,5) \cdot 10^{19} \text{ лет},$$

и кроме того получена оценка

$$\text{для } ^{100}_{42}\text{Mo} \quad T_{1/2}(2\beta 0\nu) \geq 6,4 \cdot 10^{21} \text{ лет}.$$

В настоящее время сооружается еще более крупная установка NEMO-3 с площадью фольги 20 м^2 и детектирующей системой из 6 180 гейгеровских и 1 920 пластиковых сцинтилляционных счетчиков, на которой предполагается исследовать целый ряд 2β -активных нуклидов.

К концу XX в. было изучено уже довольно много нуклидов, распадающихся путем двойного β -распада ($2\beta 2\nu$): $^{48}_{20}\text{Ca}$, $^{76}_{32}\text{Ge}$, $^{82}_{34}\text{Se}$, $^{100}_{42}\text{Mo}$, $^{116}_{48}\text{Cd}$, $^{130}_{52}\text{Te}$, $^{136}_{54}\text{Xe}$, $^{150}_{60}\text{Nd}$, причем некоторые из них изучались в различных лабораториях и во всех случаях периоды полураспада оказывались больше 10^{21} лет. В то же время надежно не установлено ни одного случая ($2\beta 0\nu$)-распада и для его периодов получены только нижние оценки, причем самая последняя из них (1999 г.):

$$T_{1/2}(2\beta 0\nu) > 5,7 \cdot 10^{25} \text{ лет}.$$

Напомним, что $(2\beta 0\nu)$ -распад, согласно первоначальным ожиданиям, должен был не увеличивать, а уменьшать общий период двойного β -распада. Поэтому последние экспериментальные результаты говорят о том, что безнейтринный β -распад, по-видимому, не существует, откуда следует подтверждение вывода о том, что нейтрино и антинейтрино — разные частицы.

Эффект Мёссбауэра. Физиков издавна интересовал вопрос о возможности резонансного рассеяния γ -квантов атомными ядрами. Поскольку во всех ядрах одного типа расстояния между уровнями строго одинаковы, то, казалось бы, γ -квант, испущенный при переходе ядра из одного состояния в другое, при попадании в соседнее ядро может возбудить его, вызвав переход с соответствующего нижнего уровня на верхний. Затем возбужденное ядро перейдет обратно на нижний уровень с испусканием γ -кванта с той же энергией, но полетит он уже в каком-то другом направлении. Поэтому для внешнего наблюдателя процесс будет выглядеть как упругое рассеяние γ -кванта ядром. При этом благодаря равенству энергии γ -кванта и расстояния между уровнями ядра, он будет иметь резонансный характер и поэтому должен происходить с большой вероятностью.

Тем не менее, несмотря на многочисленные поиски, обнаружить эффект резонансного рассеяния фотонов ядрами долго никому не удавалось. А происходило это потому, что при испускании γ -кванта часть энергии перехода доставалась ядру отдачи, благодаря чему энергия испускаемого γ -кванта (пик 2 на рис. 8) оказывалась несколько меньше энергии уровня (пик 1 на рис. 8). Аналогичный эффект происходил и при попадании γ -кванта в другое ядро, которому тоже часть энергии передавалась в виде кинетической энергии, поэтому энергия, которая могла бы пойти на возбуждение ядра, оказывалась еще меньше (пик 3 на рис. 8). Сдвиги энергии из-за передачи части энергии ядрам отдачи показаны стрелками в нижней части рис. 8. Эти потери энергии были очень маленькими: так, при испускании ядром ^{191}Ir фотона с энергией 129 кэВ энергия ядра отдачи составляла всего 0,05 эВ, так что двойная потеря энергии при испускании и поглощении фотона была порядка 0,1 эВ. Но ширина возбужденного уровня ядра ^{191}Ir была еще меньше: $\Gamma = 5 \cdot 10^{-6}$ эВ. Поэтому никакого совпадения энергии γ -кванта с энергией перехода не было, и резонансное рассеяние при таких условиях оказывалось невозможным.

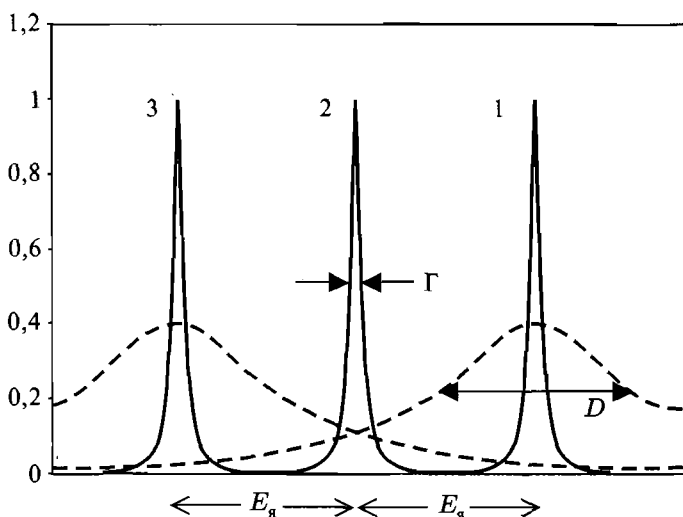


Рис. 8. Смещение линий испускания и поглощения энергий γ -квантов из-за передачи части энергий ядрам отдачи: Γ — физическая ширина уровня, D — уширение уровня из-за эффекта Доплера

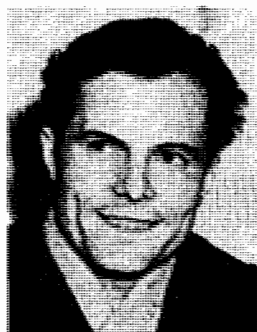
Правда, несколько спасал положение так называемый эффект Доплера. Из-за того, что ядра участвуют в тепловом движении, энергии фотонов, вылетающие под разными углами по отношению к движению ядра, имеют несколько различающиеся энергии. Благодаря этому, фактическая ширина полос испускания и поглощения фотонов определялась не физической шириной уровня Γ , а шириной разброса энергий из-за эффекта Доплера:

$$\Delta E_{\gamma} = 2\sqrt{E_{\gamma.о.} \cdot kT_T} \equiv D,$$

которая в данном случае равнялась 0,07 эВ, т. е. была сравнимой с потерями энергии, передаваемой ядрам отдачи. Поэтому полосы испускания и поглощения фотонов частично перекрывались, и резонансное рассеяние все же оказывалось возможным, но поскольку перекрывание полос было незначительным, величина эффекта была очень мала. Попытки компенсировать эффект отдачи очень быстрым движением источника относительно образца (опыт Муна, 1953 г.), к успеху не привели.

Желая проверить роль эффекта Доплера в резонансном рассеянии фотонов, немецкий физик Мёссбауэр в 1958 г. провел серию

экспериментов, при которых и источник фотонов, и рассеивающий образец охлаждались жидким азотом. При этом ожидалось, что охлаждение уменьшит скорости движения атомов, что должно было привести к уменьшению роли эффекта Доплера и, соответственно, к уменьшению и без того малого эффекта резонансного рассеяния фотонов. Но, как показал опыт, при охлаждении источника и образца эффект рассеяния не уменьшался, а увеличивался. Происходило это потому, что с уменьшением температуры уменьшались возможности независимого движения атомов кристалла друг от друга, они как бы «спайивались» друг с другом, и при испускании или поглощении фотона отдачу получал не отдельный атом, а весь кристалл или, по крайней мере, большая группа атомов вместе. Из-за большой массы кристалла потеря энергии за счет отдачи оказывалась пренебрежимо малой, и ширины линий испускания и поглощения γ -квантов оказывались порядка физической ширины уровня Γ , что и требовалось для появления условий для резонансного рассеяния фотонов.



Рудольф Людвиг
Мёссбауэр

Вот в таком рассеянии фотонов практически без отдачи и заключается эффект Мёссбауэра. Малая ширина резонансных линий позволяет использовать эффект Мёссбауэра для измерений энергий малых сдвигов энергии γ -квантов, вызванных различными воздействиями на излучающее или поглощающее ядро или γ -квант. Например, если источник начинает двигаться относительно детектора со скоростью всего 2 см/с (второй опыт Мёссбауэра), то из-за того же эффекта Доплера полоса испускания смещалась относительно полосы поглощения настолько, что эффект Мёссбауэра исчезал. И это при скорости самого фотона $3 \cdot 10^{10}$ см/с! Относительная точность измерения изменения энергии фотона в этом случае определяется отношением ширины уровня ядра к энергии перехода и для рассмотренного выше примера составляет $5 \cdot 10^{-6} : 1,29 \cdot 10^5 = 4 \cdot 10^{-11}$. В некоторых случаях это отношение оказывается ещё меньше.

Эффект Мёссбауэра нашел широкое применение в различных областях науки и техники — в физике, химии, биологии, геологии

и др. С его помощью удалось даже «взвесить фотон», т. е. определить изменение энергии фотона при переходе от горизонтального движения к вертикальному за счет его притяжения к Земле.

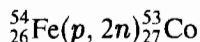
Новые виды распада ядер. В первой половине XX в. считалось, что существуют четыре вида радиоактивного распада ядер: α -распад, β -распад (с тремя его разновидностями), γ -распад и спонтанное деление ядер. Распады с вылетом других частиц считались невозможными, так как они противоречили известным в то время условиям устойчивости ядер. Однако во второй половине XX в. стали известны новые факты, заставившие пересмотреть это мнение.

Протонный распад. К середине XX в. было точно установлено, что радиоактивный распад с вылетом протонов из находящихся в основных состояниях ядер, лежащих на дорожке стабильных ядер или вблизи нее, абсолютно невозможен, так как для таких случаев всегда выполняются условия устойчивости. Поэтому интуитивно считалось, что протонной активности вообще быть не может. Однако в дальнейшем было обнаружено несколько процессов, при которых протоны из ядер вылетать все-таки могут. Причем речь здесь идет, конечно, не о тривиальных случаях ядерных реакций, при которых протоны вылетают из сильно возбужденных промежуточных ядер практически мгновенно, а именно о протонной радиоактивности, когда протон вылетает из ядра через измеримое время после его образования, т. е. не раньше, чем через 10^{-12} с.

Запаздывающие протоны. В 1962 г. в Дубне В. А. Карнаухов с сотрудниками обнаружил запаздывающие протоны, которые возникали при облучении никелевой фольги ионами ^{20}Ne и вылетали с периодом полураспада 24 с. Практически одновременно аналогичное явление было обнаружено и за рубежом. Механизм образования запаздывающих протонов аналогичен механизму образования запаздывающих нейтронов. При β^+ -распаде нейтронодефицитного ядра, лежащего далеко от дорожки стабильных ядер, дочернее ядро может оказаться в сильно возбужденном состоянии, энергия возбуждения которого может превысить энергию связи протона в данном ядре. И тогда из этого возбужденного состояния, вместо β^+ -частицы или γ -квантов, может вылететь протон. Энергия вылетающего протона равна разности энергий возбужденного уровня ядра и энергии связи протона в нем. При небольших энергиях протонов вероятность их вылета невелика, так как им приходится

преодолевать кулоновский барьер. С ростом энергии протонов вероятность их вылета возрастает, а затем снова уменьшается из-за уменьшения вероятности заселения очень высоких уровней при β^+ -распаде. Время запаздывания, как и при вылете запаздывающих нейтронов, определяется периодом β -распада. В качестве конкретного примера приведем распад ядер ^9C , которые с периодом полураспада 0,127 с превращаются в ядра ^9B , из которых вылетают запаздывающие протоны с энергиями 8,24 и 10,92 МэВ. В настоящее время известно более сотни излучателей запаздывающих протонов, причем легкие ядра испускают обычно одну-две группы запаздывающих протонов. А с ростом массы ядра число групп увеличивается и у таких ядер, как $^{181}_{80}\text{Hg}$ наблюдается практически сплошной энергетический спектр запаздывающих протонов в интервале энергий 3–6 МэВ.

Вылет протонов из изомерного состояния. В 1970 г. в работах К. Джексона, Дж. Черни и других был обнаружен иной механизм вылета протонов из ядер. Ими было установлено, что при ядерной реакции



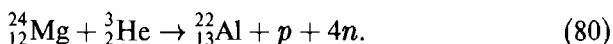
ядро кобальта образуется в изомерном состоянии с большой энергией возбуждения и с большим спином ($19/2^-$), благодаря чему период полураспада этого состояния оказывается не столь уж малым: 247 ± 12 мс. Из этого изомерного состояния ядра ^{53}Co распадаются, в основном, путем β^+ -распада, но с вероятностью около 1,5 % из него может быть испущен протон. Пока что это единственный известный случай испускания протонов из изомерного состояния.

Вылет протонов из основных состояний ядер. До сих пор говорилось о случаях испускания протонов из возбужденных состояний ядер. Однако у нейтронодефицитных ядер, лежащих еще дальше от дорожки стабильности, перегрузка протонами может быть настолько большой, что для них становится возможным вылет протонов из основного состояния. Вылет этот будет задержан тем, что протону придется преодолевать кулоновский барьер, что делает этот процесс похожим на α -распад. Впервые слабая протонная радиоактивность была зарегистрирована в Дубне В. А. Карнауховым в 1972 г. в реакции:

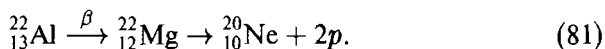


Возникающие при ней-ядра $^{121}_{59}\text{Pt}$ имеют на 12 протонов больше, чем β -стабильные ядра $^{109}_{47}\text{Ag}$ с тем же числом нейтронов (62); последний из них 12-й протон имеет хоть и небольшую по абсолютной величине, но все же отрицательную энергию связи и вылетает из ядра $^{121}_{59}\text{Pt}$ с энергией 0,83 МэВ и периодом полураспада $1,4 \pm 0,8$ с. Всего к концу XX в. было исследовано более 30 ядер, испытывающих протонный распад из основного состояния с периодами полураспада от 17 мкс до 50 с.

Двойной протонный распад. В 1960 г. В. И. Гольданский предсказал возможность двойного протонного распада. Это предсказание было основано на известном эффекте спаривания частиц в ядре: энергия связи каждого четного нуклона оказывается больше, чем нечетного. Благодаря этому эффекту, в четно-четном ядре, лежащим у границы протонной стабильности, последний четный протон может иметь небольшую положительную энергию связи, а его предшественник нечетный протон — значительную отрицательную энергию связи. В результате оба протона вместе будут обладать отрицательной энергией связи и могут вместе вылететь из ядра, тогда как один последний протон — нет. Аналогичные рассуждения можно провести и для ядер, находящихся в возбужденных состояниях, поэтому можно ожидать вылет протонных пар во всех случаях, рассмотренных выше: в виде запаздывающих протонов, из изомерных состояний и из основных состояний. Пока удалось экспериментально обнаружить только первый случай. В 1980 г. Гольданский указал два конкретных ядра: $^{22}_{13}\text{Al}$ и $^{26}_{15}\text{P}$, β^+ -распад которых должен привести к образованию ядер $^{22}_{12}\text{Mg}$ и $^{26}_{14}\text{Si}$, способных испускать протонные пары. Спустя три года одно из них ($^{22}_{12}\text{Mg}$) действительно было обнаружено в работе М. Кэбла и др., выполненной на циклотроне в Беркли (США). В этой работе ускоренными до энергии 110 МэВ ионами гелия-3 облучались ядра магния-24:

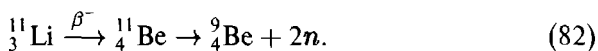


Образующиеся при этой реакции ядра $^{22}_{13}\text{Al}$ путем β^+ -распада с периодом полураспада 0,07 с превращались в сильно возбужденные ядра $^{22}_{12}\text{Mg}$, которые и испускали протонные пары:



В дальнейшем было обнаружено второе предсказанное Гольданским ядро-предшественник ${}^{26}_{15}\text{P}$ ($T_{1/2} = 0,02$ с), а также еще одно ядро ${}^{35}_{20}\text{Ca}$ ($T_{1/2} = 0,05$ с).

Нейтронная радиоактивность. Нейтрон не имеет электрического заряда, а соответственно и кулоновского барьера, поэтому при отрицательной энергии связи нейтрон мгновенно (за время меньше 10^{-15} с) вылетает из ядра. Такой быстрый процесс характерен для ядерных реакций и к явлениям радиоактивности его отнести нельзя. Вылет нейтрона из ядра может задержать только предшествующий β -распад, что и происходит при испускании запаздывающих нейтронов при делении тяжелых ядер. Если энергия возбуждения ядра после β -распада превышает энергию связи двух нейтронов, то возможен процесс запаздывающей двухнейтронной активности. Такой процесс был предсказан Гольданским в 1960 г. и обнаружен экспериментально в ЦЕРНе в 1979 г. в процессе:



Время запаздывания определяется периодом полураспада ${}^{11}_3\text{Li}$ и составляет 8,5 мс. В дальнейшем была обнаружена трехнейтронная активность того же ядра ${}^{11}_3\text{Li}$.

В принципе возможна еще одна причина задержки вылета нейтрона — наличие центробежного барьера для нейтронов, вылетающих с орбитальным моментом $l \neq 0$, но ни одного такого случая пока обнаружить не удалось.

Кластерная радиоактивность. В 1980 г. А. Сандулеску, Д. Поенару и В. Грейнер предсказали возможность испускания ядрами кластеров — фрагментов тяжелее α -частиц. И вот в 1984 г. Х. Роуз и Г. Джонс обнаружили распад ядер ${}^{223}_{88}\text{Ra}$ с вылетом кластеров — ядер ${}^{14}_6\text{C}$:

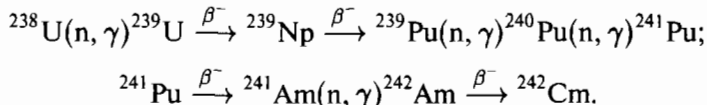


Выход ядер ${}^{14}_6\text{C}$ оказался очень маленьким: $(8,5 \pm 2,5) \cdot 10^{-10}$ от выхода α -частиц из того же ядра ${}^{223}_{88}\text{Ra}$. В дальнейшем были обнаружены распады тяжелых ядер с вылетом и других кластеров — ядер ${}^{24}_{10}\text{Ne}$, ${}^{28}_{12}\text{Mg}$, ${}^{32}_{14}\text{Si}$.

Кластерный распад занимает промежуточное положение между α -распадом (вылет очень легких кластеров) и спонтанным делением (образование очень тяжелых кластеров). Соответственно,

и теория этого явления строится в трех вариантах: по аналогии с α -распадом, исходя из рассмотрения резко асимметричного спонтанного деления и объединенное рассмотрение всех отмеченных видов радиоактивности. Все три подхода дают вполне удовлетворительные результаты при описании вероятности кластерной активности в исследованной области ядер. Как считают некоторые авторы, различия между разными вариантами теории могут проявиться в области далеких трансуранов, где сильно возрастает роль спонтанного деления.

Получение и исследование трансурановых элементов. Выше отмечалось, как были получены первые трансурановые элементы — нептуний и плутоний. Продолжение процесса облучения урана нейтронами с чередующимися актами β -распада позволило получить еще несколько трансурановых элементов. Так в 1944 г. американский ученый Сиборг открыл 95-й и 96-й элементы — америций Am и кюрий Cm. При этом процесс шел примерно по следующей схеме:



Но каждый следующий шаг в этом направлении давался все с большим и большим трудом. Во-первых, каждый следующий элемент получался в количествах, составлявших лишь малую долю от количества первоначального продукта. Так, при работе ядерного реактора в течение года из 1 тонны урана можно получить в лучшем случае несколько килограммов плутония. Такое же примерно соотношение между количествами исходного и конечного продукта имеет место и дальше. Во-вторых, эти мизерные количества получаемых нуклидов оказываются внедренными в громадные массы первоначального вещества (урана) и для их выделения приходится перерабатывать тонны отработанного топлива. Поэтому продолжали применять и другой способ получения трансурановых нуклидов путем облучения ядер заряженными частицами на ускорителях. Так, используя оба пути, физики постепенно получали все новые и новые изотопы трансурановых элементов. В 1949 г. в Беркли (США) путем облучения на ускорителе америция α -частицами с энергией 35 МэВ был получен 97-й элемент — берклий, названный так

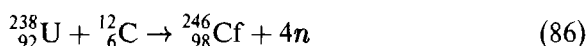
в честь места его открытия:



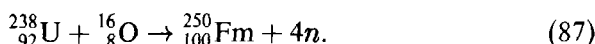
В 1950 г. там же аналогичным способом был открыт 98-й элемент — калифорний (центр Беркли находится в Калифорнии):



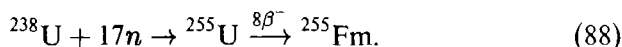
и т. д. Затем в качестве «снарядов» стали использовать ускоренные более тяжелые ядра, что позволяло увеличивать порядковый номер нуклида сразу на несколько единиц, например:



или



Так были получены 99-й элемент — эйнштейний Es, 100-й элемент — фермий Fm, 101-й элемент — менделевий Md (последний синтезирован группой Гиорзо в 1965 г. и назван в честь русского ученого Менделеева). Точнее говоря, впервые Es и Fm были обнаружены в 1952 г. в продуктах термоядерного взрыва и лишь потом синтезированы на ускорителе. При взрыве термоядерного заряда возникает настолько большая плотность нейтронов, что за миллионные доли секунды в ядра урана-238 успевает набиться большое количество нейтронов, и сильно перегруженное ими ядро путем серии быстро следующих друг за другом короткопериодных β -распадов превращается в ядро далекого трансуранового нуклида, например, так:



Но и при получении на ускорителях далеких трансурановых нуклидов с помощью многозарядных ионов возникают свои трудности. Во-первых, для преодоления гигантских кулоновских барьеров тяжелые ионы приходится ускорять до очень больших энергий в сотни МэВ. Для этого (как отмечалось выше) в некоторых научных центрах мира были построены специальные ускорители многозарядных ионов — синхрофазотрон в Дубне (Россия, 1970 г.), ускорявший многозарядные ионы до энергии 4 ГэВ/нуклон, синхрофазотрон в Беркли (США, 1980 г.) на энергию до 2 ГэВ/нуклон и линейный ускоритель в Дармштадте (ФРГ, 1976 г.), ускоряющий

ионы до 10–14 МэВ/нуклон. Во-вторых, с увеличением порядкового номера элемента быстро уменьшаются периоды полураспада ядер. Так, у элементов с $Z > 103$ периоды полураспада измеряются секундами или даже долями секунды. Особенно быстро уменьшаются периоды полураспада по отношению к спонтанному делению, которое у таких нуклидов становится преобладающим видом распада. Так, у нуклида с порядковым номером 106 и массовым числом 260 период спонтанного деления равен $3,6 \cdot 10^{-3}$ с. Это сильно затрудняет поиск и идентификацию синтезированных ядер. Неудивительно, что в первых сообщениях о синтезе ядер с большими значениями Z говорилось о том, что таких ядер было обнаружено всего по 3 штуки. Следует отметить, что последними трансурановыми элементами с устоявшимися общепринятыми названиями являются элементы с порядковыми номерами: 102 (нобелий, No), 103 (лоуренсий, Lr), 104 (резерфордий, Rf), 105 (дубний, Db), 106 (сиборгий, Sg), 107 (борий, Bh), 108 (хассий, Hs) и 109 (майтнерий, Mt). Вновь открываемые элементы с $Z > 109$ пока не имеют общепринятых названий, и их принято обозначать просто порядковым номером, а сверху, как обычно, писать массовое число, например, так: $^{270}110$.

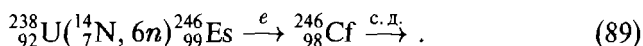
Идя шаг за шагом, физики получали изотопы элементов все с большими и большими порядковыми номерами. Но при этом возрастали и трудности, связанные с отмеченной выше возрастающей нестабильностью синтезируемых нуклидов. Так наиболее стабильный изотоп 105-го элемента ^{262}Db имеет период полураспада 35 с, а 108-го элемента ^{265}Hs — всего 1,8 мс. Однако, согласно некоторым теоретическим соображениям, при $Z = 114$ должен существовать «островок относительной стабильности», где благодаря влиянию следующего магического числа стабильность ядер должна быть несколько выше, чем у предшествующих.

Открытие спонтанно делящихся изомеров. В 1961 г. в Дубне С. М. Поликановым с сотрудниками в ходе работ по синтезу 104-го элемента было обнаружено, что при облучении ^{242}Pu ускоренными до высокой энергии ядрами ^{22}Ne среди прочих продуктов образуются ядра ^{242}Am , причем некоторые из них очень быстро, но все же не мгновенно, испытывают спонтанное деление с периодом $T_f = 0,014$ с. Измеренный до этого период спонтанного деления ядер ^{242}Am был равен 10^{14} лет, т. е. в 10^{23} раз больше (современное значение периода спонтанного деления ^{242}Am

$8,8 \cdot 10^{11}$ лет). Этот факт, казалось бы, можно было объяснить тем, что некоторые ядра ^{242}Am образовывались в изомерном состоянии, лежащим очень близко к краю барьера деления, благодаря чему проницаемость барьера (а следовательно, и вероятность деления) оказывалась очень высокими. Но, во-первых, при наличии такого изомерного состояния часть ядер обязательно должна была бы переходить из него в основное состояние с испусканием γ -квантов, однако на опыте такие γ -кванты не обнаруживались. Во-вторых, в дальнейшем аналогичные явления были обнаружены и при радиационном захвате нейтронов, при котором невозможно возникновение состояний с большими значениями спинов, что является необходимым условием возникновения изомерных состояний. В-третьих, энергия изомерного состояния оказалась чрезвычайно высока — около 3 МэВ, что крайне нетипично для изомерных состояний. Все эти факты говорили о том, что наблюдаемое явление нельзя было объяснить возникновением изомерных состояний ранее известной природы.

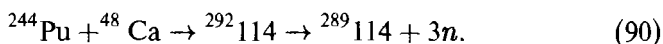
Объяснение наблюдаемым фактам было дано в 1967 г. другим советским физиком-теоретиком В. М. Струтинским. Ранее еще по модели Бора и Френкеля форма потенциального барьера деления рассчитывалась по модели жидкой капли и имела вид широкого горба. Струтинский ввел в этот расчет так называемые оболочечные поправки, вытекающие из модели ядерных оболочек. В результате барьер из одnogорбого превратился в двугорбый с дополнительной ямкой между двумя горбами. Этот факт мало отражался на спонтанном делении ядра из основного состояния или на вынужденном делении, когда ядро проходило высоко над всеми горбами. Но если при образовании ядра оно оказывалось в дополнительной ямке, то вероятность выхода из нее во внешнее пространство с преодолением только второго горба была на много порядков больше, чем при делении из основного состояния, когда ядру приходится преодолевать весь барьер. Этот новый вид изомерии, обусловленный не большой разностью моментов основного и изомерного состояний, а различием формы ядра (во второй яме ядро имеет сильно вытянутую форму с отношением осей эллипсоида до 2 : 1), стали называть *изомерией формы*. В настоящее время известно более трех десятков спонтанно делящихся изомеров для элементов от урана до берклия с периодами полураспада от 10^{-9} до 10^{-2} с.

Запаздывающее деление. В 1966 г. Г. Н. Флеров с сотрудниками, изучая спонтанно делящиеся изомеры, заметил, что возникающие при облучении некоторых мишеней ядра $^{234}_{95}\text{Am}$ делятся, но не сразу, а с периодом полураспада 2,6 мин. Это не могло быть спонтанным делением из основного состояния, период полураспада которого у ядер $^{234}_{95}\text{Am}$ составляет 10^4 лет. Это не могло быть и делением из изомерного состояния, для которого, как было отмечено выше, характерны гораздо меньшие периоды, измеряемые малыми долями секунды. Значит, это было какое-то новое явление, которое и было названо запаздывающим делением. В дальнейшем было найдено еще несколько ядер, испытывающих запаздывающее деление: $^{238}_{92}\text{U}$ ($T_{1/2} = 1$ мин), $^{232}_{94}\text{Pu}$ ($T_{1/2} = 1,4$ мин), $^{240}_{96}\text{Cm}$ ($T_{1/2} = 5$ мин), $^{246}_{98}\text{Cf}$ ($T_{1/2} = 8$ мин). Проведенные исследования показали, что механизм запаздывающего деления сходен с образованием запаздывающих нейтронов: первоначально образующееся ядро $^{234}_{95}\text{Am}$ в результате E -захвата превращается в сильно возбужденное ядро $^{234}_{94}\text{Pu}$, которое и делится мгновенно или через изомерное состояние, а время запаздывания определяется периодом полураспада исходного ядра по отношению к E -захвату. Приведем еще один пример запаздывающего деления:

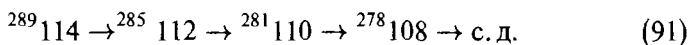


Период запаздывающего деления в данном случае ≈ 8 мин оказался практически совпадающим с периодом E -захвата для ядер $^{246}_{99}\text{Es}$ (7,7 мин). В дальнейшем были обнаружены случаи запаздывающего деления, связанные не только с E -захватом, но и с другими видами β -распада (β^+ и β^-).

Открытие 114-го и 118-го элементов. В конце 1998 г. и начале 1999 г. в ОИЯИ (г. Дубна) группой Ю. Ц. Оганесяна были получены ядра двух изотопов 114-го элемента $^{287}_{114}$ и $^{289}_{114}$, и несколько позже — третьего изотопа $^{288}_{114}$. Эксперименты проводились на ускорителе тяжелых ионов У-400. Под действием ускоренных на этой установке до нескольких сотен мегаэлектронвольт пятизарядных ионов кальция $^{48}\text{Ca}^{5+}$ шла ядерная реакция:

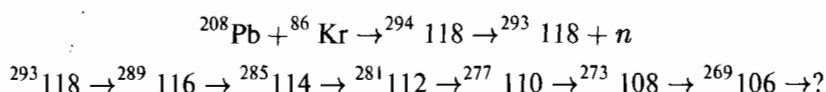


Возникающие ядра нуклида $^{289}_{114}$ распадались путем трех последовательных α -распадов с последующим спонтанным делением:



При этом интервалы между вылетающими друг за другом α -частицами составляли от 30 с до 16 мин, что говорило об относительной стабильности возникающих ядер и тем самым подтверждало теоретические предсказания о существовании «островка относительной стабильности».

Вскоре после открытия Оганесяна из Беркли (США) пришло сообщение об открытии 118-го элемента, ядра которого возникали и распадались путем α -распада по аналогичным схемам:



Всего было зарегистрировано три таких цепочки, причем времена жизни ядер в них оказались значительно меньше, чем в опытах Оганесяна: от 212 мкс до 43 с. Измеренный по трем цепочкам период полураспада ядер $^{285}114$ оказался равным 580 мкс, что противоречит предположению об относительной стабильности 114-го элемента (правда, в Дубне и в Беркли получались различные изотопы этого элемента: $^{289}114$ и $^{285}114$ соответственно).

Открытие 118-го элемента вновь отодвинуло границу периодической таблицы элементов, и вопрос о том, на каком элементе она закончится, остается открытым. Тем более, что существуют теоретические предположения о существовании новых островков стабильности при значениях $Z = 120$ и даже $Z = 126$.

Некоторые итоги. После Второй мировой войны ядерная физика продолжала успешно развиваться. Открытие принципов автофазировки и жесткой фокусировки частиц позволили создать целый ряд принципиально новых ускорителей, способных ускорять различные частицы до столь высоких энергий (500 ГэВ), о которых физики раньше и не мечтали. С помощью этих ускорителей и других новых приборов были открыты новые явления (эффект Мёссбауэра, размытость края ядра, несохранение четности при слабых взаимодействиях), значительно расширившие наши знания о ядре и о ядерных взаимодействиях. Значительный прогресс был достигнут в исследованиях космических лучей, позволивших лучше понять их природу, а заодно и открыть много новых частиц. Удалось наконец-то «поймать» неуловимую доселе частицу нейтрино, зафиксировать факт ее взаимодействия с протоном и доказать существование двух различных частиц — нейтрино и антинейтрино

(а затем еще мюонных и таонных нейтрино и антинейтрино). Много новых фактов было обнаружено, касающихся такого, казалось бы, хорошо изученного явления, как β -распад, и в частности открыты и изучены β -распад свободных нейтронов и двойной β -распад, что также дало много интересной и полезной информации об атомном ядре. Был открыт целый ряд новых «экзотических» видов распадов атомных ядер, которые раньше считались невозможными. Физикам удалось синтезировать ядра множества несуществующих в природе трансурановых элементов (вплоть до 118-го). Широким фронтом развернулась деятельность по измерениям и уточнениям ядерно-физических констант, имеющих громадное практическое значение (о чем рассказывалось в предыдущей главе). Параллельно экспериментальным работам шло развитие теоретических представлений об атомном ядре и делались попытки получить новый источник энергии на основе термоядерного синтеза, о чем будет рассказано в двух следующих главах.

Управляемый термоядерный синтез (энергетика XXI века)

Зачем нужна термоядерная энергетика? В гл. 6 рассказывалось о том, как термоядерные реакции используются в военных целях. Возникает естественный вопрос: а нельзя ли использовать громадную энергию, выделяющуюся при таких реакциях, в мирных целях для получения тепла и электрического тока? Человек освоил большое число различных источников энергии, в том числе и ядерную энергию, выделяющуюся при делении ядер урана и плутония, и широко использует их для своих нужд. Так стоит ли пытаться освоить еще один источник энергии, тем более что на пути решения этой проблемы стоят гигантские трудности?

Стоит. И вот почему.

Запасы органического топлива на Земле далеко не безграничны. По различным оценкам запасов нефти и газа хватит лет на 50, в лучшем случае на 100. Запасов угля немного больше, но возможности его использования более ограничены, например, для автотранспорта. Из возобновляемых источников энергии только гидроэнергетика может дать кое-что, но и ее запасы весьма ограничены, неравномерно распределены по Земле и не стабильны во времени (половодья сменяются межениями). Остальные возобновляемые источники (солнечное излучение, ветер, морские приливы и т. п.) вообще не могут служить основой для большой энергетики, по крайней мере, на современном уровне их развития. Не безграничны запасы и делящихся веществ, особенно если ограничиваться использованием только широко применяемых в настоящее время реакторов на тепловых нейтронах. В такой ситуации новый мощный источник энергии отнюдь не был бы лишним.

К тому же управляемый термоядерный синтез (УТС) обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими источниками энергии.

1. Обилие сырья. Содержание тяжелой воды в обычной воде относительно невелико ($1/5\,000$ доля), зато общее количество воды на Земле во всех морях и океанах поистине огромно! Оценки показывают, что даже с учетом постоянно возрастающих потребностей человечества в энергии, запасов энергии, заключенных в тяжелой воде морских просторов, хватит на тысячи лет. Третья на Земле в заметных количествах нет, но он может нарабатываться в самих термоядерных реакторах под влиянием нейтронного облучения благодаря ядерной реакции ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{T} + {}^4\text{He}$. Так что проблем с топливом здесь не ожидается.
2. Экологическая чистота. При термоядерных реакциях не возникают радиоактивные осколки, как при делении тяжелых ядер, поэтому заражение обширных территорий радионуклидами (как это имело место при аварии в Чернобыле) здесь в принципе невозможно. Правда, при термоядерных реакциях возникают нейтроны, под влиянием которых может создаваться искусственная радиоактивность некоторых материалов, но по общему количеству образующихся радиоактивных ядер между этими двумя процессами нет никакого сравнения.
3. Отсутствие критмассы. Как известно, с делящимися материалами (уран, плутоний) работать приходится очень осторожно, так как если случайно количество материала превысит определенный предел (критмассу), то может возникнуть не-санкционированная цепная реакция, которая может принести массу бед. И такие случаи в мировой практике, к сожалению, бывали, и они унесли много человеческих жизней. С тяжелой водой можно обращаться как с обычной водой — ее можно накапливать тоннами, и до тех пор, пока ее температура не будет поднята до 100 млн градусов (а это еще надо суметь сделать!), никакие термоядерные реакции в ней не пойдут.
4. Высокое удельное энергосодержание. При делении ядра урана, содержащего 235 нуклонов, выделяется энергия в количестве около 200 МэВ, т. е. примерно по 0,8 МэВ на одну а. е. м. При реакции ${}^3\text{T} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^4\text{He} + n$, в которой участвуют 5 нуклонов, выделяется 17,6 МэВ энергии, т. е. примерно по 3,5 МэВ на а. е. м., что более чем в четыре раза больше в расчете на единицу массы, чем при делении урана. Этот фактор говорит не только о том, что при термоядерных процессах извлекается

гораздо большая доля энергии, заключенной в атомных ядрах, но также может иметь и некоторое экономическое значение, отразившись на стоимости перевозок горючего.

Есть у термоядерных реакций и другие преимущества. Но есть и недостатки.

Проблемы при осуществлении УТС. Управляемый термоядерный синтез (УТС) должен быть именно управляемым, т. е. он должен давать в любой момент времени ровно столько энергии, сколько требуется, ни больше и не меньше. Совершенно очевидно, что термоядерный взрыв для этого совершенно не годится. Но как тогда получить высокую температуру и достаточную плотность горячей плазмы и поддерживать эти условия в течение достаточно долгого времени, и при этом обеспечить сохранность установки, обезопасив ее от разрушения? Достаточно напомнить, что уже при 6 000 К (температура поверхности Солнца) все вещества превращаются в пар, а для УТС требуется поддерживать температуру на уровне порядка 100 000 000 К. С первого взгляда кажется, что эта задача абсолютно не разрешима. Однако и к ней были найдены подходы.

Первые эксперименты. Первые опыты по проблеме УТС были начаты в Лос-Аламосе (США) еще в 1949 г. Затем в 1952 г. Эдвард Теллер продолжил аналогичные работы в Ливерморской лаборатории. С начала 1950-х гг. работы по УТС начались и в СССР. На первых порах все эти работы проводились в обстановке строжайшей секретности. Но в 1956 г. И. В. Курчатов, находясь в командировке в Англии, сделал в Харвелле доклад, в котором рассказал о первых опытах по УТС, осуществленных в СССР, и о полученных результатах. По признанию зарубежных ученых, доклад Курчатова произвел впечатление взорвавшейся атомной бомбы — настолько неожиданным в обстановке полной секретности был откровенный рассказ о наших работах.

Опыты, о которых рассказал Курчатов, проводились путем разряда мощных конденсаторных батарей через наполненную дейтерием трубку. В момент разряда была достигнута температура порядка 1 млн К. Но трубка при этом не разрушалась, так как возникающее при разряде сильное магнитное поле удерживало частицы нагретой плазмы вблизи центральной части трубки, не давая им возможности соприкосновения со стенками. Это самосжатие

разряда в узкую струйку стали называть *пинч-эффектом* (от английского слова *pinch* — сужение, сжатие). Были в этих опытах зарегистрированы и нейтроны, но как оказалось, эти нейтроны возникали не в термоядерных реакциях, а в результате ускорительных процессов, происходящих в сильных электромагнитных полях. А для термоядерных реакций полученные температуры были еще слишком малы.

Дальнейшие работы по УТС. После доклада Курчатова плотная завеса секретности, скрывавшая работы по УТС, была снята, и ученые разных стран стали обмениваться информацией о своих достижениях. При этом каждая страна шла своим путем, переживая как успехи, так и неудачи.

Еще в 1950 г. советские ученые Тамм и Сахаров предложили использовать для удержания нагретой плазмы сильные магнитные поля. В 1951 г. под руководством другого советского ученого Л. А. Арцимовича в СССР начались систематические работы по УТС. Был создан ряд установок, например, установка ОГРА с адиабатическими магнитными ловушками на концах длинной трубы, которые отражали часть частиц плазмы и возвращали их назад в трубу, что увеличивало вероятность столкновения частиц. В США была разработана установка другого типа, названная стелларатором, с очень сложной конфигурацией магнитных полей, силовые линии которых навиваются на тороидальные поверхности, скрученные в «восьмерку».



Лев Андреевич
Арцимович

На этих установках получались все более и более высокие параметры плазмы, но до самоподдерживающейся термоядерной реакции было еще очень далеко.

В 1957 г. американский физик Дж. Лоусон вывел условие, которое должно быть выполнено для того, чтобы энергия, получаемая от термоядерной реакции, превысила энергию, первоначально вкладываемую в плазму для ее нагрева и удержания. Этот критерий Лоусона требует, чтобы при температуре плазмы ≥ 10 кэВ (10^8 К) произведение плотности частиц в плазме на время ее удержания $n\tau$ было не менее 10^{14} см $^{-3}$ с для дейтерий-третиевой плазмы или 10^{16} см $^{-3}$ с для чисто дейтериевой плазмы.

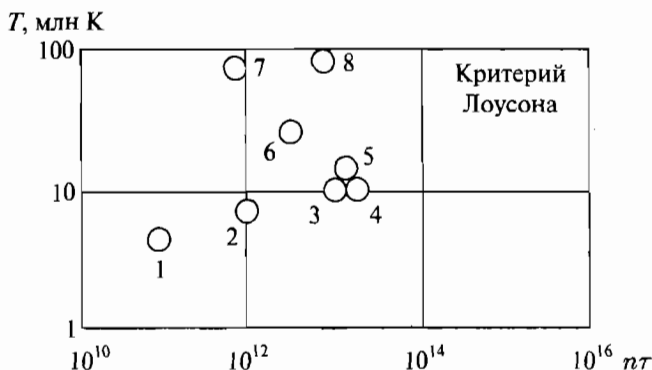


Рис. 9. Параметры, достигнутые на различных установках УТС: 1 — стелларатор «Ливень-2», ФИАН, Москва; 2 — стелларатор «Вендельштейн», Гархинг, ФРГ; 3 — ТОКАМАК Т-10, ИАЭ, Москва; 4 — Алкатор, ТОКАМАК МТИ, США; 5 — TFR, ТОКАМАК, Франция; 6 — лазер «Шива», АНЛ, США; 7 — PLT, ТОКАМАК, Принстон, США; 8 — 2×11 В — открытая ловушка АНЛ США

ТОКАМАК. Наибольший прогресс в деле приближения к условиям критерия Лоусона был достигнут на разработанных в СССР установках ТОКАМАК (**Т**Ороидальная **К**амера с **М**агнитными **К**атушками). В 1968 г. на установке ТОКАМАК-4 была впервые получена квазистационарная физическая термоядерная реакция. В 1982 г. на установках ТОКАМАК-10 в СССР и PLT (США) были достигнуты параметры: энергетическое время жизни плазмы 0,1 с, температура ионов на оси шнура $8 \cdot 10^7$ К. До выполнения критерия Лоусона оставалось совсем немного, но это были самые трудные шаги, так как параметры плазмы были невероятно высоки. Для ускорения решения проблемы УТС ученые разных стран создали объединенный проект ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), в который вошли представители России, США, ведущих европейских стран и Японии. Предполагается, что на реакторе ITER критерий Лоусона окажется выполненным. Был разработан проект реактора, но сроки его создания непрерывно отодвигались. Последний намечаемый срок ввода реактора в строй — 2010 г., но и он оказывается под сомнением.

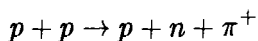
Инерционное удержание плазмы. Ввиду значительных трудностей на пути осуществления магнитного удержания плазмы, делались неоднократные попытки найти другие пути решения этой

проблемы. Одним из таких путей является направление работ, получившее название инерционного удержания плазмы. Суть этого метода заключается в следующем. Маленький (диаметром 1–5 мм) полый стеклянный шарик наполняется дейтерий-тритиевой смесью. Шарик свободно падает, и когда он проходит определенную точку пространства, на него с разных сторон обрушиваются мощные потоки лазерного излучения или пучки ускоренных на ускорителях электронов. Под действием этих пучков шарик мгновенно испаряется, и часть его массы разлетается в стороны, но другая часть массы, испытывая отдачу, устремляется к центру, где создается зона с очень высокой плотностью и температурой, в которой может возникнуть термоядерная реакция. Затем сбрасывается следующий шарик и т. д. Таким образом, такая установка должна работать в режиме серии следующих друг за другом микровзрывов, в которых и выделяется энергия. Расчеты показывают, что в процессе одного микровзрыва в центре шарика на время порядка 10^{-9} с может создаться давление порядка 10^9 атм и плотность в 1 000 раз превышает плотность твердого вещества. При этом при затратах энергии на подрыв шарика порядка 10^4 Дж можно ожидать получение энергии за счет термоядерной реакции в количестве 10^7 Дж. Работы по лазерному инерционному термоядерному синтезу (ИТС) были начаты в Москве в ФИАН в начале 60-х гг. XX в. Было создано несколько установок: «Кальмар» (1970), «Флора» (1975), начато строительство еще более мощной установки «Дельфин» с 216 пучками, способными за 1 нс вогнать в шарик энергию 10 000 Дж. Одновременно создавались и установки с электронными ускорителями, например, «Ангара-5» с 48 модулями ускорителей типа «Ангара», каждый из которых ускоряет электроны до энергии 2,5 МэВ при силе тока до 400 кА в импульсе длительностью $6 \cdot 10^{-8}$ с. Но надо прямо сказать, что надежды на успех данного направления выглядят еще более проблематично, чем направления, основанного на магнитном удержании плазмы.

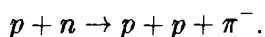
Мюонный катализ. Трудности, возникающие при получении сверхвысоких температур и при работе с веществом при таких температурах, заставили задуматься над вопросом: а нельзя ли осуществить реакцию синтеза ядер гелия из водорода при комнатных температурах? На первый взгляд это представляется абсолютно невозможным из-за кулоновского барьера. Правда, ядра могут сближаться, проходя через кулоновский потенциальный барьер

в результате так называемого туннельного эффекта, но вероятность такого события при низких температурах чрезвычайно мала. Расчеты показывают, что два ядра дейтерия, входящие в состав одной молекулы D_2O , могут сблизиться и слиться в количестве одного события в 1 м^3 тяжелой воды за интервал времени в 10^{21} лет! (Напомним, что возраст Вселенной составляет «всего» $10^{11} - 10^{12}$ лет).

Однако российский физик И. М. Франк еще в 1947 г. заметил, что выход из положения может быть найден с помощью открытых за несколько лет до этого мюонов. Напомним, что мюоны возникают при распаде других частиц — пионов (75), которые, в свою очередь, образуются при столкновениях ускоренных до больших энергий протонов с атомными ядрами при таких процессах, как



или



Возникающие при распаде отрицательных пионов отрицательно заряженные мюоны ведут себя в веществе подобно электронам (иногда поэтому их называют тяжелыми электронами). В частности, благодаря кулоновскому взаимодействию, они могут захватываться ядрами на орбиты, образуя водородоподобные мюонные атомы — мезоатомы, например, дейтерия μd или трития μt . Но так как масса мюона в 207 раз больше массы электрона, то во столько же раз будет меньше радиус его боровской орбиты R_B , и если для водорода $R_B = 5,3 \cdot 10^{-9}$ см, то для мюонного атома водорода $R_B = 2,8 \cdot 10^{-11}$ см. Такой малюсенький нейтральный атом, очень похожий на нейтрон, не испытывая кулоновского отталкивания, может очень близко подойти к другому ядру дейтерия и соединиться с ним, образовав молекулярный мезоион дейтерия: $\mu d + d \rightarrow (d\mu d)^+$. И так как расстояние между ядрами дейтерия в таком мезоионе окажется на два порядка меньше, чем в молекуле обычного дейтерия, то вероятность их слияния в ядро гелия возрастет на много порядков. Аналогичный процесс может произойти, если вместо мезоатома дейтерия использовать мезоатом трития: $\mu t + d \rightarrow (d\mu t)^+$. В таком процессе синтеза ядер гелия мюон освобождается, и так как время, требующееся для слияния ядер изотопов водорода ($\approx 10^{-12}$ с), оказывается на 6 порядков меньше времени жизни мюона ($\approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ с), то один мюон, перескакивая от ядра к ядру, может вызвать целую цепочку таких

процессов, пока не распадется. Таким образом, мюон выступает в данном случае в роли катализатора процесса синтеза ядер гелия, поэтому и весь этот процесс стали называть *мюонным катализом*.

Впервые мюонный катализ наблюдал в 1957 г. Л. Альварец (США) с помощью пузырьковой камеры. В 1979 г. В. П. Дзеляпов в Дубне впервые осуществил эксперимент по обнаружению μ -катализа в смеси дейтерия с тритием. Поскольку при реакции ${}^2\text{D} + {}^3\text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ выделяется энергия 17,6 МэВ, а один мюон может вызвать до сотни таких реакций, то общее выделение энергии составит порядка 1,7 ГэВ на мюон. Это, казалось бы, открывает путь к получению энергии путем ядерного синтеза при низких температурах. В нашей стране работы по мюонному катализу проводились коллективом ученых под руководством В. Г. Кириллова-Угрюмого. Однако, как выяснилось, для получения одного мюона на ускорителе требуются затраты энергии порядка 4–6 ГэВ. Поэтому для получения энергии холодный ядерный синтез (ХЯС) с помощью мюонов оказался бесперспективным, хотя его и можно использовать для других целей.

Выдвигались и совсем фантастические проекты типа «холодного термояда» при электролизе тяжелой воды (американские ученые М. Флейшман и С. Понс, 1989 г.), в которых вопреки всем физическим законам предполагалось осуществить реакцию синтеза ядер при комнатной температуре, но все такие проекты, естественно, очень быстро уходили в небытие.

Некоторые итоги. Если от открытия деления урана (1938 г.) до пуска первой атомной электростанции (1954 г.) прошло всего неполных 16 лет, то над проблемой УТС ученые бьются уже более полувека, а реальных практических результатов пока нет. Но все же достигнутый прогресс и постепенное повышение параметров создаваемых установок позволяют надеяться, что в XXI в. проблема УТС будет решена. И тогда человечество получит в свои руки неисчерпаемый источник энергии, который на тысячелетия отодвинет угрозу «энергетического голода».

Развитие теоретических представлений об атомном ядре (вторая половина XX века)

Зачем вообще нужны ядерные модели? Атомное ядро является сложной системой, состоящей из многих частиц — нуклонов, связанных между собой силами особой природы — ядерными силами. Идеальная теория атомного ядра должна была бы, отталкиваясь от свойств ядерных сил, описать все известные свойства любого ядра: его размеры, форму, энергию связи, значения механического, магнитного и электрического квадрупольного моментов, параметры всех возбужденных состояний; предсказать, будет ли это ядро стабильным или нестабильным; позволить определить все характеристики возможных видов распада: их энергии, константы распада и т. п., а также количественно описать протекание любых процессов взаимодействия ядер с любыми частицами (рассеяние и все возможные ядерные реакции). Такой всеобъемлющей теории атомного ядра в настоящее время нет, и вряд ли она вообще когда-либо будет создана. Среди причин, дающих основание для столь мрачного утверждения, главными являются две.

1. Как показывают экспериментальные данные, ядерные силы обладают целым рядом специфических свойств, например таких, как:

- большая величина на малых расстояниях;
- короткодействие;
- склонность к насыщению;
- нецентральный характер;
- зависимость от взаимной ориентации спинов частиц;
- зарядовая инвариантность;
- обменный характер.

Совершенно очевидно, что трудно себе даже представить возможность описания всех этих свойств единой формулой, как это делается, например, с исчерпывающей полнотой при описании силы взаимодействия двух электрических зарядов по закону Кулона. Поэтому оказывается невозможным точное аналитическое описание взаимодействия даже двух нуклонов друг с другом.

2. Атомные ядра состоят из многих сильно взаимодействующих друг с другом частиц, а задача взаимодействия всего трех тел, как известно, не имеет точного аналитического решения даже в классической механике при хорошо известных силах взаимодействия (гравитационных или кулоновских). Кроме того, при рассмотрении многих систем, в которых действуют такие известные силы (например, движение планет вокруг Солнца или электронов вокруг ядра), можно, в первом приближении, искать решение, рассматривая взаимодействие относительно легкой частицы (планеты или электрона) с массивным центральным телом (Солнцем или ядром соответственно), т. е. решать относительно простую задачу взаимодействия двух тел. А затем, пользуясь теорией возмущений, рассчитывать эффекты взаимного влияния частиц друг на друга в виде небольших поправок к основному решению. В атомном ядре такого массивного центрального тела нет, поэтому теорией возмущений воспользоваться не удастся и приходится иметь дело с задачей многих тел в ее самом общем виде.

Из сказанного следует, что на построение единой универсальной теории атомного ядра рассчитывать не приходится. Поэтому для того, чтобы хоть как-то описывать наблюдаемые явления, и прибегают к использованию различных моделей атомных ядер.

Модель атомного ядра — это система относительно простых представлений о ядре, позволяющих описать определенный круг наблюдаемых явлений (а не все известные явления). Поскольку отбор явлений (экспериментальных фактов) производился поразному, в течение последних десятилетий XX в. были созданы различные модели, весьма не похожие друг на друга: в одних ядро представлялось в виде капли жидкости, в других — в виде облачка газа, в третьих — в виде твердого тела.

Все эти модели принято разделять на две основные группы:

1. *Коллективные модели*, в которых все нуклоны считаются сильно связанными между собой в единый и более или менее однородный коллектив (ядерную материю). Иногда такие модели

называют моделями с сильным взаимодействием. К ним относятся: упоминавшаяся выше модель жидкой капли и модель жесткого ротатора.

2. *Модели независимых частиц*, в которых считается, что каждый нуклон в ядре движется в некотором усредненном поле сил, создаваемом всеми остальными нуклонами. Это поле сил описывается с помощью специально подбираемого потенциала, и поскольку введением такого потенциала воздействие на каждый нуклон всех остальных нуклонов уже учтено, можно считать, что каждый нуклон движется в таком потенциале свободно и независимо от других нуклонов, подчиняясь лишь общим законам квантовой механики. К таким моделям относятся модель ферми-газа и модель ядерных оболочек.

Попытки объединить сильные стороны как тех, так и других моделей привели к созданию обобщенной модели ядра. Несколько особняком стоит оптическая модель. Рассмотрим вкратце основные особенности этих моделей.

Модель жидкой капли. Созданная еще в 30-х годах модель жидкой капли, рассмотренная в главах 5 и 6, несмотря на свои поразительные успехи, являлась «полуклассической» моделью и не могла объяснить многие явления, в которых проявлялись квантовые свойства ядер — дискретные энергетические уровни, их происхождение, параметры и т. п. Поэтому накопление экспериментальных данных потребовало создание новых ядерных моделей.

Модель жесткого ротатора. Разработана специально для объяснения природы так называемых *ротационных уровней* ядер. В основе модели лежит экспериментально установленное наличие у многих ядер так называемых *квадрупольных электрических моментов*, что говорит о значительных отклонениях формы таких ядер от сферически симметричной: они выглядят как вытянутые или сплюснутые эллипсоиды и называются *деформированными ядрами*. Такой эллипсоид можно привести во вращение вокруг оси, перпендикулярной его оси симметрии. Для этого потребуется некоторая энергия, которую особенно просто можно найти для четно-четных деформированных ядер:

$$E_{\text{rot}} = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1), \quad (92)$$

где J — момент инерции ядра, а I — квантовое число, которое в соответствии со свойствами симметрии волновых функций может иметь только четные значения: 0, 2, 4, Эта формула достаточно точно описывает последовательность квантовых чисел I и интервалов между нижними уровнями четно-четных деформированных ядер, что подтверждает их вращательную природу. Несколько более сложной оказывается картина у нечетных ядер, но и у них можно выделить целые полосы вращательных уровней. Однако происхождение деформации ядра данная модель не объясняет и принимает ее как экспериментальный факт.

Модель ядерных оболочек. Еще в 1934 г. Элзассер обратил внимание на то, что если в ядре количество протонов Z или количество нейтронов N равняется одному из следующих чисел:

$$2, 8, 20, 50, 82, 126,$$

то такое ядро обладает повышенной устойчивостью по сравнению с соседними ядрами (иногда к этим числам добавляют еще два числа 14 и 28, но их влияние на устойчивость ядер несколько менее заметно). И хотя это влияние проявляется в большом числе экспериментальных фактов и сомнений не вызывает, объяснить это явление долгое время физикам не удавалось. Не удавалось даже заметить какую-либо закономерность между этими числами. Влияние этих чисел на свойства ядер казалось каким-то таинственным, магическим, поэтому эти числа так и были названы *магическими числами*, а ядра, в которых Z или N равнялись одному из магических чисел — *магическими ядрами*. Существуют четыре стабильных ядра, у которых и Z , и N относятся к магическим числам:

$${}^2\text{He}_2, {}^8\text{O}_8, {}^{20}\text{Ca}_{20} \text{ и } {}^{82}\text{Pb}_{126}.$$

Эти ядра называются *дважды магическими*.

Для объяснения этих фактов Гепперт-Майер, Йенсен и др. в 1949 г. разработали *модель ядерных оболочек*, в которой считается, что нуклоны в ядре находятся в поле специально подобранного потенциала и занимают в нем места на энергетических уровнях в соответствии с принципом Паули (наподобие электронов в атоме). При этом наилучшие результаты получались с потенциальной ямой с размытым краем, напоминающим формулу (64), описывающую результаты опытов Хофстедтера. Оказалось, что уровни в такой яме располагаются в виде групп близко расположенных

уровней со значительными расстояниями между группами. Такие группы уровней стали называть *ядерными оболочками* (опять же по аналогии с атомом, хотя в ядре невозможно придать им столь же явный геометрический смысл). Введя в рассмотрение так называемое *спин-орбитальное взаимодействие*, создатели модели показали, что количества нуклонов каждого вида в ядрах с полностью заполненными оболочками точно равняются магическим числам.

Модель ядерных оболочек позволила не только объяснить происхождение магических чисел. На ее основе оказалось возможным предсказать значения спинов и четностей большинства легких и некоторых тяжелых ядер в основных состояниях, определить спины и четности некоторых одночастичных возбужденных уровней ядер, предсказать примерные значения магнитных моментов всех нечетных ядер и общий характер зависимости магнитных моментов от момента количества движения таких ядер (теория Шмидта), объяснить происхождение и некоторые особенности изомерии атомных ядер и целый ряд других фактов. Однако и у этой модели есть свои ограничения. Наиболее успешно модель ядерных оболочек применяется для описания свойств магических и близких к магическим ядер, однако и для таких ядер иногда проявляются сильные расхождения между предсказаниями модели и экспериментальными фактами. Основанная на представлении о сферически-симметричном потенциале, модель ядерных оболочек не может объяснить значительную деформацию многих ядер и связанное с этим фактом наличие у таких ядер больших квадрупольных электрических моментов и ротационных возбужденных уровней, о которых говорилось выше.

Обобщенная модель ядра. Успехи описанных выше моделей ядра и в то же время — их взаимная противоречивость привели к попыткам создания *обобщенной модели ядра*, основной вклад в развитие которой внесли американский физик Рейнуотер (1950), а также Оге Бор и Бен Моттельсон. Эта модель позволила объяснить деформацию немагических ядер, уточнить модель жесткого ротатора, объяснить отклонения магнитных моментов нечетных ядер от кривых Шмидта.



Оге Бор

В 1955 г. Нильсон разработал схему, позволяющую учесть влияние деформированного потенциала ядра на положение одночастичных уровней и тем самым существенно уточнить предсказания модели ядерных оболочек, в частности — по моментам и четностям отдельных ядер. На основании обобщенной модели были разработаны поправки к формуле Вайцзеккера, значительно улучшившие ее согласие с экспериментальными данными, а также были найдены подходы к объяснению асимметрии деления атомных ядер. Но и обобщенная модель ядра не может объяснить все известные факты о ядре и поэтому не может считаться универсальной моделью.

Оптическая модель ядра. В отличие от других моделей, оптическая модель применяется для описания протекания различных процессов взаимодействия частиц с ядрами, например таких, как рассеяние и поглощение нуклонов. Поэтому ее правильнее было бы, пожалуй, назвать моделью ядерных взаимодействий. Первый вариант оптической модели был разработан в 1953 г. Фешбахом, Портером и Вайскопфом.

К созданию оптической модели подтолкнули факты, относящиеся к поведению сечений рассеяния быстрых нейтронов. Было замечено, что вместо ожидавшегося плавного уменьшения таких сечений, при увеличении энергии нейтронов, на соответствующих кривых появляются плавные максимумы и минимумы, причем при переходе от ядра к ядру вся картина повторяется, только положение этих максимумов и минимумов несколько смещается. В целом картина очень напоминала интерференционные явления, наблюдающиеся при взаимодействии световых волн с различными препятствиями. Поэтому и процесс рассеяния быстрых нейтронов стали описывать как взаимодействие плоских волн с ядром. Вначале ядро считали «черным», т. е. полностью поглощавшим падающие на него волны, и рассматривали только интерференцию огибающих его волн. Затем было замечено, что значительно лучшие результаты получаются, если ядро считать полупрозрачным, т. е. допустить возможность как поглощения нейтронов ядром, так и их пролет через ядро насквозь. Для описания таких процессов пришлось ввести комплексный потенциал, действительная часть которого описывает рассеяние, а мнимая — поглощение нейтронов. Широкую известность получил потенциал Вудса—

Саксона:

$$U(r) = \frac{U_0(1 + i\xi)}{1 + \exp \left\{ \frac{r - R}{a} \right\}}, \quad (93)$$

в котором действительная и мнимая части одинаково зависят от расстояния от центра ядра r и только отличаются по абсолютной величине благодаря множителю ξ . В этой формуле R — средний радиус ядра, a — ширина зоны «размытого» края ядра. Обратите внимание, что и в этом случае форма потенциала фактически совпадает с формулой (64), описывающей результаты опытов Хофстедтера. Предлагались и другие формы потенциала, например, потенциал с поверхностным поглощением нейтронов Бджокланда, Фернбаха и Шермана, в котором действительная и мнимая части по-разному зависят от r .

Оптическая модель ядра позволяет вычислять:

- полные сечения взаимодействия нейтронов с ядрами и их зависимость от энергии нейтронов и от массового числа, а также сечения некоторых парциальных процессов (упругого и неупругого рассеяния, поглощения нейтронов ядрами и др.);
- угловые распределения упруго и неупруго рассеянных нейтронов;
- эффективные сечения и угловые распределения при рассеянии протонов и других заряженных частиц атомными ядрами;
- так называемые силовые функции s -, p - и d -нейтронов в зависимости от значений массовых чисел ядер.

Другие модели ядер. Для описания отдельных явлений и количественных характеристик ядер предлагались и другие модели: модель ферми-газа, α -частичная, сверхтекучая и др., которые здесь не рассматриваются.

Некоторые итоги

1. В настоящее время нет ни одной модели, которая могла бы полностью объяснить все известные свойства атомных ядер в рамках единой, стройной, самосогласованной теории.
2. Каждая из созданных моделей имеет строго ограниченные рамки применения: она может использоваться для описания одних явлений и оказывается неспособной объяснить другие явления.

3. Многие представления различных моделей противоречат друг другу: так, например, в коллективных моделях предполагается сильное взаимодействие нуклонов между собой, а в моделях независимых частиц — относительно слабое.
4. В то же время между моделями существуют и некоторые связи. Например, полученная в оптической модели форма потенциальной ямы с успехом используется в моделях независимых частиц; повышение плотности уровней с ростом энергии возбуждения в оболочечной модели приводит в пределе к непрерывному энергетическому спектру состояний, характерному для полуклассической модели жидкой капли и др.
5. Все рассмотренные модели являются феноменологическими, так как они исходят из наблюдаемых на опыте общих свойств ядер и происходящих в них явлений (феноменов), а не выводят эти свойства и явления из фундаментальных свойств действующих между нуклонами ядерных сил. В настоящее время делаются попытки создания так называемых микроскопических теорий, основанных на использовании таких представлений, но на пути их построения возникают существенные трудности, связанные как с неполным знанием и сложным характером ядерных сил, так и с громоздкостью математических расчетов.

В целом же можно заключить, что совокупность всех моделей позволяет описать все основные свойства атомных ядер, что приближает нас к полному пониманию столь сложного объекта природы, как атомное ядро.

Заключение

История ядерной физики далеко не закончена. Каждый год приносит все новые и новые известия об экспериментальных открытиях, зарождении новых теоретических представлений о структуре ядра и элементарных частиц. Регулярно проходят научные конференции, на которых ученые докладывают о своих достижениях, издаются многочисленные научные журналы с десятками и сотнями статей с результатами последних исследований. Особенно бурно развивается отпочковавшаяся от ядерной физики и ставшая фактически отдельной наукой физика элементарных частиц. Так что окончательную точку под рассказом об истории ядерной физики ставить еще рано.

* * *

Автор выражает глубокую благодарность докторам физико-математических наук профессорам О. Т. Грудзевичу, Е. С. Матусевичу, В. Г. Кириллову-Угрюмову и доктору философских наук профессору В. А. Канке за ценные советы и замечания по данной работе, а также благодарит сотрудниц ОГТУАЭ В. Виноградову и И. Гончарову за помощь в подборе фотографий ученых.

Приложение 1

Краткие биографические сведения

АВОГАДРО (Avogadro) Амедео (1776–1856) — ит. физик и химик. Выдвинул молекулярную гипотезу строения в-ва (1811), установил один из газовых законов, названных его именем.

АЛЬВАРЕЦ (Alvarez) Луис Уолтер (1911–1988) — амер. физик. Открыл захват электронов (1938), создал современную методику работы с пугзырьковыми камерами, впервые наблюдал мюонный катализ, открыл множество резонансов (1960). Ноб. пр. (1968).

АМАЛЬДИ (Amaldi) Эдоардо (1908–1989) — ит. физик, ин. ч. АН СССР (1958). Тр. по ядерной физике и физике элем. частиц, совм. с Э. Ферми участвовал (1934) в открытии замедления нейтронов.

АНАКСАГОР (ок. 500–428 гг. до н. э.) — др.-греч. философ. Выдвинул учение о неразрушимых элементах (позже названных гомеомериями).

АНАКСИМАНДР (610–546 гг. до н. э.) — др.-греч. философ, ученик Фалеса, представитель милетской школы. Автор первого философского сочинения на греч. языке «О природе». В качестве первоматерии считал «апейрон».

АНАКСИМЕН (585–524 гг. до н. э.) — др.-греч. философ, ученик Анаксимандра, представитель милетской школы. Первоначалом всего считал воздух, из сгушения которого возникают все вещи.

АНДЕРСОН (Anderson) Карл Дейвид (1905–1991) — амер. физик. Открыл в космических лучах позитроны (1932) и мюоны (1936). Ноб. пр. (1936, совм. с Гессом).

АРИСТОТЕЛЬ (384–322 гг. до н. э.) — др.-греч. философ. Развил атомист. представления.

АРЦИМОВИЧ Лев Андреевич (1909–1973) — сов. физик. Под рук. А. впервые разработан эл.-м. метод разделения изотопов, с 1951 г. рук. работами по проблеме термоядерного синтеза, впервые в лаб. условиях получил термояд. реакцию. Герой Соц. Труда (1969), Лен. пр. (1958), Гос. пр. (1953, 1971), чл. АН СССР (1953).

- АСТОН** (Aston) Френсис Уильям (1877–1945) — англ. физик. Создал масс-спектрограф (1919), с его помощью открыл и исследовал многие стабильные изотопы. Построил кривую упаковочных коэффициентов (кривая А). Ноб. пр. (1922), ин. ч.-к. АН СССР (1925).
- БАРКЛА** (Barkla) Чарльз Гловер (1877–1944) — англ. физик, открыл (1906) характер. рентген. изл.-ие. Ноб. пр. (1917).
- БЕККЕРЕЛЬ** (Becquerel) Антуан Анри (1852–1908) — фр. физик. открыл естеств. радиоактивность солей урана (1896). Ноб. пр. (1903, совм. П. и М. Кюри).
- БЕРТОЛЛЕ** (Berthollet) Клод Луи (1748–1822) — франц. химик, основатель учения о химическом равновесии. Разработал совм. с Лавуазье новую химич. номенклатуру. В отличие от Ж. Пруста считал состав химич. соединений переменным. Открыл множество химич. соединений, в том числе хлорат калия (1785), названный позднее бертолетовой солью.
- БЕРЦЕЛИУС** (Berzelius) Йенс Якоб (1779–1848) — швед. химик. Открыл церий (1803), селен (1817), торий (1828). Определил атомные массы 45 элементов, ввел современные знаки элементов. Выдвинул предположение о том, что в равных объемах газов содержится равное число атомов.
- БЕТЕ** (Bethe) Ханс Альбрехт (р. 1906) — нем. физик-теоретик. Указал наиболее вероятные циклы термоядерных реакций в звездах (1938), участник создания первой атомной бомбы. Ноб. пр. (1967).
- БЛОХ** Феликс (1905–1983) — амер. физик, р. в Швейцарии, с 1934 — в США. Один из основоположников квант. теории твердого тела, открыл ядерный магнитный резонанс (1946, незав. от Пёрсела). Ноб. пр. (1952, совм. с Пёрселом).
- БЛОХИНЦЕВ** Дмитрий Иванович (1908–1979) — сов. физик-теоретик, один из рук. создания первой в мире АЭС. Предложил построить импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР (1956). Тр. по квант. мех., ядерной физике, теории ядерных реакторов, физике элемент. частиц. Герой Соц. Труда (1956), Лен. пр. (1957), Гос. пр. СССР (1952, 1971). Ч.-к. АН СССР (1958).
- БЛЭКЕТТ** (Blackett) Патрик Мейнард Стюарт (1897–1974) — англ. физик. Классич. иссл. по физике косм. лучей с помощью усовершенствованной им камеры Вильсона. Ноб. пр. (1948). Ин. чл. АН СССР (1966).
- БОЗЕ** Шатъендранат (1894–1974) — инд. физик. Один из создателей (1924) квант. статистики (статистика Б.-Эйнштейна).

БОЙЛЬ (Boyle) Роберт (1627–1691) — англ. физик и химик. Сформулировал (1661) первое науч. определение химич. элемента, установил (1662) один из газовых законов (закон Б.-Мариотта).

БОР (Bohr) Нильс (1885–1962) — дат. физик. Создал теорию атома, в основу которой легли планетарная модель атома, квантовые представления и выдвинутые им постулаты (1913), разработал теорию ядерных реакций, основанную на представлении о промежуточном ядре (1936), выдвинул модель жидкой капли (1936, совм. с Вайцзеккером) и теорию процесса деления ядер (1939). Ноб. пр. (1922).

БОР (Bohr) Оге (р. 1922) — сын Нильса Бора. Один из авторов обобщенной модели ядра. Ноб. пр. (1975, совм. с Б. Моттelsonом и Дж. Рейнуотером).

БОРН (Born) Макс (1882–1970) — нем. физик, дал статист. интерпретацию волновой функции. Ноб. пр. (1954, совм. с Боте). Чл.-кор. АН СССР (1924), поч. чл. АН СССР (1934).

БОТЕ (Bothe) Вальтер (1891–1957) — нем. физик. Разработал метод совпадений (1924) и использовал его при исслед. космич. лучей. Ноб. пр. (1954, совм. с Борном).

БРОЙЛЬ де (de Broglie) Луи-Виктор-Пьер-Раймон (1892–1987) — фр. физик, открыл волновую природу частиц (1924, волны де-Бройля), Ноб. пр. (1929), ин. чл. АН СССР (1958).

БРЭГГ (Bragg) Уильям Генри (1862–1942) — англ. физик, совм. с сыном основал рентгеноструктурный анализ.

БРЭГГ (Bragg) Уильям Лоренс (1890–1971) — англ. физик, сын Уильяма Генри Б., сформулировал так называемое условие Б.-Вульфа (1913).

БЭКОН (Bacon) Роджер (1214–1292) — англ. философ и естествоиспытатель, монах-францисканец. Придавал большое значение математике и опыту. Занимался оптикой, астрономией, алхимией. Предвосхитил многие открытия.

БЭКОН Фрэнсис (1561–1626) — англ. философ, родоначальник англ. материализма. Выступал за очищение разума от заблуждений («идолов» или «призраков»), обращение к опыту и обработку его посредством индукции, основа которой — эксперимент.

ВААЛЬС ван дер (van der Waals) Ян Дидерик (1837–1923) — нидерл. физик, вывел (1873) уравнение состояния реальных газов, назв. его именем. Ноб. пр. (1910).

ВАВИЛОВ Сергей Иванович (1891–1951) — сов. физик, чл. АН СССР (1970). Тр. по физ. оптике, в том числе по люминесценции. Под рук. В. было открыто излучение Черенкова-В. (1934). Гос. пр. (1943, 1946, 1951, 1952 посмертно).

- ВАЙНБЕРГ** (Weinberg) Стивен (1933–1996) — амер. физик, один из авторов теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия (1960-е гг.). Ноб. пр. (1979, совм. с Глэшоу и Саламом).
- ВАЙСКОПФ** (Weisskopf) Виктор Фредерик (1908–2002) — р. в Австрии, работал в Германии, Дании, с 1937 — в США. В 1961–1965 дир. Европ. центра ядерных иссл. Осн. труды по ядерной физике, квант. теории поля и теории элемент. частиц.
- ВЕКСЛЕР** Владимир Иосифович (1907–1966) — сов. физик, основатель школы по ускорению заряж. частиц, выдвинул принцип автофазировки (незав. от Макмиллана), разработал основы коллективного метода ускорения. Под рук. В. созданы первый сов. синхротрон (1947) и синхрофазотрон (1957). Лен. пр. (1959), Гос. пр. (1951).
- ВЕРНОВ** Сергей Николаевич (1910–1982) — сов. физик, акад. АН СССР (1968), Герой Соц. Труда (1980). Иссл. косм. лучи в верхних слоях атм. и вне ее. Участник открытия (1958) внешних радиац. поясов Земли. Лен. пр. (1980).
- ВИГНЕР** (Wigner) Юджин Пол (1902–1995) — амер. физик-теоретик. Род. в Венгрии, работал в Германии, с 1930 — в США. Одним из первых ввел в квант. механику теорию групп и идеи симметрии, совм. с Брейтом получил формулу (1936), описывающую изменения эффект. сечений вблизи резонанса, участ. в разработке первого амер. ядерного реактора. Ноб. пр. (1963).
- ВИЛЬСОН** (Wilson) Чарлз Томсон Рис (1869–1959) — англ. физик. Изобрел камеру В. (1912). Ноб. пр. (1927).
- ВИН** (Wien) Вильгельм (1864–1928) — нем. физик, вывел законы излучения и смещения (1893), назв. его именем. Ноб. пр. (1911).
- ВУ** Цзяньсюн (р. 1910) — физик-эксперим., род. в Китае, с 1940 — в США. Первой доказала экспериментально (1957) несохранение четности при β -распаде.
- ГАМОВ** Георгий Анатольевич (1904–1968) — русск. физик, с 1934 — в США. Разработал теорию α -распада (1928), иссл. β -распад (правила отбора Г.-Теллера).
- ГАН** — см. ХАН.
- ГАУДСМИТ** (Goudsmit) Сэмюэл Абрахам (1902–1979) — р. в Гааге, с 1927 — в США. Совм. с Дж. Уленбеком пришел к представлению о спине электрона (1925).
- ГЕЙГЕР** (Geiger) Ханс (1882–1945) — нем. физик. Изобрел (1908) совм. с Резерфордом прибор для регистрации частиц (счетчик Г.-Мюллера).

Установил так называемый закон Г.-Неттолла, выражающий зависимость вероятности α -распада от энергии α -частиц (1911–1912). Совм с Марсденом исслед. рассеяние α -частиц тонкими фольгами, подтвердил экспериментально ф-лу Резерфорда.

ГЕЙЗЕНБЕРГ (Heisenberg) Вернер (1901–1976) — нем. физик-теоретик, один из создателей квант. механики. Предложил матричный вариант квант. мех. (1925), сформулировал принцип неопределенности (1927), независимо от Д. Д. Иваненко высказал гипотезу о протон-нейтронном строении ядра (1932), ввел концепцию матрицы рассеяния (1943). Ноб. пр. (1932).

ГЕЙ-ЛЮССАК (Gay-Lussac) Жозеф Луи (1778–1850) — фр. физик и химик. Открыл газовые законы: теплового расширения газов (1802) и объемных отношений (1808), названные его именем.

ГЕЛЛ-МАН (Gell-Mann) Марри (р. 1929) — амер. физик-теоретик. Фунд. иссл. по квант. теории поля и по элемент. частицам. Ввел понятие странности (1953) и открыл закон ее сохранения. Предложил систематику элем. частиц (1961) и гипотезу кварков (1964). Ноб. пр. (1969).

ГЕЛЬМОНТ (Helmont) Ян Баптист ван (1579–1644) — голл. естествоиспытатель и алхимик, ввел термин «газ», впервые поставил опыты по изучению питания растений.

ГЕППЕРТ-МАЙЕР (Goerpert-Mayer) Мария (1906–1972) — америк. физик, одна из авторов модели ядерных оболочек (1949). Ноб. пр. (1963, совм. с Йенсеном).

ГЕРАКЛИТ Эфесский (конец VI — начало V вв. до н. э.) — др.-греч. философ, один из родоначальников диалектики.

ГЕРЦ (Hertz) Генрих Рудольф (1857–1894) — нем. физик. Эксп-но доказал существование эл.-м. волн и иссл. их свойства. Развил теорию Максвелла, придав ур-ям электродинамики симметр. форму, которая обнаруживает тесную связь элект. и магн. явлений. Считал, что эфир увлекается движ. телами. Впервые дал точное описание внешнего фотоэффекта. В честь него названа единица частоты Гц.

ГЕРЦ (Hertz) Густав (1887–1975) — нем. физик. Совм. с Дж. Франком — опыт Франка и Герца (1913) по столкновениям электронов с атомами и молек. газа, доказ. сущ-ие дискретных уровней энергии. В 1945–1950 г. работал в СССР. Ноб. пр. (1925, совм. с Франком). Чл. АН СССР (1958). Гос. пр. СССР (1951).

ГЕСС (Hess) Виктор Франц (1883–1964) — австр. физик, с 1938 — в США. Открыл космические лучи (1912). Ноб. пр. (1936).

ГЛАЗЕР (Glaser) Дональд Артур (р. 1926) — амер. физик, изобрел (1952) пузырьковую камеру. Ноб. пр. (1960).

- ГЛЭШОУ** (Glashow) Шелдон (р. 1932) — амер. физик, один из авторов теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия (1960-е гг.). Ноб. пр. (1979, совм. с Вейнбергом и Саламом).
- ДАЛТОН** (Dalton) Джон (1766–1844) — англ. физик и химик. Создатель химического атомизма, установил закон кратных отношений (1803), ввел понятие «атомный вес», первым определил атомные веса ряда элементов, открыл газовые законы, названные его именем.
- ДЕКАРТ** (Descartes) Рене (1596–1650) — франц. философ, математик, физик и физиолог (латинизиров. Картезий). Разрабатывал дедуктивный метод познания наряду с анализом. Автор высказывания: «Мыслю — следовательно, существую». В то же время признавал существования Бога и души (дуализм Д.).
- ДЕМОКРИТ** (ок. 460–370 гг. до н. э.) — др.-греч. философ, один из основателей антич. атомистики. Считал, что существуют только атомы и пустота, атомы вечные, неразрушимые, различаются формой и величиной; они постоянно движутся, соединяются друг с другом и образуют все видимые предметы и миры. Истечения из атомов вызывают ощущения.
- ДИРАК** (Dirac) Поль Адриен Морис (1902–1984) — англ. физик. Один из создателей квантовой механики, разработал квант. статистику (1926, статистика Ферми-Д.), релятивист. теорию движения электрона, вывел уравнение Д. (1928), предсказал позитрон, а также рождение и аннигиляцию пар, предложил метод вторичного квантования, заложил основы квант. электродинамики и квант. теории гравитации. Ноб. пр. (1933, совм. с Шредингером).
- ДОПЛЕР** (Doppler) Кристиан (1803–1853) — австр. физик и астроном, открыл эффект (1842), названный его именем.
- ДЭВИССОН** (Davisson) Клинтон Джозеф (1881–1958) — амер. физик, открыл дифракцию электронов на кристаллах (1927). Ноб. пр. (1937, совм. с Д. П. Томсоном).
- ДЮЛОНГ** (Dulong) Пьер Луи (1785–1838) — фр. физик и химик. Совм. с А. Пти установил (1819) закон теплоемкости (закон Дюлога и Пти).
- ЖОЛИО-КЮРИ** (Joliot-Curie) Ирен (1897–1956) — дочь П. и М. Кюри. Совм. с мужем Фредериком Ж.-К. открыла искусств. радиоактивность и позитронную радиоактивность (1934), вторичные нейтроны деления (1939). Ноб. пр. (1935). Чл.-кор. АН СССР (1947).
- ЖОЛИО-КЮРИ** (Joliot-Curie) Фредерик (1900–1958) — фр. физик. Муж Ирен Ж.-К., с которой работал. Открыл искусств. радиоактивность и позитронную радиоактивность (1934), вторичные нейтроны деления (1939). Ноб. пр. (1935). Чл.-кор. АН СССР (1947).

- ЗЕЕМАН** (Zeeman) Питер (1865–1943) — нидерл. физик, открыл эффект (1896), назв. его именем. Ноб. пр. (1902, совм. с Лоренцом).
- ЗЕЛЬДОВИЧ** Яков Борисович (1914–1987) — сов. физик. В 1939–1941 совм. с Ю. Б. Харитоном впервые рассчитал цепную реакцию деления урана, уч. в создании сов. атомного оружия. Трижды Герой Соц. Труда (1949, 1954, 1956), Лен. пр. (1957), Гос. пр. (1943, 1949, 1951, 1953).
- ИВАНЕНКО** Дмитрий Дмитриевич (1904–1994) — рос. физик. Выдвинул гипотезу строения атомного ядра из протонов и нейтронов (1932). Тр. по теории ядерных сил и синхротронному излучению. Гос. пр. (1950).
- ЙЕНСЕН** (Jensen) Иоханнес Ханс Даниэль (р. 1907) — нем. физик, один из авторов модели ядерных оболочек. Ноб. пр. (1963, совм. с Гепперт-Майер).
- КЕЛЬВИН** — см. Томсон Уильям.
- КЛАУЗИУС** (Clausius) Рудольф Юлиус Эмануэль (1822–1888) — нем. физик, один из основателей мол.-кинетич. теории теплоты, дал (одновременно с У. Томсоном) первую формулировку 2-го начала термодинамики (1850), ввел понятие энтропии (1865), идеального газа, длины свободного пробега молекул, обосновал (1850) так называемое уравнение Клапейрона-К., сформулировал гипотезу «тепловой смерти» Вселенной. Ин. чл. Петерб. АН (1878).
- КОКРОФТ** (Cockroft) Джон Дуглас (1897–1967) — англ. физик, изобрел (совм. с Уолтоном) ускоритель К.-У. (1932) и иссл. на нем ядерные реакции. Ноб. пр. (1951, совм. с Уолтоном).
- КОМПТОН** (Compton) Артур Холли (1892–1962) — амер. физик. Открыл и объяснил эффект, назван. его именем (1922). Обнаружил полное внутр. отражение рентген. лучей. Открыл широтный эффект в косм. лучах. Участник создания атомной бомбы. Ноб. пр. (1927).
- КРОНИН** (Cronin) Джеймс Уотсон (р. 1931) — амер. физик, один из авторов открытия нарушения фундаментальных принципов симметрии в распаде нейтральных К-мезонов (нарушение симметрии относительно операции комбинированной инверсии). Ноб. пр. (1980, совм. с Фитчем).
- КРУКС** (Crookes) Уильям (1832–1919) — англ. физик, иссл. электрич. разряды в газах и катодные лучи, открыл сцинтилляции, изобрел спинтарископ К., открыл (1861) таллий.
- КУРЧАТОВ** Игорь Васильевич (1903–1960) — сов. физик. Обнаружил яд. изомерию у легких ядер (1935). Под рук. К. сооружен первый отеч. циклотрон (1939), открыто спонтанное деление ядер урана (1940), сооружен первый в Европе ядерный реактор (1946), создана

первая в СССР ядерная бомба (1949), первая в мире термоядерная бомба (1953), первая в мире АЭС в г. Обнинске (1954). Трижды Герой Соц. Труда (1949, 1951, 1954), Лен. пр. (1957), Гос. пр. (1942, 1949, 1951, 1954).

КУШ (Kusch) Поликарп (1911–1993) — амер. физик, определил с высокой точностью магнитный момент электрона (1949). Ноб. пр. (1955, совм. с Лэмбом).

КЮРИ (Curie) Пьер (1859–1906) — франц. физик, совм. с женой М. Склодовской занимался исследованием радиоактивности, открыл полоний и радий (1898). Ноб. пр. (1903, совм. с М. Склодовской и А. Беккерелем).

ЛАВУАЗЬЕ (Lavoisier) Антуан Лоран (1743–1794) — фр. химик, один из основоположников современной химии. Выяснил роль кислорода в процессах горения, окисления и дыхания (1772–1777) и тем самым опроверг теорию флогистона.

ЛАНДАУ Лев Давыдович (1908–1968) — сов. физик-теоретик. Труды в области ядерной физики и элем. частиц, квантовой электродинамики и др. Автор классического многотомного курса теорет. физики (совм. с Е. М. Лифшицем). Герой Соц. Труда (1954), Лен. пр. (1962), Гос. пр. (1946, 1949, 1953), Ноб. пр. (1962). Академик АН СССР (1946).

ЛАУЭ (Laue) Макс Феликс Теодор (1879–1960) — нем. физик, открыл (1912) дифракцию рентг. лучей. Ноб. пр. (1914). Чл.-кор. АН СССР (1924), поч. чл. АН СССР (1929).

ЛЕВКИПП (V в. до н. э.) — др.-греч. философ, один из создателей антич. атомистики, учитель Демокрита.

ЛЕЙПУНСКИЙ Александр Ильич (1903–1972) — сов. физик. Первый опыт с попыткой доказать существование нейтрино (1936), тр. по ядерной физике и физике элем. частиц. Под рук. Л. разработаны и построены первые ядерные реакторы-размножители на быстрых нейтронах. Герой Соц. Труда (1963), Лен. пр. (1960). Академик Украинской АН (1935).

ЛИ Цзундао (Lee Tsung-dao) (р. 1926) — кит. физик-теоретик, раб. в США. Совм. с Янгом выдвинул гипотезу о несохранении четности в слабых взаимод. (1956). Ноб. пр. (1957, совм. с Янгом).

ЛИББИ (Libbi) Уиллард Франк (1908–1981) — америк. химик, разработал метод (1947) использования углерода-14 для определения возраста в археологии. Ноб. пр. (1960).

ЛИФШИЦ Евгений Михайлович (1915–1985) — сов. физик-теоретик, коллега Ландау. Лен. пр. (1962), Гос. пр. (1954).

- ЛОМОНОСОВ** Михаил Васильевич (1711–1765) — русск. ученый. Развивал атомно-молекулярные представления о строении вещества, утверждал, что теплота обусловлена движением корпускул, сформулировал принцип сохранения материи и движения, выступал против теорий теплорода и флогистона.
- ЛОРЕНЦ** (Lorentz) Хендрик Антон (1853–1928) — нидерл. физик. Создал классич. электронную теорию, разработ. электродинамику движущихся сред, вывел преобразования (1904), назв. его именем, подошел к созданию теории относительности. Ноб. пр. (1902).
- ЛОУРЕНС** (Lawrence) Эрнест Орландо (1901–1958) — амер. физик, выдвинул идею (1930) и построил (1932) циклотрон, получил на нем искусственные радиоизотопы. Ноб. пр. (1939).
- ЛОУСОН** (Lawson) Дж. Д. — амер. физик. Вывел критерий, при выполнении которого энергия, выделяющаяся при термоядерном синтезе, превышает энергию, вводимую в систему (1957).
- ЛЭМБ** (Lamb) Уиллис Юджин (р. 1913) — амер. физик, открыл тонкую структуру водородного спектра, обнаружил (1947) сдвиг уровней, назв. его именем. Ноб. пр. (1955, совм. с Кушем).
- МАЙКЕЛЬСОН** (Michelson) Альберт Абрахам (1852–1931) — америк. физик, эксп. доказал независимость скорости света от движения Земли (1881). Этот факт привел к созданию специальной теории относительности (СТО), в которой постоянство скорости света во всех инерц. системах координат принимается как постулат. Ноб. пр. (1907). Чл. кор. АН СССР (1924). Поч. чл. АН СССР (1926).
- МАЙТНЕР** (Meitner) Лизе (1878–1968) — австр. физик и радиохимик. В 1907–1938 работала в Германии вместе с О. Ханом, совм. с ним открыла протактиний (1918) и изомерию атомных ядер (1921). В 1938–1960 в Швеции и Англии. Вместе с О. Фришем (O. Frisch) объяснила результаты опытов Хана и Штрассмана (F. Strassmann) делением ядер урана (1939).
- МАКМИЛЛАН** (McMillan) Эдвин Маттисон (1907–1991) — амер. физик. Тр. по ядерной физике и ускорит. технике. Синтезировал совм. с Эйблсоном нептуний (1939), участник открытия плутония, выдвинул независимо от Векслера принцип автофазировки (1945). Ноб. пр. (1945, совм. Г. Сиборгом).
- МАКСВЕЛЛ** (Maxwell) Джеймс Клерк (1831–1879) — англ. физик, создатель классич. электродинамики и теории эл.-м. поля (ур.-ия М.), один из создателей статист. физики (распределение М.), выдвинул идею эл.-м. природы света.

МАРИОТТ (Mariotte) Эдм (1620–1684) — фр. физик, установил (1676) независимо от Бойля один из газовых законов — закон Бойля-М., иссл. движение жидкостей, дифракцию света и др.

МЕНДЕЛЕЕВ Дмитрий Иванович (1834–1907) — русск. химик. Открыл периодический закон хим. элементов (1869) — один из основных законов естествознания.

МЁССБАУЭР (Mossbauer) Рудольф Людвиг (р. 1929) — нем. физик. Открыл эффект (1958), назв. его именем. Ноб. пр. (1961).

МЕЩЕРЯКОВ Михаил Григорьевич (1910–1994) — сов. физик, чл.-к. АН СССР (1953). Один из рук. создания первого сов. фазотрона на энергию 680 МэВ (1949). Гос. пр. (1951, 1953).

МИГДАЛ Аркадий Бейнусович (1911–1991) — сов. физик. Тр. по квант. теории поля, физике ат. ядра и элем. частиц. Выдвинул теорию фотояд. реакций (1945) и гигантского дип. резонанса, академик АН СССР (1966).

МИЛЛИКЕН (Millikan) Роберт Эндрус (1868–1953) — амер. физик. Измерил заряд электрона (1913), экспериментально проверил теорию фотоэффекта Эйнштейна, определил численное значение постоянной Планка. Ноб. пр. (1929). Чл.-кор. АН СССР (1924).

МОЗЛИ (Moseley) Генри Гвин Джефрис (1887–1915) — англ. физик, основатель рентгеноспектроскопии, использовал характер. рентгеновское излучение для определения зарядов атомных ядер (формула М., 1913).

МОТТЕЛЬСОН (Mottelson) Бен Рей (р. 1926) — датский физик. Один из авторов обобщенной модели ядра. Ноб. пр. (1975, совм. с Оге Бором и Дж. Рейнуотером).

НЬЮТОН (Newton) Исаак (1643–1727) — англ. физик, математик, астроном. Разработал диффер. и интегральное исчисление. Открыл дисперсию света, хроматическую абберрацию, иссл. дифракцию и интерференцию света, развил корпускулярную теорию света, высказал гипотезу, сочетававшую корпускулярные и волновые представления о свете. Сформулировал три основных закона классич. механики. Открыл закон всемирного тяготения. Разработал теорию движения небесных тел, заложив основы небесной механики.

ОППЕНГЕЙМЕР (Oppenheimer) Роберт (1904–1967) — амер. физик. Тр. по квант. механике, физике ат. ядра и космич. лучей, открыл процесс О.-Филлипса (1935), руководил созданием амер. атомной бомбы (1943–1945). Обвинен в нелояльности и отстранен от секретных работ (1953).

- ПАУЛИ** (Pauli) Вольфганг (1900–1958) — швейцарский физик-теоретик, один из создателей квант. механики и релятивистской квант. теории поля. Сформулировал принцип (1925), названный его именем. Высказал гипотезу, объясняющую происхождение сверхтонкой структуры оптических спектров (1928). Предсказал существование нейтрино (1930). Ноб. пр. (1945).
- ПАУЭЛЛ** (Powell) Сесил Франк (1903–1969) — англ. физик, открыл π -мезоны в косм. лучах (1947). Ноб. пр. (1950). Ин. чл. АН СССР (1958).
- ПЕРРЕН** (Perrin) Жан Батист (1870–1942) — фр. физик, с 1940 — в США. Доказал, что катодные лучи — поток отрицательно заряженных частиц (1895), эксп. иссл. броуновское движение (1908–1913), подтвердил теорию Эйнштейна-Смолуховского, определил значение числа Авогадро. Ноб. пр. (1926). Чл.-кор. АН СССР (1924). Поч. чл. АН СССР (1929).
- ПЁРСЕЛЛ** (Purcell) Эдуард Миллс (р. 1912) — амер. физик, открыл ядерный магнитный резонанс (1946, незав. от Блоха). Ноб. пр. (1952, совм. с Блохом).
- ПЛАНК** (Planck) Макс (1858–1947) — нем. физик, один из основоположников квантовой теории, ввел квант действия (постоянная П., 1900), вывел закон излучения, названный его именем. Ноб. пр. (1918). Чл.-кор. Петерб. АН (1913). Поч. чл. АН СССР (1926).
- ПЛАТОН** (428–348 гг. до н. э.) — др.-греч. философ-идеалист, ученик Сократа. Жил в Афинах, где основал Академию и стал родоначальником философского направления, названного впоследствии платонизмом.
- ПОНТЕКОРВО** Бруно Максимович (1913–1993), род. в Италии, с 1950 — в СССР. В 1946 г. предложил использовать реакцию превращения ^{37}Cl в ^{37}Ag для доказательства тождественности или различия свойств нейтрино и антинейтрино (осуществлена в 1955 г. Дэвисом). Тр. по замедл. нейтронов и по захвату их ядрами, по ядерной изомерии, слаб. взаимодей., нейтринной физике, астрофизике. Лен. пр. (1963). Гос. пр. (1954).
- ПРАУТ** (W. Prout) — англ. врач. Высказал гипотезу о том, что атомы всех химических элементов образованы из атомов водорода, являющегося «первичной материей» (1815–1816). Гипотеза П. была первой гипотезой, допускавшей сложное строение атомов.
- ПРУСТ** (Proust) Жозеф Луи (1754–1826) — франц. химик. Открыл закон постоянства состава химических соединений (1800–1808).
- ПТИ** (Petit) Алекси Терез (1791–1820) — фр. физик. Совм. с Дюлонгом установил закон теплоемкости (1819) — закон Д. и П.

- РАБИ** (Rabi) Изидор Айзек (1898–1988) — амер. физик. Разработал резонансный метод измерения магн. моментов атомных ядер, измерил магнитные моменты протона и нейтрона (1939). Ноб. пр. (1944).
- РАМАН** (Raman) Чандрасекхара Венката (1888–1970) — инд. физик, открыл (1928) комбинационное рассеяние света — эффект, назв. его именем. Ноб. пр. (1930). Чл.-кор. АН СССР (1947).
- РАМЗАЙ** (Ramsay) Уильям (1852–1916) — англ. физик и химик, открыл аргон (1894, совм. с Дж. Рэлеем), криптон, ксенон и неон (1894, совм. с М. Траверсом), выделил гелий (1895). Ноб. пр. (1904). Ин. чл. (1901) и ин. поч. чл. (1913) Петерб. АН.
- РЕЙНУОТТЕР** (Reinwater) Джеймс (р. 1917) — амер. физик. Выдвинул (1950) идею о существовании в атомном ядре возбуждений вращательного типа. Один из авторов обобщенной модели ядра. Ноб. пр. (1975, совм. с Оге Бором и Б. Моттelsonом).
- РЕЗЕРФОРД** (Rutherford) Эрнест (1871–1937) — англ. физик, открыл α - и β -лучи (1899) и установил их природу, создал совм. с Ф. Содди теорию радиоактивности (1903), открыл атомное ядро и предложил планетарную модель атома (1911), осуществил первую искусств. ядерную реакцию (1919), предсказал существование нейтрона (1921). Ноб. пр. (1908).
- РЕНТГЕН** (Röntgen) Вильгельм Конрад (1845–1923) — нем. физик, открыл лучи, назв. его именем (1895). Ноб. пр. (1901).
- РИХТЕР** (Richter) Иеремия Вениамин (1762–1807) — нем. химик, открыл закон эквивалентных весов, ввел термины «химический эквивалент» и «стехиометрия». Чл. Петерб. АН (1800).
- РИЧАРДС** (Richards) Теодор Уильям (1868–1928) — амер. химик, определил (1888–1923) точные значения атомных весов 25-ти химич. элементов. Ноб. пр. (1914).
- РИЧАРДСОН** (Richardson) Оуэн Уилланс (1879–1959) — англ. физик, открыл термоэлектронную эмиссию и закон, назв. его именем. Ноб. пр. (1928).
- САЛАМ** (Salam) Абдус (р. 1926) — пакистанский физик, один из авторов теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия. Ноб. пр. (1979, совм. с Вейнбергом и Глэшоу). Ин. чл. АН СССР (1971), ин. чл. РАН (1991).
- САХАРОВ** Андрей Дмитриевич (1921–1989) — сов. физик. Один из создателей водородной бомбы (1953), предложил совм. с И. Е. Таммом идею магнитного удержания высокотемпературной плазмы. Трижды Герой Соц. Труда (1954, 1956, 1962), Лен. пр. (1956), Гос. пр. (1953), Ноб. пр. мира (1975).

- СЕГРЕ** (Segre) Эмилио (1903–1989) — физик-эксперим., р. в Италии, с 1938 — в США. Открыл вместе с др. первый искусств. элемент технеций (1937), астат и плутоний-239 (1941), а также антипротон (1955). Ноб. пр. (1959, совм. с О. Чемберленом).
- СИБОРГ** (Seaborg) Гленн Теодор (р. 1912) — амер. физик и химик. Открыл и иссл. совм. с др. трансурановые элементы: плутоний (1940), америций, кюрий (1944) и др. Ноб. пр. (1951, совм. с Э. М. Макмилланом).
- СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ** (Sklodowska-Curie) Мария (1867–1934) — р. в Польше, с 1891 — во Франции. Физик и химик, одна из создателей учения о радиоактивности. Обнаружила радиоактивность тория (1898), совм. с мужем П. Кюри открыла полоний и радий (1898), ввела термин «радиоактивность». Ноб. пр. по физике (1903, совм. с П. Кюри и Беккерелем). Получила металлич. радий (1910) и иссл. его свойства. Ноб. пр. по химии (1911). Впервые применила радиоакт. излучение в мед. целях.
- СОДДИ** (Soddy) Фредерик (1877–1956) — англ. радиохимик. Разработал совм. с Резерфордом основы теории радиоактивного распада (1903), ввел понятие об изотопах (1913), одновременно с К. Фаянсом сформулировал правило сдвига (1913), экспериментально доказал образование радия из урана (1915). Ноб. пр. (1921).
- СОКРАТ** (ок. 470–399 гг. до н. э.) — др.-греч. философ, один из родоначальников диалектики.
- СПИВАК** Петр Ефимович (1911–1992) — рос. физик. Тр. по яд. физике, иссл. распад свободных нейтронов (начаты в 1949). Гос. пр. (1953).
- ТАММ** Игорь Евгеньевич (1895–1971) — сов. физик-теоретик. Тр. по квант. механике, ядерной физике, теории излучения, физике элем. частиц. Один из авторов теории излучения Черенкова-Вавилова. Совм. с Сахаровым предложил применять нагретую плазму в магнитном поле для осуществления управляемых термоядерных реакций. Работал над созданием термоядерного оружия. Герой Соц. Труда (1953), Гос. пр. (1946, 1953), Ноб. пр. (1958, совм. с И. М. Франком и И. А. Черенковым). Чл.-кор. АН СССР (1933), академик (1953).
- ТЕЛЛЕР** (Teller) Эдвард (1908–2003) — физик. С 1935 — в США. Тр. по ядерной физике (правила отбора Гамова-Т.), термояд. реакциям, астрофизике. Совм. с Гольдхабером независимо от Мигдала предложил теорию фотоядерных реакций (1948). Участвовал в создании американских атомных и термоядерных бомб.
- ТОМОНАГА** (Tomonaga) Синьитиро (1906–1979) — яп. физик, иссл. по квантовой электродинамике и физике косм. лучей. Ноб. пр. (1965, совм. со Швингером и Фейнманом). Ин. чл. АН СССР (1971).

ТОМСОН (Thomson) Джозеф Джон (1856–1940) — англ. физик. Открыл электрон (1897) и определил его заряд (1898), предложил одну из первых моделей атома (1903), разработал метод измерения масс атомов и разделения изотопов (метод парабол Томсона, 1911). Ноб. пр. (1906). Чл. -к. Петерб. АН (1913), поч. чл. АН СССР (1925).

ТОМСОН (Thomson) Джордж Паджет (1892–1975) — сын Дж. Дж. Томсона. Открыл дифракцию электронов (1927). Ноб. пр. (1937, совм. с Дэвиссоном).

ТОМСОН (Thomson) Уильям (1824–1907) — англ. физик, за научные заслуги в 1892 получил титул барона Кельвина. Дал одну из формулировок 2-го начала термодинамики, предложил абс. шкалу температур (шкала К.), открыл ряд эффектов, назв. его именем (в том числе эффект Джоуля-Т.), установил зависимость периода колебаний контура от его емкости и индуктивности.

УЛЕНБЕК (Uhlenbeck) Джорж Юджин (1900–1988) — амер. физик, по происх. голландец, с 1927 — в США. Ввел (1925, совм. с Гаудсмитом) понятие спина электрона.

УОЛТОН (Walton) Эрнест Томас (1903–1995) — англ. физик, изобрел (совм. с Кокрофтом) ускоритель К.-У. (1932) и исслед. на нем ядерные реакции. Ноб. пр. (1951, совм. с Кокрофтом).

ФАЛЕС (624–547 гг. до н. э.) — др.-греч. мыслитель, родоначальник античной философии, основатель милетской школы. Возводил все многообразие явлений и вещей к единой первостихии — воде.

ФАРАДЕЙ (Faraday) Майкл (1791–1867) — англ. физик, основоположник учения об эл.-магн. поле, обнаружил химич. действие электр. тока, открыл эл.-магн. индукцию (1831), установил законы электролиза (1833–1834), назв. его именем, определил постоянную F ., равную числу зарядов, перенос которых приводит к выделению на электроде 1 моля одновалентного вещества: $F = 96484,56$ Кл/моль, открыл пара- и диамагнетизм, ввел понятия электр. и магн. полей, высказал идею существования эл.-м. волн. Чл. Петерб. АН (1830).

ФАЯНС (Fajans) Казимир (1887–1975) — амер. физико-химик. Род. в Польше, с 1936 — в США. Сформулировал одновременно с Ф. Содди правило сдвига (1913).

ФЕЙНМАН (Feynman) Юлиан Сеймор (р. 1918) — амер. физик, исслед. по квантовой электродинамике и физике косм. лучей, разработал метод диаграмм Ф. Ноб. пр. (1965, совм. с Томонагой и Швингером).

ФЕРМИ (Fermi) Энрико (1901–1954) — ит. физик, с 1938 — в США. Один из создателей ядерной и нейтронной физики. Разработал квант. статистику (статистика Ф.-Дирака, 1925), теорию β -распада (1934, правила

отбора Φ .), открыл иск. радиоактивность, вызываемую нейтронами, обнаружил резон. поглощение нейтронов (1934), изучил замедление нейтронов (теория «возраста» нейтронов Φ ., равновесный спектр Φ ., 1934), построил первый ядерный реактор и впервые осуществил в нем цепную реакцию деления (02.12.1942). Ноб. пр. (1938). Чл.-кор. АН СССР (1929).

ФИТЧ (Fitch) Вэл Лонгсдон (р. 1923) — амер. физик, открыл μ -мезоатомы (1953) и K^0 -мезон (1961). В 1964 г. совм. с Крониным открыл нарушения фундаментальных принципов симметрии в распаде нейтральных K -мезонов (нарушение симметрии относительно операции комбинированной инверсии). Ноб. пр. (1980, совм. с Крониным).

ФЛЁРОВ Георгий Николаевич (1913–1990) — сов. физик. Открыл спонт. деление ядер урана (1940, совм. с К. А. Петражом); под его рук. синтезированы изотопы элементов с пор. номерами 102–107, построен ускоритель многозарядных ионов (1970). Гер. Соц. Труда (1949), Лен. пр. (1967), Гос. пр. (1946, 1949, 1975), академик АН СССР (1968).

ФРАНК (Frank) Джеймс (1882–1964) — нем. физик. Совм. с Г. Герцем — опыт Франка и Герца (1913) по столкновениям электронов с атомами и молек. газа. Ноб. пр. (1925, совм. с Герцем).

ФРАНК Илья Михайлович (1908–1990) — сов. физик, один из авторов теории излучения Черенкова—Вавилова, иссл. по физике нейтронов. При участии Φ . построен импульсный быстрый реактор ИБР (1960). Гос. пр. (1946, 1953, 1971), Ноб. пр. (1958, совм. с И. Е. Таммом и П. А. Черенковым). Чл.-кор. АН СССР (1946), академик (1968).

ФРЕНКЕЛЬ Яков Ильич (1894–1952) — сов. физик. Тр. по ядерной физике и др. Разработал теорию спонтанного деления ядер. Ввел понятие экситона. Гос. пр. (1947). Чл.-кор. АН СССР (1929).

ХАН (Hahn) Отто (1879–1968) — нем. радиохимик. Открыл протактиний (1918, совм. с Л. Майтнер), ядерную изомерию у естеств. радиоактивных элементов (1921), деление ядер урана нейтронами (1938, совм. с Φ . Штрасманом). Ноб. пр. (1944).

ХАРИТОН Юлий Борисович (1904–1996) — сов. физик. Тр. по физике горения и взрывам. В 1939–1941 совм. с Зельдовичем рассчитал цепную реакцию деления урана. Один из руководителей работ по созданию ядерного оружия. Трижды Герой Соц. Труда (1949, 1951, 1954), Лен. пр. (1957), Гос. пр. (1949, 1951, 1953).

ХЕВЕШИ (Hevesy) Дьёрдь (1885–1966) — венг. радиохимик, с 1943 — в Швеции. Предложил (1913) применение радиоизотопов в качестве меченых атомов для изучения химических процессов. Открыл (1923, совм. с нидерландским спектроскопистом Д. Костером) гафний. Ноб. пр. (1943).

- ХОФСТЭДТЕР** (Hofstadter) Роберт (1915–1990) — амер. физик, иссл. (1955) рассеяние электронов высоких энергий на атомных ядрах, что привело к открытию распределения плотности электрического заряда по объему ядра и структуры нуклонов. Ноб. пр. (1961).
- ЧЕДВИК** (Chadwick) Джеймс (1891–1974) — англ. физик. Открыл нейтрон (1932), ядерный фотоэффект (1934–1935, с сотр.). Участник создания амер. атомной бомбы. Ноб. пр. (1935).
- ЧЕМБЕРЛЕН** (Chamberlain) Оуэн (р. 1920) — амер. физик, открыл (1955) антипротон совм. с Сегре. Ноб. пр. (1959, совм. с Сегре).
- ЧЕРЕНКОВ** Павел Алексеевич (1904–1990) — сов. физик, эксп. обнаружил новое оптич. явление (1934, излучение Ч.-Вавилова). Герой Соц. Труда (1984), Гос. пр. (1946, 1952, 1977), Ноб. пр. (1958, совм. с И. М. Франком и И. Е. Таммом). Чл.-кор. АН СССР (1964), академик АН СССР (1970).
- ШВИНГЕР** (Schwinger) Юлиан Сеймор (1918–1994) — амер. физик, иссл. по квантовой электродинамике и физике косм. лучей, иссл. рассеяние γ -квантов (эффект Ш.). Ноб. пр. (1965, совм. с Томонагой и Фейнманом).
- ШРЁДИНГЕР** (Schrodinger) Эрвин (1887–1961) — австр. физик-теоретик, один из создателей квант. механики, разработал волновую механику (1926), вывел ее основное уравнение (уравнение Ш.), доказал ее идентичность матричному варианту квантовой механики. Ноб. пр. (1933, совм. с Дираком).
- ШТАЛЬ** (Stahl) Георг Эрнст (1659–1734) — нем. химик и врач. Сформулировал (1697–1703) теорию флогистона.
- ШТАРК** (Stark) Йоханнес (1874–1957) — нем. физик, открыл (1913) эффект расщепления спектр. линий в электр. полях (эффект Ш.). Ноб. пр. (1919).
- ШТЕРН** (Stern) Отто (1888–1969) — физик, р. в Германии, с 1933 — в США. Разработал метод молекулярных пучков, измерил скорость теплового движения молекул газа (1920, опыт Ш.), доказал существование пространственного квантования (1922, опыт Ш.-Герлаха), открыл дифракцию атомов и молекул (1929), измерил магн. момент протона (1933). Ноб. пр. (1943).
- ЭЙНШТЕЙН** (Einstein) Альберт (1879–1955) — физик-теоретик, один из создателей соврем. физики. Род. в Германии, с 1893 — в Швейцарии, с 1914 — в Германии, с 1933 — в США. Создал специальную (1905) и общую (1907–1916) теории относительности, ввел понятие фотона (1905), установил законы фотоэффекта, предсказал индуцированное излучение (1917), создал квантовую статистику

(1924, статистика Бозе-Э.), с 1933 — работал над созданием единой теории поля. Ноб. пр. (1921).

ЭМПЕДОКЛ (490–430 гг. до н. э.) — др.-греч. философ, считал корнями всего сущего четыре первовещества — землю, воду, воздух и огонь.

ЭПИКУР (341–270 гг. до н. э.) — др.-греч. философ. Последователь атомистики Демокрита.

ЮКАВА Хидоки (1907–1981) — яп. физик. Предсказал существование мезонов (1935) и электронный захват (1936, совм. с Сакатой). Ноб. пр. (1949). Ин. чл. АН СССР (1966).

ЮРИ (Urey) Гарольд Клейтон (1893–1981) — амер. химик, открыл дейтерий (1932). Ноб. пр. (1934).

ЯНГ (Yang Chen Ning) Чженьнин (р. 1922) — физик-теоретик, по происхождению китаец, с 1945 — в США. Заложил основы соврем. теории калибровочных полей (теория Янга—Миллса, 1954), выдвинул совм. с Ли гипотезу о несохранении четности в слабых взаимодействиях (1956). Ноб. пр. (1957, совм. с Ли).

Приложение 2

Хронологическая таблица

До нашей эры

624–547 — основа всего — вода (Фалес Милетский).

610–546 — учение об апейроне (Анаксимандр).

584–524 — основа всего — воздух (Анаксимен).

VI в. — учение «Вайшешика» (Индия).

Конец VI — Первопричина всего — мировой огонь, он же душа
начало V вв. и разум (логос); начала диалектики (Гераклит).

500–428 — учение о гомеомериях (Анаксагор).

490–430 — учение о четырех первовеществах: земле, воде, воздухе,
огне (Эмпедокл).

Около 480 — атомистика (Левкип).

460–370 — атомистика (Демокрит); появление понятия «атом».

IV–III вв. — учение о материальных частицах *ци* (Китай).

384–322 — развитие атомистических представлений (Аристотель).

341–270 — атомистика Эпикура.

94–51 — Лукреций Кар и его поэма «О природе вещей».

Наша эра

476 — падение Западной Римской империи и начало
Средневековья.

1620 — «Новый Органон» Ф. Бэкона — возвращение к антич-
ному атомизму.

- 1661 — понятие о химических элементах (Бойль).
- 1662 — закон Бойля—Мариотта (Мариотт открыл этот закон независимо от Бойля в 1676 г.).
- 1697–1703 — теория флогистона (Шталь).
- 1704 — дуалистическая теория света (Ньютон).
- 1744 — молекулярно-кинетическая теория теплоты (Ломоносов).
- 1789 — открыт элемент уран (Клапрот).
- Начало XIX в. — закон эквивалентных весов (Рихтер).
- 1800–1808 — закон постоянства состава химических соединений (Пру).
- 1802 — закон теплового расширения газов (Гей-Люссак).
- 1803 — закон кратных отношений (Дальтон).
- 1807 — атомистическая теория Дальтона.
- 1808 — закон кратных объемных отношений Гей-Люссака.
- 1811 — гипотеза молекулярного строения вещества и закон Авогадро.
- 1814 — современные знаки химических элементов (Берцелиус).
- 1815 — гипотеза Праута о строении атомов из атомов водорода.
- 1819 — закон Дюлонга и Пти.
- 1827 — броуновское движение.
- 1828 — открыт торий (Берцелиус).
- 1833 — законы Фарадея.
- 1834 — уравнение Клапейрона.
- 1841 — уран получен в металлическом виде (Пелигор).
- 1842 — эффект Доплера;
- разграничение понятий эквивалента, атома и молекулы (Жерар).
- 1845 — установление понятий об атоме и молекуле.

- 1847 — впервые математически обоснован закон сохранения энергии (Гельмгольц).
- 1850 — уравнение Клапейрона—Клаузиуса;
— первая формулировка 2-го начала термодинамики (Клаузиус).
- 1857 — формула Клаузиуса для средней скорости молекул газа.
- 1859 — открытие катодных лучей (Плюккер);
— распределение молекул по скоростям (Максвелл).
- 1860 — таблица атомных весов элементов;
— формула Максвелла для коэффициента внутреннего трения в газах;
— Конгресс в Карлсруэ, закрепивший разделение понятий «атом» и «молекула».
- 1861 — опыт Майкельсона.
- 1865 — введено понятие энтропии (Клаузиус);
— первая оценка размеров молекул и числа молекул в 1 см^3 идеального газа (число Лошмидта).
- 1869 — катодные лучи;
— периодическая система элементов Менделеева.
- 1871 — распределение молекул идеального газа по энергиям (Больцман).
- 1873 — уравнение состояния для реальных газов (Ван-дер-Ваальс).
- 1875 — открыт галлий (экаалюминий по Менделееву).
- 1879 — открыт скандий (экабор по Менделееву);
— катодные лучи — поток отдельных частиц (Крукс).
- 1881 — вывод Гельмгольца о дискретности электрических зарядов;
— появление термина «электрон»;
— опыт Майкельсона.

- 1886 — каналовые лучи;
 - открыт германий (экасилиций по Менделееву).
- 1887 — открыт фотоэффект (Герц).
- 1888 — исследование фотоэффекта Столетовым.
- 1890 — постоянная Ридберга.
- 1893 — формула Вина;
 - закон смещения Вина.
- 1895 — лучи Рентгена;
 - катодные лучи — поток заряженных частиц (Перрен).
- 1896 — открытие радиоактивности (Беккерель);
 - открытие эффекта Зеемана;
 - получение Вином закона излучения в явном виде.
- 1897 — открытие электрона (Томсон);
 - обнаружение ионизирующего действия радиоактивного излучения (Резерфорд).
- 1898 — открытие радия и полония (Мария и Пьер Кюри);
 - обнаружение радиоактивности тория (они же);
 - определение заряда электрона (Томсон).
- 1899 — определение удельного заряда электрона;
 - открытие α - и β -лучей и определение знаков их электрических зарядов (Резерфорд);
 - открытие основного (экспоненциального) закона радиоактивного распада (Эльстер и Гейтель);
 - первая публикация М. Кюри о биологическом действии радиоактивного излучения.
- 1900 — классический закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела (закон Рэлея);
 - световые кванты; квант действия h , закон излучения — распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (Планк);

- в ионизационной камере обнаружен слабый ток при отсутствии радиоактивных источников (Вильсон) — первый шаг к открытию космических лучей;
- открытие эманации тория (Резерфорд);
- установлена нейтральность γ -излучения (Вийяр).
- 1902** — теория радиоактивного распада Резерфорда и Содди.
- 1903** — первая модель атома Томсона;
- теория радиоактивности (Резерфорд, Содди);
- α -частицы — это ядра гелия (Резерфорд, Содди);
- обнаружение выделения энергии при радиоактивном распаде (П. Кюри, Лаборд).
- 1904** — преобразования Лоренца;
- молекулярно-кинетическая теория флуктуаций (Смолуховский);
- спинтарископ Крукса;
- модель атома с расположенным в центре ядром (Нагаока).
- 1905** — специальная теория относительности Эйнштейна;
- введено понятие фотона; теория фотоэффекта (Эйнштейн);
- подтверждение закона Рэлея (1900) Джинсом (закон Р.-Д.); «ультрафиолетовая катастрофа»;
- обнаружение увеличения ионизации атмосферы с высотой (Гоккель).
- 1906** — исследование броуновского движения (Смолуховский);
- обнаружение рассеяния α -частиц в воздухе (Резерфорд);
- характеристическое рентгеновское излучение (Барк-ла).
- 1907** — квантовая теория теплоемкости Эйнштейна.
- 1908** — опыты Гейгера и Марсдена по рассеянию α -частиц.

- 1910** — точное определение числа Авогадро;
- получение металлического радия (М. Кюри совм. с А. Дебьерном);
 - речь В. И. Вернадского в Российской АН с предсказанием великой роли атомной энергии.
- 1911** — формула Резерфорда;
- открытие атомного ядра и планетарная модель атома (Резерфорд);
 - закон Гейгера—Неттолла;
 - первая формулировка правила сдвига (Содди);
 - открытие изотопов (Содди);
 - метод парабол (Томсон);
 - открытие первых стабильных изотопов (Томсон);
 - впервые произведено разделение изотопов (Томсон).
- 1912** — изобретение камеры Вильсона;
- открытие космических лучей (Гесс);
 - открытие дифракции рентгеновских лучей (Лауэ).
- 1913** — теория строения атома Бора с введением кванта действия и выдвинутых им постулатов;
- опыт Милликена по определению заряда электрона;
 - формула Мозли; измерения зарядов атомных ядер;
 - предложение использования радиоизотопов в качестве «меченых атомов» (Хевиши);
 - окончательная формулировка правила сдвига Фаянса и Содди;
 - опыт Франка и Герца;
 - формула Брэгга—Вульфа;
 - эффект Штарка.
- 1914** — первое наблюдение следов атомных ядер в виде следов ядер отдачи в камере Вильсона (Марсден);
- открытие протона (Резерфорд, Марсден).

- 1915** — доказательство образования радия из урана (Содди).
- 1916** — движение электронов в атоме по эллипсам (Зоммерфельд);
- теория тонкой структуры спектра водорода (он же);
 - общая теория относительности (Эйнштейн);
 - предсказание гравитационных волн.
- 1918** — открыт протактиний (Хан, Майтнер);
- создание в Петербурге Рентгенологического и радиологического (с 1922 — Радиевого) института (В. Г. Хлопин, В. И. Вернадский).
- 1919** — открытие первой ядерной реакции (Резерфорд);
- построен первый масс-спектрограф (Астон).
- 1920** — прямое измерение скорости движения молекул (Штерн).
- 1921** — предсказание нейтрона («нулевой элемент» Резерфорда);
- открытие ядерной изомерии (Хан, Майтнер);
 - получен первый отечественный радий (Хлопин).
- 1922** — пространственное квантование (опыт Штерна—Герлаха);
- эффект Комптона.
- 1923** — открыт гафний (Костер и Хевеши).
- 1924** — идея о волновых свойствах материи (де-Бройль); волны де-Бройля; квантование орбит электронов в атоме;
- статистика Бозе—Эйнштейна;
 - идея Изинга по резонансному ускорению частиц;
 - разработан метод совпадений (Боте) и исследования с его помощью космических лучей.
- 1925** — введение понятия спина электрона (Уленбек, Гаудсмит);
- матричный вариант квантовой механики (Гайзенберг);

- принцип Паули;
- статистика Ферми—Дирака (Ферми);
- фотография в камере Вильсона расщепления ядер азота α -частицами, подтвердившая опыт Резерфорда (Блеккет);
- открыт рений (Ноддаки и Берг);
- открытие проникающей компоненты космических лучей (Мысовский, Тувим);
- открытие закона сохранения четности.
- 1926** — волновая механика (Шредингер); уравнение Шредингера;
- статистика Ферми—Дирака (Дирак).
- 1927** — принцип неопределенности (Гайзенберг);
- открыта дифракция электронов на кристаллах (Дэвиссон, Джермер, и незав. от них — Д. П. Томсон);
- экспериментально подтверждено распределение молекул по скоростям Максвелла (Дж. Элридж);
- шкала масс Астона ($^{16}\text{O} = 16$);
- кривая упаковочных коэффициентов (Астон);
- наблюдение в камере Вильсона частиц жесткой компоненты космических лучей (Скобельцын).
- 1928** — уравнение Дирака; предсказаны позитрон, рождение и аннигиляция пар;
- открытие комбинационного рассеяния света (Раман);
- объяснение сверхтонкой структуры оптических спектров (Паули);
- теория α -распада (Гамов);
- первый резонансный ускоритель на 50 кэВ (Видероз).
- 1929** — первый электростатический генератор Ван-де-Граафа;
- открыта дифракция атомов и молекул (Штерн).

Конец 20-х гг. — «Азотная катастрофа».

- 1930** — предсказание нейтрино (Паули);
— опыты Боте и Беккера, предшествовавшие открытию нейтрона.
- 1931** — теория тормозного излучения электронов (Зоммерфельд);
— первая модель циклотрона (Лоуренс);
- 1932** — открытие нейтрона (Чедвик);
— гипотеза о составе ядра из протонов и нейтронов (Иваненко, Гайзенберг);
— ускоритель Кокрофта—Уолтона (каскадный генератор);
— первая ядерная реакция на искусственно ускоренных протонах (они же);
— построен ускоритель ионов — циклотрон (Лоуренс);
— открытие дейтерия и тяжелой воды (Юри);
— первые реакции по расщеплению ядер лития искусственно ускоренными частицами в СССР (Вальтер, Лейпунский, Синельников);
— открытие позитронов в космических лучах (Андерсон);
— обнаружены ливни космических лучей (Блэкет, Оккиалини).
- 1933** — измерен магнитный момент протона (Штерн);
— первый ускоритель с генератором Ван-де-Граафа (Тьюв).
- 1934** — обнаружено излучение Черенкова—Вавилова;
— получена тяжелая вода в количестве 0,06 г;
— открыт третий изотоп водорода — тритий;
— открыта искусственная радиоактивность, вызываемая заряженными частицами (Ирен и Фредерик Жолио-Кюри) и нейтронами (Ферми);
— открыта позитронная β -активность (Жолио-Кюри);
— теория β -распада (Ферми); правила отбора Ферми;

- излучение Черенкова (Вавилов, Черенков);
 - открытие первой фотоядерной реакции расщепления ядер дейтерия γ -квантами (Чедвик, Гольдхабер);
 - работы Ферми по изучению прохождения нейтронов через вещество, в том числе замедления нейтронов (с Амальди и др.);
 - магические числа (Эльзассер);
 - предположение о возможности деления ядер (Ида Ноддак).
- 1935** — открыта ядерная изомерия легких ядер (Курчатов, Мысовский и др.);
- теория ядерных сил и предсказание мезонов (Юкава);
 - открыт процесс Оппенгеймера—Филлипса — прямая ядерная реакция с неполным проникновением дейтрона в ядро;
 - открыты первичные космические лучи, состоящие, в основном, из протонов (Вернов, Милликен);
 - предсказание возможности двойного β -распада с вылетом двух нейтрино (М. Гепперт-Майер).
- 1936** — в космических лучах открыты мюоны (Андерсон);
- модель жидкой капли (Бор совм. с Вайцзеккером);
 - формула Вайцзеккера;
 - концепция промежуточного ядра (Бор);
 - опыт Лейпунского — первая попытка экспериментального доказательства существования нейтрино;
 - предсказание захвата электронов ядрами (Юкава и Саката);
 - формула Брайта—Вигнера;
 - теория ядерной изомерии (Вайцзеккер).
- 1937** — открыт первый искусственный химический элемент — технеций (Сегре);
- в космических лучах открыты μ -мезоны (Андерсен и Неддермейер);

- предложение Харитона о разделении изотопов методом центрифугирования;
 - предсказание возможности двойного безнейтринного β -распада (Э. Майорана);
 - теория излучения Черенкова—Вавилова (Тамм, Франк).
- 1938** — открыт захват электронов ядрами (Альварес);
- циклы термоядерных реакций (Бете);
 - 18 декабря — открытие деления ядер урана нейтронами (Хан и Штрассман);
 - обнаружены широкие атмосферные ливни космических лучей (Оже).
- 1939** — объяснение результатов опытов Хана и Штрассмана делением атомных ядер (Лизе Майтнер, О. Фриш);
- открыты вторичные нейтроны деления и установлено, что их число 2–3 на одно деление (Фредерик и Ирен Жолио-Кюри, Халбан, Коварский);
 - открыты запаздывающие нейтроны при делении и оценено их среднее время запаздывания (Робертс);
 - сооружен первый советский циклотрон (Курчатов);
 - измерены магнитные моменты протона и нейтрона (Раби);
 - теория деления ядер (Бор, Уиллер; Френкель);
 - вывод о том, что делиться должен только уран-235 (Бор);
 - впервые рассчитана цепная реакция деления ядер урана (Харитон, Зельдович);
 - получены изотопы первого трансуранового элемента с атомным номером 93 — нептуния (Макмиллан);
 - открыт элемент франций (М. Перей).
- 1940** — открыт химический элемент с номером 85 (астат);
- открыт первый изотоп трансуранового химического элемента с атомным номером 94 (плутоний; Сиборг);

- впервые в весомах количествах разделены изотопы урана;
- открыто спонтанное деление урана (Флеров и Петр-жак);
- первый бетатрон (Керст);
- в США разработан метод разделения изотопов урана с использованием газовой диффузии (Ф. Симон).

1941 — открыт плутоний-239 и астат (Сиборг, Сегре).

1942,
13 августа — начало «Манхэттенского проекта»;

- в ноябре начато строительство центра в Лос-Аламосе;
- 2 декабря — первая цепная реакция деления ядер (Ферми);
- открыта первичная компонента космических лучей (Алиханов, Алиханян);
- опыт Аллена по регистрации ядер отдачи от нейтрино;
- начало работ по созданию атомного оружия в СССР.

1943 — разработана концепция матрицы рассеяния (Гайзенберг).

1944 — открыты элементы америций и кюрий (Сиборг);

- получение в марте на заводе в Хенфорде первого плутония;
- принцип автофазировки (Векслер).

1945 — взрывы первых атомных бомб в США (16 июля) и в Японии (6 и 9 августа);

- теория фотоядерных реакций (Мигдал);
- принцип автофазировки (Макмиллан).

1946 — в составе первичного космического излучения обнаружены протоны (Добротин);

- принято решение о строительстве КБ-11 в Сарове;
- открыт ядерный магнитный резонанс (Блох, Пёрсел);

- предложение об использовании реакции с дейтронами для взрывных целей (Гуревич, Зельдович, Харитон);
- 25 декабря впервые в СССР осуществлена цепная реакция деления на первом ядерном реакторе (Курчатов).
- 1947** — первый советский синхротрон (Векслер);
- разработан радиоуглеродный метод определения возраста в археологии (Либби);
- обнаружен сдвиг уровней в атоме водорода (Лэмб);
- открытие π -мезонов в космических лучах (Пауэлл).
- 1948** — получение π -мезонов на ускорителе в Беркли (США);
- теория фотоядерных реакций Гольдхабера и Теллера;
- пуск первого реактора во Франции на тяжелой воде;
- создание в ФИАНе группы по теории термоядерного взрыва (Тамм, Сахаров, Гинзбург, Фрадкин, Романов, Беленький);
- в космических лучах обнаружены тяжелые ядра вплоть до железа (Питерс);
- обнаружение β -распада свободного нейтрона (Снелл и Миллер).
- 1949,**
29 августа — испытана первая советская атомная бомба («РДС-1»), установленная на башне;
- начало опытов Спивака по распаду свободных нейтронов;
- первый советский фазотрон на 680 МэВ (Мешеряков);
- определены состав первичной и происхождение вторичной компоненты космических лучей (Вернов);
- с высокой точностью определен магнитный момент электрона (Куш);
- оболочечная модель ядра (Гепперт-Майер, Йенсен и др.);
- обнаружение двойного β -распада по накоплению ксенона (Инграм, Рейнольдс);

- первая оценка массы нейтрино < 1 кэВ (Понтекорво);
- начало работ по УТС в Лос-Аламосе (США).
- 1950** — предложение Тамма и Сахарова о применении нагретой плазмы в магнитном поле для осуществления управляемых термоядерных реакций;
- идея о вращательных состояниях ядер (Рейнуоттер);
- обобщенная модель ядра (Рейнуоттер, Бор, Моттelson);
- жесткая фокусировка в ускорителях (Кристофилос).
- 1951** — начало работ по управляемому термоядерному синтезу в СССР (Арцимович).
- 1952** — жесткая фокусировка в ускорителях (Курант, Ливингстон, Снайдер в США);
- создана пузырьковая камера (Глазер);
- в США 1-го ноября произведен первый термоядерный взрыв на установке наземного типа;
- при анализе продуктов термоядерного взрыва открыты 99-й и 100-й элементы (эйнштейний и фермий соответственно).
- 1953** — в СССР испытана первая термоядерная бомба (12 августа);
- введено понятие «странности» и сформулирован закон ее сохранения (Гелл—Манн);
- опыт Ф. Рейнеса и К. Коуэна по регистрации нейтрино;
- первый вариант оптической модели ядра (Фешбах, Портер, Вайскопф).
- 1954, 27 июня** — пущена первая в мире АЭС в Обнинске (Курчатов, Блохинцев, Красин и др.).
- 1955** — открыт антипротон (Сегре, Чемберлен);
- в Обнинске пущен первый на Евро-Азиатском континенте ядерный реактор БР-1 на быстрых нейтронах (Лейпунский и др.);

- схема Нильсона;
 - опыты по рассеянию быстрых электронов (Хофстедтер);
 - 22 ноября первая термоядерная бомба сброшена с самолета на Семипалатинском полигоне.
- 1956** — обнаружение несохранения четности при распаде каонов;
- теория β -распада без опоры на закон сохранения четности (Ли и Янг);
 - коллективный метод ускорения частиц (Векслер);
 - начало работы по токамакам (Арцимович);
 - открытие антинейтрона (Корк, Ламбертсон и др.);
 - впервые в США термоядерная бомба сброшена с самолета (20 мая).
- 1957** — первый советский синхрофазотрон на 10 ГэВ (Векслер).
- критерий Лоусона;
 - создание МАГАТЭ;
 - опыт Ву по несохранению четности при β -распаде;
 - первое наблюдение мюонного катализа (Альварец).
- 1958** — эффект Мёссбауэра;
- открытие внутреннего (Аллен) и внешнего (Вернов, Чудаков) радиационных поясов Земли.
- 1959** — завершение опытов Дэвиса, доказавших различие нейтрино и антинейтрино;
- открытие полного внутреннего отражения нейтронов на границе «вакуум — вещество» (Зельдович).
- 1960-е гг.** — теория электрослабого взаимодействия (Глэшоу, Вайнберг, Салам).
- 1961** — систематика элементарных частиц (Гелл—Ман);

- в СССР 30-го октября над Новой Землей испытана самая мощная водородная бомба в мире с тротильным эквивалентом 50 Мт, сброшенная со стратегического бомбардировщика ТУ-95;
- открыты спонтанно делящиеся изомеры (Поликанов);
- открыт 103-й элемент — лоуренсий.
- 1962** — открыты запаздывающие протоны (Карнаухов, Дубна).
- 1963** — создана Международная рабочая группа по ядерным данным, впоследствии — Международный комитет по ядерным данным (МКЯД).
- 1964** — гипотеза кварков (Гелл—Ман);
 - линейный ускоритель электронов в Харькове на 1,8 ГэВ.
- 1965** — открыт 101-й элемент — менделевий.
- 1966** — линейный ускоритель электронов в Стэнфорде (США) на 22 ГэВ;
 - открыто запаздывающее деление (Флеров, Дубна);
 - окончательно открыт 102-й элемент — нобелий.
- 1967** — пущен синхрофазотрон в Протвино на 76 ГэВ;
 - введение в теорию деления оболочечных поправок, приведшее к теории двугорбого барьера деления и объяснению изомерии формы (Струтинский).
- 1968** — на установке Токамак-4 впервые получена квазистационарная физическая термоядерная реакция;
 - фазотрон под Ленинградом на 1 ГэВ.
- 1970** — ускоритель многозарядных ионов в Дубне на 4 ГэВ;
 - обнаружено излучение протонов из изомерного состояния (Черни и др.).
- 1972** — синхрофазотрон в Батавии (США) на энергию 500 ГэВ;
 - обнаружено испускание протонов из основного состояния нейтронодефицитных ядер (Карнаухов, Дубна).

- 1976** — линейный ускоритель многозарядных ионов в Дармштадте (ФРГ) на энергию до 10–14 МэВ/нуклон;
— масса нейтрино не больше 35 эВ (Третьяков).
- 1979** — обнаружен запаздывающий двойной нейтронный распад.
- 1980** — ускоритель многозарядных ионов в Беркли (США) на 2 ГэВ/нуклон;
— обнаружен распад с вылетом трех запаздывающих нейтронов;
— предсказана возможность кластерной радиоактивности (Сандулеску, Познару, Грейнер);
— масса нейтрино: $(28 \leq m_\nu \leq 41)$ эВ (Любимов).
- 1982** — на Токамаке Т-10 (СССР) и установке PLT (США) достигнуты параметры: энергетическое время жизни плазмы 0,1 с, температура ионов на оси шнура $8 \cdot 10^7$ К.
- 1983** — запаздывающая двухпротонная радиоактивность.
- 1984** — обнаружено самопроизвольное испускание ядер ^{14}C — начало исследований кластерной радиоактивности (Роуз и Джонс).
- 1999** — открытие 114-го элемента в Дубне и 118-го элемента в Беркли.

Литература

1. *Абрамов А. И.* Измерение «неизмеримого». 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с. (с ил.)
2. *Асташенков П. Т.* Подвиг академика Курчатова. М.: Знание, 1979.
3. *Ахутин А. В.* История принципов физического эксперимента (от античности до XVII века). М.: Наука, 1976. 291 с.
4. *Блан Д.* Ядра, частицы, ядерные реакторы. М.: Мир, 1989. 336 с. (с ил.)
5. *Бор Нильс.* Жизнь и творчество. Сб. статей. М.: Наука, 1967. 344 с. (с ил.)
6. *Борн М.* Размышления и воспоминания физика. Сб. статей. М.: Наука, 1977. 278 с.
7. *Васильев М. В., Станюкович К. П.* В глубины неисчерпаемого. М.: Атомиздат, 1975. 240 с.
8. *Гернек Ф.* Пионеры атомного века. Великие исследователи от Максвелла до Гайзенберга. М.: Прогресс, 1974. 369 с.
9. *Голин Г. М., Филонович С. Р.* Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX века). М.: Высшая школа, 1989. 576 с. (с ил.)
10. *Дирак П. А. М.* Воспоминания о необычайной эпохе: Сб. статей. М.: Наука, 1990. 208 с.
11. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики (с начала XIX по середину XX века). М.: Наука, 1979. 317 с.
12. *Зоммерфельд А.* Пути познания в физике: Сб. статей. М.: Наука, 1973. 317 с.
13. *Иоффе А. Ф.* Встречи с физиками. М.: Физматгиз, 1962. 144 с.
14. *Иоффе А. Ф.* О физике и физиках. Л.: Наука, 1977. 259 с.
15. История советского атомного проекта: документы, воспоминания, исследования. Вып. 1. М.: Янус-К, 1998. 392.
16. *Канке В. А.* Философия. Исторический и систематический курс. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2000. 345 с.
17. *Канке В. А.* Основные философские направления и концепции науки. Итоги XX столетия. М.: Логос, 2000. 320 с.

18. *Кедров Ф.* Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. М.: Атомиздат, 1973. 144 с.
19. *Кедров Ф.* Цепная реакция идей. М.: Знание, 1975. 192 с.
20. *Кириллов-Угрюмов В. Г., Сергеев Ф. М.* Основы мюонного метода исследования вещества и ядерного μ -катализа. М.: МИФИ, 1993. 132 с.
21. *Князева Л.* Поймать невидимку // Вокруг света. 2002. № 6 (2741). Июнь. С. 104–111.
22. *Кудрявцев П. С.* История физики: В 2 т. М.: Учпедгиз, 1956. Т. 1. 564 с.; Т. 2. 488 с.
23. *Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я.* История физики и техники: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Просвещение, 1965. 571 с.
24. *Кузнецов Б. Г.* Пути физической мысли. М.: Наука, 1968. 349 с.
25. *Кюри Е.* Мария Кюри. М.: Атомиздат, 1967. 352 с.
26. *Кюри М.* Пьер Кюри. *Жолио-Кюри Ирен и Фредерик.* О Марии и Пьере Кюри. М.: Наука, 1968. 176 с.
27. *Лауэ М.* История физики. М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит.-ры, 1956. 230 с.
28. *Лейпунский А. И.* Избранные труды. Воспоминания. Киев: Наукова Думка, 1990. 280 с.
29. *Льоци Марио.* История физики. М.: Мир, 1970. 464 с.
30. *Мухин К. Н., Патаракин О. О.* Экзотические процессы в ядерной физике // УФН. Т. 170. № 8. 2000. С. 855–897.
31. Основатели советской физики. М.: Просвещение, 1970. 224 с. (с ил.)
32. *Понтекорво Б.* Избранные труды: В 2 т. Т. 2: Воспоминания. М.: Наука, 1997. 352 с.
33. *Содди Ф.* История атомной энергии. М.: Атомиздат, 1979. 288 с.
34. *Спасский Б. И.* История физики: В 2 т.: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1977. Т. 1. 320 с. (с ил.); Т. 2. 309 с. (с ил.)
35. *Спасский Б. И.* История физики: В 2 ч.: Учеб. пособие для ун-тов. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1963. 330 с. (с ил.); Ч. 2. 1964. 300 с. (с ил.)
36. *Тригг Дж.* Физики XX века: ключевые эксперименты. М.: Мир, 1973. 376 с.
37. *Храмов Ю. А.* Физики: Биографический справочник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1983. 398 с.
38. *Эйнштейн А., Инфельд Л.* Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. 3-е изд., испр. М., 1965. 327 с.

Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



URSS

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

- Богущ А. А.* Очерки по истории физики микромира.
Капитонов И. М. Введение в физику ядра и частиц.
Гейзенберг В. Философские проблемы атомной физики.
Гейзенберг В. Часть и целое (беседы вокруг атомной физики).
Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц.
Окунь Л. Б. Лептоны и кварки.
Борн М. Лекции по атомной механике.
Бранский В. П. Теория элементарных частиц как объект методологического исследования.
Бранский В. П. Значение релятивистского метода Эйнштейна в формировании общей теории элементарных частиц.
Шевелев А. К. Структура ядер, элементарных частиц, вакуума.
Квасников И. А. Молекулярная физика.
Бриллюэн Л. Квантовая статистика.
Агеев Е. П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах.
Дуров В. А., Агеев Е. П. Термодинамическая теория растворов.
Мюнстер А. Химическая термодинамика.
Зайцев Р. О. Введение в современную статистическую физику.
Планк М. Теория теплового излучения.
Планк М. Введение в теоретическую физику. Кн. 1–5: Общая механика; Механика деформируемых тел; Теория электричества и магнетизма; Оптика; Теория теплоты.
Серия «Классический университетский учебник»
Капитонов И. М., Ишханов Б. С., Юдин Н. П. Частицы и атомные ядра.
Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. В 4 т.
Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии.
Колмогоров А. Н., Драгалин А. Г. Математическая логика.
Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей.
Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений.
Серия «Классики науки»
Гейзенберг В. Избранные труды.
Смординский Я. А. Избранные труды.
Тодхантер И. История математических теорий притяжения и фигуры Земли.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
тел./факс (495) 135–42–16, 135–42–46
или **электронной почтой** URSS@URSS.ru
Полный каталог изданий представлен
в **Интернет-магазине**: <http://URSS.ru>

**Научная и учебная
литература**

Представляем Вам наши лучшие книги:



URSS

Теория поля

Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Бозонные теории.

Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Теории с фермионами. Некоммутативные теории.

Сарданашивили Г. А. Современные методы теории поля. Т. 1–4.

Иваненко Д. Д., Сарданашивили Г. А. Гравитация.

Коноплева Н. П., Попов В. Н. Калибровочные поля.

Волобуев И. П., Кубышин Ю. А. Дифференциальная геометрия и алгебры Ли и их приложения в теории поля.

Маслов В. П., Шведов О. Ю. Метод комплексного роста в задаче многих частиц и квантовой теории поля.

Богуш А. А. Введение в калибровочную полевую теорию электрослабых взаимодействий.

Богуш А. А., Мороз Л. Г. Введение в теорию классических полей.

Квантовая механика

Петрашень М. И., Трифонов Е. Д. Применение теории групп в квантовой механике.

Ван дер Верден Б. Л. Метод теории групп в квантовой механике.

Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Коган В. И. Задачи по квантовой механике. Ч. 1, 2.

Горбачевич А. К. Квантовая механика в общей теории относительности.

Горбачевич А. К. Основы квантовой механики в искривленном пространстве-времени.

Килин С. Я. Квантовая оптика: поля и их детектирование.

Вильф Ф. Ж. Логическая структура квантовой механики.

Эддингтон А. Относительность и кванты.

Броиль Л. де. Введение в волновую механику.

Философия физики

Шредингер Э. Мой взгляд на мир. Пер. с нем.

Борн М. Моя жизнь и взгляды. Пер. с англ.

Карнап Р. Философские основания физики. Введение в философию науки.

Бунге М. Философия физики.

Поппер К. Р. Объективное знание. Эволюционный подход. Пер. с англ.

Джеммер М. Понятие массы в классической и современной физике.

Аксенов Г. П. Причина времени.

Канке В. А. Формы времени.

Рейхенбах Г. Философия пространства и времени.

Рейхенбах Г. Направление времени.

Уиттроу Дж. Естественная философия времени.

Грюнбаум А. Философские проблемы пространства и времени.

Вигнер Э. Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии.

Минасян Л. А. Единая теория поля: Философский анализ современных проблем физики элементарных частиц и космологии. Опыт синергетического осмысления.

Могилевский Б. М. Природа глазами физика.

Захаров В. Д. Физика как философия природы.

Койре А. Очерки истории философской мысли.

Бриллэун Л. Научная неопределенность и информация.

Представляем Вам наши лучшие книги:



URSS

История науки

- Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов.
 Базаров И. П. Заблуждения и ошибки в термодинамике.
 Хайтун С. Д. История парадокса Гиббса.
 Сурин А. В., Панов М. И. (ред.) Судьбы творцов российской науки.
 Бонгард-Левин Г. М., Захаров В. Е. (ред.) Российская научная эмиграция.
 Нейгебауер О. Точные науки в древности.
 Шереметевский В. П. Очерки по истории математики.
 Архимед, Гюйгенс, Лежандр, Ламберт. О квадратуре круга.
 Ожигова Е. П. Развитие теории чисел в России.
 Гнеденко Б. В. О математике.
 Гнеденко Б. В. Очерк по истории теории вероятностей.
 Гнеденко Б. В. Очерки по истории математики в России.
 Григорян А. А. Закономерности и парадоксы развития теории вероятностей.
 Медведев Ф. А. Очерки истории теории функций действительного переменного.
 Медведев Ф. А. Французская школа теории функций и множеств на рубеже XIX–XX вв.
 Стройк Д. Я. Очерк истории дифференциальной геометрии (до XX столетия).
 Юревич В. А. Астрономия доколумбовой Америки.
 Харгиттаи И. Откровенная наука. Кн. 1, 2. Пер. с англ.
 Коире А. Очерки истории философской мысли.

Учебники и задачки по физике

- Воронов В. К., Подоплелов А. В. Современная физика.
 Иванов Б. Н. Законы физики.
 Кириллов В. М. и др. Решение задач по физике.
 Кронин Дж., Гринберг Д., Телегди В. Теоретическая физика. Сб. задач с решениями.
 Колоколов И. В. и др. Задачи по математическим методам физики.
 Жукарев А. С. и др. Задачи повышенной сложности в курсе общей физики.
 Розенблат Г. М. Механика в задачах и решениях.
 Шепелев А. В. Оптика. Готовимся к экзаменам, зачетам, коллоквиумам.
 Варикаш В. М., Болсун А. И., Аксенов В. В. Сборник задач по статистической физике.
 Гликлик Ю. Е. Глобальный и стохастический анализ в задачах математической физики.
 Сурдин В. Г. Астрономические задачи с решениями.
 Николаев О. С. Физика и астрономия: Курс практических работ для средней школы.

Тел./факс:

(495) 135-42-46,
 (495) 135-42-16,

E-mail:

URSS@URSS.ru

<http://URSS.ru>

Наши книги можно приобрести в магазинах:

- «Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 925-2457)
 «Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)
 «Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5001, 780-3370)
 «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)
 «Дом деловой книги» (м. Пролетарская, ул. Марксистская, 9. Тел. (495) 270-5421)
 «Гнозис» (м. Университет, 1 г-м. корпус МГУ, комн. 141. Тел. (495) 939-4713)
 «У Кентавра» (РГТУ) (м. Новослободская, ул. Чаянова, 15. Тел. (495) 973-4301)
 «СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 311-3954)

Александр Иванович АБРАМОВ

Профессор кафедры ядерной физики Обнинского государственного технического университета атомной энергетики с 1990 г. После окончания физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова в 1952 г. до 1990 г. работал в г. Обнинске в Физико-энергетическом институте на различных должностях — от старшего лаборанта до заведующего лабораторией. За время работы в ФЭИ принимал участие в разработке, пуске и исследованиях первых в нашей стране ядерных реакторов на быстрых нейтронах, двух ускорителей электронов, а также в нескольких циклах исследований ядерных реакций под действием нейтронов и гамма-квантов. С 1964 по 1971 г. являлся членом Международного комитета по ядерным данным при МАГАТЭ. С 1954 г. параллельно с научной деятельностью работал по совместительству преподавателем в Обнинском филиале МИФИ, где читал лекции по общей и ядерной физике, а с 1963 по 1971 г. руководил кафедрой ядерной физики.

А. И. Абрамов — автор пяти научных, научно-популярных и учебных книг и нескольких десятков статей в научных журналах. Одна из его популярных книг «Измерение "неизмеримого"» четыре раза переиздавалась в нашей стране, а также была переведена и издана в Японии, Эстонии, Венгрии и Германии.



Наше издательство рекомендует следующие книги:



3551 ID 31820

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА



Тел./факс: 7 (095) 135-42-16

Тел./факс: 7 (095) 135-42-46



URSS

E-mail:
URSS@URSS.ru
Каталог изданий
в Интернете:
<http://URSS.ru>