СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Purcell E.M., Ramsey N.F. – Phys. Rev., 1950, vol. 78, p. 807.
2. Smith J.H., Purcell E.M., Ramsey N.F. – Ibid., 1957, vol. 108, p. 120.
3. Gell-Mann M., Feinman R. – Ibid., 1958, vol. 109, p. 193.
4. Christenson J.H., Cronin J.W., Fitch V.L., Turlay V.L. – Phys. Rev. Lett., 1964, vol. 13, p. 138.
5. Wolfenstein L. – Ibid., p. 562.
6. Weinberg S. – Ibid., 1976, vol. 37, p. 657.
7. Ансельм А.А., Уральцев Н.Г. – Ядерная физика, 1979, т. 30, с. 465.
8. Житницкий А.Р., Хриплович И.Б. – Там же, 1981, т. 34, с. 167.
9. Рамзей Н. Молекулярные пучки: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
10. Miller P.D., Dress W.B., Baird J.K., Ramsey N.F. – Phys. Rev. Lett., 1967, vol. 19, p. 381.
11. Baird J.K., Miller P.D., Dress W.B., Ramsey N.F. – Phys. Rev., 1969, vol. 179, p. 1285.
12. Dress W.B., Miller P.D., Ramsey N.F. – Ibid., 1973, vol. D7, p. 3147.
13. Dress W.B., Miller P.D., Pendlebury J.M. e.a. – Ibid., 1977, vol. D15, p. 9.
14. Шапиро Ф.Л. – Успехи физ. наук, 1968, т. 95, с. 145.
15. Зельдович Я.Б. – Журн. эксперим. и теорет. физ., 1959, т. 36, с. 1952.
16. Алтарев И.С., Борисов Ю.В., Брандин А.Б., Егоров А.И., Ежов В.Ф., Иванов С.Н., Лобашов В.М., Назаренко В.А., Порсев Г.Д., Рябов В.Л., Серебров А.П., Тольдаев Р.Р. Препринт ЛИЯФ 430. Л., 1978.
17. Лущиков В.И., Покотиловский Ю.Н., Стрелков А.В., Шапиро Ф.Л. – Письма в ЖЭТФ, 1969, т. 9, с. 40.
18. Грошев Л.В., Дворецкий В.Н., Демидов А.М. и др. Препринт ОИЯИ РЗ-5392. Дубна, 1970; Phys. Lett., 1971, vol. 34B, p. 293.
19. Стрелков А.В., Хетцельт М. – Журн. эксперим. и теорет. физ., 1978, т. 74, № 1, с. 23.
20. Bugeat J.P., Mampe W. – Z. Phys., 1979, Bd 35B, S. 273.
21. Егоров А.И., Лобашев В.М., Назаренко В.А. и др. – Ядерная физика, 1974, т. 19, с. 300.
22. Егоров А.И., Ежов В.Ф., Иванов С.Н. и др. – Там же, 1975, т. 21, с. 292.
23. Altarev I.S., Borisov Yu.V., Brandin A.B. e.a. – Nucl. Phys., 1980, vol. A341, p. 269.
24. Ежов В.Ф., Иванов С.Н., Лобашев В.М., Назаренко В.А., Порсев Г.Д., Сердюк О.В. Серебров А.П., Тольдаев Р.Р. – Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 24, с. 39.
25. Altarev I.S., Borisov Yu.V., Brandin A.B. e.a. – Phys. Lett., 1981, vol. B102, p. 13.
26. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б. – Успехи физ. наук, 1980, т. 130, с. 607.
27. Таран Ю.В. Препринт ОИЯИ Р13-10067 – 10068. Дубна, 1977.
28. Golub R., Pendlebury J.M. – Phys. Lett., 1977, vol. 62A, p. 337.
29. Dombeck T.W., Lynn J.W., Werner S.A. e.a. Preprint 79-153 TR-79-085. Univ. of Maryland, 1979.
30. Altarev I.S., Borisov Yu.V., Brandin A.B. – Phys. Lett., 1980, vol. A80, p. 413.

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

С.С. Герштейн, А.А. Логунов

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие ознаменовалось выдающимися достижениями физики элементарных частиц. Во-первых, из всей совокупности экспериментальных данных, накопленных за последние годы, несомненно, следует вывод, что адроны (сильновзаимодействующие частицы, в том числе протон и нейтрон) имеют сложное строение и состоят из более "элементар-

ных" объектов – кварков. На основе этих представлений удалось существенно продвинуться в создании теории сильных взаимодействий на малых расстояниях – квантовой хромодинамики, выводы которой хорошо подтверждаются на опыте. Во-вторых, установлена глубокая внутренняя связь между электромагнитными и слабыми взаимодействиями, подтверждающаяся большим числом экспериментов. Можно надеяться, что подготовленные к настоящему времени эксперименты по обнаружению на встречных протон-антипротонных пучках переносчиков слабого взаимодействия (так называемых $W^{\pm}$ и Z^{0}-бозонов) дадут в ближайшее время окончательное решение вопроса о единой природе слабых и электромагнитных сил. Однако уже в настоящее время, в ходе развития теории, в центр внимания поставлен вопрос о единой природе всех известных типов взаимодействий: сильных, слабых, электромагнитных, гравитационных. Одним из удивительных предсказаний некоторых вариантов такого "великого объединения" сил является вывод о нестабильности протона, для проверки которого уже готовятся грандиозные эксперименты. Необходимо отметить, что теории "великого объединения" [так же как единая теория слабых и электромагнитных (электрослабых) взаимодействий] наметили совершенно новые пути решения таких фундаментальных проблем физики, как происхождение масс элементарных частиц и свойств физического вакуума. Возможно, что последний из указанных вопросов тесно связан с проблемой "удержания" кварков в адронах, т.е. с отсутствием в природе свободных кварков.

Характерной чертой современного этапа развития физики элементарных частиц является ее смыкание с космологией – наукой о строении и эволюции Вселенной. Сейчас уже стало совершенно ясно, что многие проблемы космологии, такие, например, как вопросы о барионной асимметрии Вселенной, образовании и размерах галактик, их скрытой массе и многие другие, невозможно решить без учета процессов с участием элементарных частиц на ранних этапах эволюции Вселенной. Вместе с тем данные космологии приобретают все большее значение для самой физики элементарных частиц. Так, исходя из них, можно установить ограничения на вероятное число различных типов нейтрино в природе и их массу, указать возможную концентрацию кварков в окружающем веществе (в том случае, если кварки могли бы существовать как свободные частицы) и др.

Успехи физики элементарных частиц за последнее десятилетие свидетельствуют, таким образом, что она вступила в новый важнейший этап познания строения материи и сил природы – этап, который, несомненно, приведет в будущем к новой научной революции. Если, однако, бросить, ретроспективный взгляд на развитие физики элементарных частиц, то станет ясно, что многие из ее современных достижений имеют источником выдающиеся открытия, сделанные в начале 30-х годов. Это прежде всего открытие нейтрона и позитрона (1932) и создание теории β-распада (1934). В настоящей статье мы постараемся проследить связь между этими открытиями (и прежде всего открытием нейтрона) и современными достижениями физики элементарных частиц.

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА – ПЕРВЫЙ ШАГ К УСТАНОВЛЕНИЮ СИСТЕМАТИКИ АДРОНОВ И ГИПОТЕЗЕ ОБ ИХ СОСТАВНОМ СТРОЕНИИ

Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий. После открытия нейтрона и создания нейтрон-протонной модели ядра казалось, что вопрос об элементарных частицах материи полностью решен. Для объяснения всех наблюдаемых явлений и свойств вещества достаточно было четырех элементарных частиц. Действительно, из нейтронов и протонов, взаимодействующих посредством короткодействующих ядерных сил, можно было составить все атомные ядра и полностью объяснить их спины. Электроны образовывали внешнюю оболочку атомов, и законы квантовой механики позволили объяснить спектры атомов, химическую связь, свойства и строение твердых тел. Несколько особняком стояла четвертая частица – нейтрино, гипотеза о существовании которой была высказана в 1930 г. Паули для того, чтобы обеспечить выполнение закона сохранения энергии в процессах β-распада. Роль нейтрино в природе, однако, представлялась неясной, а надежд на его прямое детектирование в то время не существовало.

Вместе с тем ретроспективный взгляд на последующее развитие физики элементарных частиц показывает, что именно открытие нейтрона и изучение его свойств послужили исходным пунктом для систематизации адронов и в конечном счете для вывода об их сложном строении. Гипотеза, высказанная Д.Д. Иваненко и несколько позже В. Гейзенбергом, о том, что исходя из статистики ядер нейтрон следует рассматривать как элементарную частицу со спином 1/2, указывала на удивительную симметрию, существующую между протоном и нейтроном. Действительно, если бы нейтрон представлял собой связанное состояние протона и электрона (что в духе протон-электронной модели ядра отвечало гипотезе Резерфорда, натолкнувшей Чадвика на его открытие), то обнаружение нейтрона (так же, например, как и открытие дейтрона) было бы, безусловно, важным, но не принципиальным открытием. Предположение же о том, что нейтрон обладает спином 1/2 и должен наряду с протоном рассматриваться как элементарная частица ядерной структуры, не только произвело переворот в прежнем понимании строения атомных ядер, но и открыло новое направление в теории элементарных частиц. Обладая одинаковыми спинами, почти одинаковыми массами и "равноправно" участвуя в построении атомных ядер, нейтрон и протон оказались частицами-"близнецами", различающимися лишь электрическими зарядами. Поэтому уже в работе Гейзенберга [3] предлагалось рассматривать протон и нейтрон как различные зарядовые состояния одной и той же частицы, различающиеся внутренней переменной, принимающей два значения.

В формализме квантовой механики операторы, действующие на эту внутреннюю переменную, должны были иметь вид матриц Паули для частиц со спином 1/2, а переменная, отвечающая различным зарядовым состояниям, соответствовала третьей проекции новой величины – изотопического спина. Таким образом, впервые возникло понятие о внутренней степени свободы элементарных частиц, связанной не с обычным, а с особым, изотопическим (или зарядовым) пространством. Близость масс

нейтрона и протона была первым указанием на то, что существует группа симметрии относительно вращений в таком трехмерном пространстве. Это имело принципиальное значение для всего дальнейшего развития физики элементарных частиц.

Плодотворность нового понятия впервые выяснилась, когда в результате экспериментальных исследований была установлена независимость ядерных сил от электрического заряда частиц, т.е. тот факт, что ядерное взаимодействие между двумя протонами такое же, как между протоном и нейтроном или двумя нейтронами (если, разумеется, взаимодействующие пары частиц находятся в одинаковых состояниях)*. Зарядовая независимость ядерных сил означала, что они не зависят от "проекции" изотопического спина и, таким образом, обладают определенной симметрией в изотопическом пространстве.

Следующий шаг в установлении этой симметрии был сделан при выяснении короткодействующего характера ядерных сил. В 1934 г. Юкава выдвинул следующую гипотезу: короткодействующий характер ядерных сил связан с тем, что ядерные силы между нуклонами возникают в результате обмена мезонами — частицами с массой около 200–300 электронных масс.

К вопросу о том, как возникала гипотеза Юкавы, мы вернемся несколько позже. Здесь важно пока отметить следующее. Данные наблюдений указывают на то, что рассеяние нейтронов на протонах, по крайней мере, частично связано с обменом их зарядами. Исходя из этих данных, Юкава предположил, что мезоны являются заряженными частицами, однако такое предположение не согласовывалось с зарядовой независимостью ядерных сил. Действительно, если для взаимодействия нейтрона с протоном достаточно обменяться одним заряженным мезоном, то для взаимодействия протона с протоном или нейтрона с нейтроном требуется обмен, по крайней мере, двумя заряженными частицами. Поэтому, для того чтобы согласовать гипотезу Юкавы, объяснявшую короткодействующий характер ядерных сил, с их зарядовой независимостью, понадобилось предположение о том, что наряду с заряженными мезонами в переносе ядерных сил участвуют нейтральные мезоны с той же самой массой. Получившийся триплет мезонов с положительным, отрицательным и нулевым зарядом можно было по аналогии с нуклонами рассматривать как различные зарядовые состояния одной и той же частицы, различающиеся значениями внутренней переменной – проекции изотопического спина, принимающей в этом случае значения $\pm 1,0$. Таким образом, концепция изотопического спина, введенная после открытия нейтрона, получила дальнейшее развитие.

Для того чтобы ядерные силы, переносимые мезонами, обладали свойством зарядовой независимости, необходимо было не только предполагать наряду с существованием заряженных мезонов существование нейтрального мезона, но и потребовать, чтобы константы взаимодействия заряженных и нейтральных мезонов с нуклонами удовлетворяли определенным соотношениям. Простейшим образом добиться зарядовой независимости ядерных сил можно было, предположив, что взаимодействие мезонов и нуклонов инвариантно относительно вращений в изотопическом пространстве. Так возникла впервые предложенная Кеммером в 1938 г. изотопически-инвариантная теория сильных взаимодействий. Из изотопи-

* Собственно говоря, на возможность такой зарядовой независимости ядерных сил указывала уже нейтрон-протонная модель ядра, поскольку легкие и средние ядра состоят приблизительно из одинакового числа протонов и нейтронов.

ческой инвариантности следовало, что система сильновзаимодействующих частиц характеризуется особым внутренним квантовым числом – изотопическим спином, сохраняющимся при всех превращениях, идущих под влиянием сильного взаимодействия. После открытия в 1947 г. в космическом излучении частиц, предсказанных Юкавой, – заряженных пионов – началась систематическая экспериментальная проверка следствий, вытекающих из изотопической инвариантности сильных взаимодействий. Такие исследования стали возможными благодаря созданию после второй мировой войны первых ускорителей высокой энергии. Среди этих исследований, полностью подтвердивших изотопическую инвариантность сильных взаимодействий, следует особо отметить первые эксперименты группы Ферми на Чикагском циклотроне и прецизионные измерения, проведенные в Лаборатории ядерных исследований Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна)*.

Таким образом, развитие теоретических и экспериментальных исследований, последовавшее за открытием нейтрона, привело к установлению важнейшей симметрии сильных взаимодействий – изотопической инвариантности, т.е. инвариантности сильных взаимодействий относительно группы вращений в изотопическом пространстве. Обнаруженная симметрия приводила к сохранению в процессах сильного взаимодействия особого квантового числа – изотопического спина и указывала на то, что сильновзаимодействующие частицы должны группироваться в семейства "похожих" частиц – изотопические мультиплеты. Гипотеза Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберга о том, что нейтрон подобно протону является элементарной частицей со спином 1/2, была открытием первого такого семейства.

Необходимо подчеркнуть (поскольку это оказалось в дальнейшем исключительно важно методически), что обнаруженная симметрия сильных взаимодействий может реализоваться лишь в качестве приближенной (нарушенной) симметрии. Действительно, во всех процессах с участием реальных частиц невозможно "выключить" электромагнитное взаимодействие, явно зависящее от зарядов частиц и тем самым нарушающее изотопическую инвариантность (и сохранение изотопического спина). Факт, что в природе наблюдается приближенно изотопическая инвариантность (и сохранение изотопического спина), связан с малостью электромагнитных взаимодействий по сравнению с сильными, т.е. с определенной иерархией взаимодействий. Это явилось первым примером того, как "более слабое" взаимодействие нарушает симметрию и квантовые числа, сохраняющиеся в "более сильном" взаимодействии. Очевидным проявлением нарушения изотопической симметрии было обнаруженное на опыте небольшое различие масс протона и нейтрона (а также заряженных и нейтральных пионов). По порядку величины казалось, что это различие можно объяснить различием в электромагнитных взаимодействиях частиц. Однако совершенно неестественным представлялось то, что масса заря-

*Первое главное подтверждение мезонных теорий, приводящих к зарядовой независимости ядерных сил, – экспериментальное доказательство существования нейтрального пиона – было получено уже не в космическом излучении, а на ускорителе спустя два года после открытия заряженных пионов. Эти годы явились серьезным (и не лишенным драматизма) испытанием для мезонной теории ядерных сил.

женной частицы – протона оказалась не больше, а меньше, чем масса нейтральной частицы – нейтрона (хотя, если принять электромагнитное происхождение разности масс, то должно быть наоборот). Объяснение этому факту удалось дать значительно позже, уже на основе модели кварков.

Открытие странных частиц и резонансов; $SU(3)$-симметрия. Открытие странных частиц еще раз подтвердило изотопическую инвариантность и привело к установлению более широких свойств симметрии. Новая характеристика адронов – странность была открыта при решении некоторого экспериментального парадокса. Этот парадокс заключался в том, что некоторые частицы, зарегистрированные впервые в космическом излучении, рождались благодаря сильному взаимодействию (о чем свидетельствовала довольно большая вероятность их генерации), а распадались в результате слабого взаимодействия (о чем свидетельствовало их большое время жизни, на 13–14 порядков превышающее характерное время сильных взаимодействий). Для решения этого парадокса Нишиджима и Гелл-Ман высказали гипотезу о том, что сильновзаимодействующие частицы обладают особой характеристикой (своего рода зарядом), которая сохраняется в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий и нарушается в слабых взаимодействиях. Предполагая, что значение этой величины для "обычных" нуклонов и пионов равно нулю, а для частиц, обнаруживающих парадоксальное поведение, отлично от нуля, можно было объяснить аномально большое время жизни этих частиц тем, что их распад на нуклоны и пионы с помощью сильного и электромагнитного взаимодействий запрещен законом сохранения новой характеристики, которую назвали странностью. Подтверждением высказанной гипотезы явились эксперименты, показавшие, что в процессах взаимодействия пионов с нуклонами и нуклонов с нуклонами "странные" частицы (те, которым приписывалось отличное от нуля положительное или отрицательное значение странности) рождаются совместно друг с другом, так что суммарное значение странности в процессах сильного взаимодействия сохраняется. Таким образом, открытие новой физической характеристики адронов – странности показало, что наряду с "точными" законами сохранения (ими в то время считались законы сохранения электрического и барионного зарядов) могут существовать благодаря своего рода иерархии взаимодействий приближенные законы сохранения. Так, странность, сохраняясь в сильных и электромагнитных взаимодействиях, может изменяться под действием слабого взаимодействия*. Уже один этот факт мог навести на мысль о том, что некоторые из "точных" законов сохранения, например закон сохранения барионного заряда, в действительности являются приближенными и могут нарушаться в каких-то "более слабых" взаимодействиях. Однако реальную почву эта идея приобрела значительно позже в связи с попытками построения единой теории всех известных взаимодействий.

---

*Строго говоря, как уже отмечалось, подобный пример был известен еще раньше, поскольку было ясно, что изотопический спин, сохраняющийся в сильных взаимодействиях, может нарушаться в электромагнитных взаимодействиях.

Распространив идею изотопической инвариантности на странные частицы, удалось установить их систематику. Было показано, что подобно нуклонам и пионам странные частицы объединяются в изотопические мультиплеты с различными значениями странности и изотопического спина, при этом электрический заряд Q частиц, входящих в определенный мультиплет, определяется формулой Гелл-Мана – Нишиджимы $Q = (B + S)/2 + T_3$, где B и S – соответственно значения барионного числа и странности; T_3 – третья компонента изотопического спина, принимающая через единицу значения от $T_3 = -T$ до $T_3 = T$. Из приведенной формулы вытекает, что средний заряд изотопического мультиплета $\langle Q \rangle$ (суммарный заряд частиц, входящих в какой-либо мультиплет, деленный на число частиц в мультиплете) равен $(S + B)/2$. Таким образом, "центр" мультиплета смещается в зависимости от значения суммы барионного числа и странности. Представлялось удобным ввести новую характеристику $Y = S + B$ – гиперзаряд, определяющий средний заряд частиц в изотопическом мультиплете: $\langle Q \rangle = Y/2$. В дальнейшем оказалось, что введенная величина имеет фундаментальное значение.

Распространение понятия изотопического спина на странные частицы показало, что K-мезоны должны объединяться в два дублета (K^+, K^0) и $(\bar{K}^0, K^-)$ со странностью +1 и −1, а гипероны – соответственно в синглет (Λ), дублет $(\Xi^0; \Xi^-)$ и триплет $(\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$ со странностью −1, −2 и −1. Блестящим подтверждением этой схемы явилось предсказание существования и свойств Σ^0 и Ξ^0, которое было сделано на основе существования их изотопических партнеров, а также предсказание двух типов нейтральных каонов K^0 и $\bar{K}^0$, различающихся своими свойствами.

Создание новых ускорителей и развитие экспериментальной техники наблюдения и обработки данных с использованием быстродействующих ЭВМ позволили в конце 50-х – начале 60-х годов обнаружить большое число новых нестабильных частиц с ядерным временем жизни – резонансов. Вновь открытые частицы также группировались в изотопические мультиплеты. Однако среди частиц, принадлежащих к изотопическим мультиплетам с различными значениями странности, можно было заметить "похожие" по своим свойствам частицы. Поэтому возникла идея их объединения в более широкие группы – супермультиплеты, включающие в себя изотопические мультиплеты с различными значениями странности. Возможность и смысл такого объединения были вначале далеко не ясными, так как в отличие от изотопических мультиплетов, объединяющих частицы с близкими массами, в одни и те же супермультиплеты должны были входить частицы, довольно сильно различающиеся по своим массам.

Например, в один и тот же супермультиплет мезонов со спином, равным нулю, должны были входить пионы с массой около 140 МэВ и каоны с массой около 500 МэВ, а в супермультиплет барионов со спином 1/2 – нуклоны с массой 940 МэВ и Ξ-гипероны с массой 1320 МэВ. В качестве "рабочей" гипотезы для объединения частиц со столь разными массами в одинаковые супермультиплеты была высказана идея так называемой нарушенной симметрии. Предполагалось, что наряду с "истинно" сильным взаимодействием, обладающим высокой симметрией (благодаря ей частицы, входящие в один и тот же супермультиплет, имеют одинаковые массы), существует "умеренно" сильное взаимодействие, нарушающее эту симметрию и тем самым вызывающее расщепление масс частиц внутри одного и того же супермуль-

типлета. В определенном смысле, как уже отмечалось, идея нарушенной симметрии возникла вместе с гипотезой об изотопической инвариантности сильных взаимодействий: предполагалось, что небольшое различие масс внутри одного изотопического мультиплета вызвано электромагнитным взаимодействием, нарушающим изотопическую инвариантность. Как выяснилось позже, уже после создания модели кварков, приведенная аналогия имела глубокий смысл.

Для того чтобы частицы внутри одного супермультиплета имели одинаковые массы, "истинно" сильное взаимодействие должно было не только обладать изотопической инвариантностью, но и не зависеть от странности (гиперзаряда) частиц. Группа симметрии такого взаимодействия должна была быть группой второго ранга. В качестве такой группы подходила группа $SU(3)$, которая в соответствии с опытом предсказывала число частиц в отдельных супермультиплетах (например, существование октета барионов со спином 1/2 или декаплета барионов со спином 3/2). "Умеренно" сильное взаимодействие предполагалось зависящим от гиперзаряда частиц (но сохраняющим изотопическую инвариантность). С помощью таких представлений можно было вычислить расщепление масс частиц внутри $SU(3)$-мультиплета и связать наблюдаемые массы определенными соотношениями. Особенно простыми эти соотношения были для декаплета барионов: с увеличением (по абсолютной величине) странности на единицу массы частиц должны были возрастать на одно и то же значение около 150 МэВ. Исходя из этих соображений удалось не только предсказать существование Ω^--гиперона, который в то время еще не был обнаружен экспериментально, но и указать его массу. Из предсказываемого значения массы Ω^--гиперона (около 1670 МэВ) следовало, что по своим свойствам Ω^--гиперон должен поразительно отличаться от других частиц, входящих в декаплет.

Дело в том, что частицы Δ, Σ^* Ξ^* являются резонансами. Они могут распадаться с помощью сильного взаимодействия за время порядка 10^{-23} с. Например, частицы Σ^* и Ξ^* распадаются с сохранением странности по каналам $\Sigma^* \to \Lambda\pi$; $\Xi^* \to \Xi\pi$. Что же касается Ω^--гиперона со странностью $S = -3$, то при массе 1670 МэВ ему не хватает энергии, чтобы распадаться на частицы, суммарное значение странности которых составляет -3 (например, на Ξ^0 и K^-). Другими словами, распад Ω^--гиперона с помощью сильного взаимодействия (сохраняющего странность) запрещен и может происходить только с помощью слабого взаимодействия, в котором странность может изменяться на единицу, например $\Omega^- \to \Xi^-\pi^0$, $\Omega^- \to \Xi^0\pi^-$; $\Omega^- \to \Lambda K^-$. Это означает, что время жизни Ω^--гиперона должно быть порядка 10^{-10} с и пробег его можно заметить, например, в пузырьковых камерах. Все эти предсказания блестяще подтвердились на опыте.

Таким образом, установление систематики адронов на основе нарушенной $SU(3)$-симметрии сильного взаимодействия можно сравнить с созданием периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Подобно тому как на основе периодического закона Д.И. Менделеев предсказал новые химические элементы и их свойства, так и на основе систематики адронов были предсказаны существование и свойства новых частиц. Однако аналогия с периодическим законом Д.И. Менделеева имеет в действительности более глубокий характер. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева, как известно, полностью объясняется составным характером атомов и законами квантовой механики, определяющими движение электронов в поле атомных ядер. Естественно поэтому возникал вопрос: не отра-

жает ли систематика адронов их сложное составное строение. На мысль о составном строении адронов наводило и большое число обнаруженных частиц, превысившее число химических элементов. В качестве ответа на этот вопрос и была в 1964 г. высказана независимо Гелл-Маном и Цвейгом гипотеза кварков как составных частей адронов.

Гипотеза кварков для объяснения систематики адронов. Мысль о составном строении, по крайней мере, некоторых адронов возникла задолго до того, как общее их число перевалило за сотню. В 1949 г., когда кроме нуклонов было твердо установлено только существование пионов, Ферми и Янг высказали гипотезу о том, что пионы представляют собой связанные состояния нуклонов и антинуклонов: π^+ – протона и антинейтрона $(p\bar{n})$, π^- – нейтрона и антипротона $(n\bar{p})$, а π^0 – суперпозицию $1/\sqrt{2}\,(p\bar{p} - (n\bar{n})$. Таким образом, в модели Ферми–Янга протон и нейтрон выступали как элементарные, а пионы как составные частицы*.

После открытия странных частиц Саката предложил наряду с протоном и нейтроном рассматривать в качестве элементарной частицы Λ-гиперон. Каоны в этом случае можно было считать составными частицами: K^+ $(p\bar{\Lambda})$, K^0 $(n\bar{\Lambda})$, $K^-(\Lambda\bar{p})$, $\bar{K}^0(\Lambda\bar{n})$. Предсказания модели Ферми–Сакаты для мезонов полностью совпадали с более поздними предсказаниями нарушенной $SU(3)$-симметрии. Однако удовлетворительно объяснить с помощью этой модели систематику барионов не удавалось. (Например, в один и тот же октет барионов со спином 1/2 должны были входить как "элементарные" p, n, Λ, так и "составные" $\Sigma^{\pm}$, Ξ^0, Ξ^-, Ξ^0 частицы.) Несмотря на этот недостаток модель Ферми–Янга–Сакаты сыграла, безусловно, важнейшую роль в развитии физики элементарных частиц, в частности при установлении универсального характера слабого взаимодействия и правил отбора для него**. Эта модель непосредственно предшествовала гипотезе кварков. Дело в том, что простейшим представлением группы симметрии $SU(3)$ является триплет частиц. Именно поэтому модель Ферми–Янга–Сакаты, в которой в качестве элементарных частиц принята тройка p, n, Λ, давала правильные предсказания относительно состава мезонных супермультиплетов. Для того чтобы объяснить, почему "похожие" барионы образуют супермультиплеты $SU(3)$, понадобилось предположение о том, что элементарный триплет образуют гипотетические фундаментальные частицы – кварки, обладающие дробными барионным и электрическим зарядами. Предполагая существование трех типов кварков (или, как их сейчас называют, "ароматов") с барионным числом 1/3: u-кварка с зарядом +2/3, d-кварка с зарядом $-1/3$ и s-кварка с зарядом $-1/3$ и странностью -1 – можно было полностью объяснить систематику адронов, построенную на основе группы $SU(3)$. При этом все барионы, входящие в октет и декаплет, равноправно строились из трех кварков.

---

*Из этой модели, в частности, следовало, что пионы должны иметь отрицательную внутреннюю четность, так как произведение внутренних четностей нуклона и антинуклона согласно установленной советским физиком В.Б. Берестецким теореме должно быть равно -1.

**Например, из этой модели Л.Б. Окунь вывел правило $\Delta S = \Delta Q$ для лептонных распадов странных частиц.

Предполагая, что координатная волновая функция у барионов в октете и декаплете одинакова, было нетрудно объяснить, почему барионы со спином 1/2 (в отличие от барионов по спином 3/2) не содержат состояний из трех одинаковых кварков: (uuu), (ddd), (sss), а имеют "лишнее" состояние (uds).

Совершенно простое объяснение можно было дать и причине нарушения $SU(3)$-симметрии, предположив, что масса s-кварка приблизительно на 150 МэВ больше массы u- и d-кварков. Что же касается изотопической инвариантности, то она в этой модели оказалась связанной с тем, что разность масс d- и u-кварков мала. Предполагая, что d-кварк всего на несколько мегаэлектронвольт тяжелее u-кварка, удается объяснить разности масс частиц в одном и том же изотопическом мультиплете, в частности объяснить, почему масса нейтрона больше массы протона (вопрос, который вызывал недоумение, когда разность масс этих частиц пытались объяснить одним только электромагнитным взаимодействием). Таким образом, различая степень нарушения $SU(3)$-симметрии и изотопической инвариантности объясняется просто тем, что масса s-кварка значительно больше отличается от масс d- и u-кварков, нежели их массы различаются между собой, и не требует какого-либо "умеренно" сильного взаимодействия. Таким образом, гипотеза кварков не только объясняла существование наблюдаемых на опыте симметрий, послуживших основой для создания систематики адронов, но и указывала причину их нарушения. Несмотря на это, она вначале была встречена многими физиками с большими сомнениями. Уж очень необычными представлялись свойства этих частиц с дробными электрическим и барионным зарядами, никогда ранее не встречавшимися. Поиск таких частиц усиленно проводился в 60–70-х годах в самых различных экспериментах: на ускорителях, в космическом излучении, в окружающем веществе и даже в лунном грунте. Однако эксперименты не дали результата: частицы с дробным зарядом до сих пор обнаружить не удалось.

Публиковавшиеся несколько раз сообщения о наблюдении таких частиц оказывались ошибочными и в дальнейшем, как правило, опровергались постановкой более точных экспериментов. Какой вывод следует из того, что свободные кварки пока не обнаружены? Можно думать, конечно, что частицы с дробным зарядом обладают очень большой массой и настолько сильно связаны между собой в адронах, что энергии существующих ускорителей не хватает для разрыва этой связи. Поэтому поиски таких частиц продолжаются по сей день и постановка соответствующих опытов планируется на новых сооружаемых ускорителях.

Однако важные доводы в пользу того, что свободные (не связанные в адроны) дробно заряженные частицы вообще не могут наблюдаться в природе, дают космологические оценки. Согласно этим оценкам получается, что концентрация частиц с дробным зарядом (если бы они могли существовать в качестве свободных частиц или частиц, связанных в обычных ядрах) должна быть на много порядков больше того предела, который установлен современными измерениями. (По современным данным концентрация частиц с дробным зарядом по отношению к нуклонам в окружающем веществе, во всяком случае, меньше 10^{-20}.)

Помимо экспериментальных (возможно, и не абсолютно надежных) аргументов против возможности существования свободных частиц с дробным зарядом первоначальная гипотеза кварков столкнулась и с чисто теоретическими трудностями. Действительно, приписывая кваркам полу-

целый спин, следует считать, что они должны подчиняться квантовомеханическому правилу, запрещающему одинаковым частицам с полуцелым спином находиться в одинаковых состояниях. Вместе с тем для объяснения строения барионных супермультиплетов приходилось в противоречии с этим хорошо обоснованным правилом запрета "помещать" одинаковые кварки в одинаковые состояния. Особенно наглядно это видно для состояний Δ^{++} (uuu) и Δ^{-} (ddd) или Ω^{-} (sss). Одним из простейших способов избежать возникающего противоречия было дальнейшее усложнение первоначальной гипотезы трех кварков.

В 1965 г. Н.Н. Боголюбов, Б.В. Струминский, А.Н. Тавхелидзе и независимо Хан и Намбу высказали предположение, согласно которому каждый тип кварков (u, d, s) может существовать в трех различных состояниях, отличающихся друг от друга каким-то новым квантовым числом (сейчас его называют "цветом" или "цветовым зарядом").

Например, u-кварк может быть в трех состояниях: $u_к$, $u_ж$ и $u_с$ ("красном", "желтом" и "синем"). То же самое имеет место и для d- и s-кварков, т.е. они могут быть соответственно в состояниях $d_к$, $d_ж$, $d_с$ и $s_к$, $s_ж$, $s_с$. "Обычные" барионы согласно новой гипотезе должны состоять из кварков трех различных "цветов". Например, Δ^{++} состоит из $u_к$, $u_ж$, $u_с$, т.е. из различных частиц. По аналогии с "белым" цветом, представляющим смесь различных цветов, "обычные" барионы можно было бы называть "белыми", или "бесцветными", частицами. Было замечено также, что утроение числа кварков позволяет объяснить состав супермультиплетов, если составлять барионы также и из кварков, имеющих целые электрический и барионный заряды.

Гипотеза "цвета" позволяла избежать противоречия с квантовомеханическим принципом запрета очевидным образом – по существу, за счет утроения числа кварков, но в силу этого она представлялась многим физикам "неэкономной" и потому не вызывала особого энтузиазма. Только последующие теоретические и экспериментальные исследования позволили по-настоящему оценить глубокий смысл гипотезы "цвета", открывшей, как это выяснилось, путь к построению динамики адронов и объяснению (пока только качественному) того, почему в природе не наблюдаются свободные, не связанные между собой кварки. Далее остановимся на этих вопросах подробнее, но сначала приведем еще несколько фактов, свидетельствующих в пользу гипотезы кварков.

ДИНАМИКА АДРОНОВ НА ОСНОВЕ ИХ КВАРКОВОГО СТРОЕНИЯ

Соотношение между эффективными сечениями адронов. Глубоконеупругие процессы. Законы подобия (масштабная инвариантность). В своем развитии гипотеза кварков проделала путь, во многом аналогичный тому, по которому развивалась атомно-молекулярная гипотеза. Предложенная вначале для объяснения строения вещества, в дальнейшем она, как известно, понадобилась для объяснения различных явлений, происходящих в веществе: тепловых, электрических и др. Точно так же гипотеза кварков, выдвинутая для объяснения обнаруженной экспериментально системати-

ки адронов, вскоре оказалась необходимой для понимания динамики процессов с их участием.

Одним из первых применений гипотезы кварков к динамике адронов было установление связи между вероятностями процессов рассеяния при столкновении различных адронов. Это открытие было сделано в 1965 г. ленинградскими теоретиками Е.М. Левиным и Л. Франкфуртом. В качестве примера сравним эффективные сечения рассеяния пионов на нуклонах с эффективными сечениями нуклон-нуклонного рассеяния, предполагая, что вероятности взаимодействия этих частиц просто складываются из вероятностей взаимодействия их кварков. Поскольку пион состоит из кварка и антикварка, а нуклон – из трех кварков, в первом случае (πn-рассеяния) есть шесть возможных взаимодействующих пар (каждого кварка пиона с каждым кварком нуклона), а во втором случае (nn-рассеяния) – девять. Поэтому можно ожидать, что полное эффективное сечение πn-рассеяния будет составлять 6/9 (2/3) полного эффективного сечения nn-рассеяния. Опытные данные с погрешностью около нескольких процентов совпадают с таким предсказанием *.

Конечно, одно такое совпадение можно было бы посчитать случайным. Поэтому рассмотрим другой пример – рассеяние каонов и гиперонов на нуклонах. Опыт показывает, что эффективное сечение рассеяния каонов на нуклонах (около 19 мб) меньше (на 6 мб), чем сечение рассеяния пионов на нуклонах. Разность сечений $\sigma(\pi n) - \sigma(Kn) = \Delta\sigma$ возникает, очевидно, из-за того, что входящий в состав каонов странный s-кварк слабее взаимодействует с u- и d-кварками, чем последние между собой. Но тогда получаются вполне определенные предсказания для сечения рассеяния гиперонов на нуклонах. Действительно, сечение рассеяния Λ- и Σ-гиперонов, содержащих в своем составе один странный кварк, должно быть на $\Delta\sigma$ меньше сечения нуклон-нуклонного рассеяния, т.е. составлять $\sigma(\Lambda n) \approx \sigma(\Sigma n) \approx \sigma(nn) - \Delta\sigma \approx$ 33 мб, а сечение рассеяния Ξ-гиперонов, содержащих два странных кварка,на нуклонах должно составлять $\sigma(\Xi n) \approx \sigma(nn) - 2\Delta\sigma \approx$ 27 мб. Результаты опытов согласуются с этими предсказаниями.

Подобных примеров, когда простой арифметический подсчет на основе кварковой модели дает правильные результаты, можно привести очень много. Такие примеры относятся к взаимодействию не только между адронами, но и между лептонами и адронами. Слабое и электромагнитное взаимодействия адронов можно свести к взаимодействию входящих в их состав кварков.

Так, процесс рассеяния мюонного нейтрино ν_μ на протоне, сопровождающийся при высоких энергиях превращением нейтрино в мюон (μ^-) и рождением вторичных адронов (X), $\nu_\mu + p \to \mu^- + X$ можно представить как результат превращения d-кварка в u-кварк: $\nu_\mu + d \to \mu^- + u$. Отсюда следует вывод, что при высоких энергиях полное сечение рассеяния нейтрино на нейтроне, содержащем два d-кварка, должно быть в 2 раза больше, чем полное сечение рассеяния на протоне, содержащем в своем составе один d-кварк. Аналогично сечение рассеяния антинейтрино $\overline{\nu}_\mu$ можно рассматривать как процесс, идущий на u-кварке: $\overline{\nu}_\mu + u \to d + \mu^+$. Поэтому полное сечение рассеяния $\overline{\nu}_\mu$ на протоне вдвое больше, чем на нейтроне.

*Эффективное сечение πn-рассеяния при энергии 40 ГэВ составляет $\sigma(\pi n) \approx$ $\approx$ 25 мб. При той же энергии сечение nn-рассеяния $\sigma(nn) \approx$ 39 мб. Таким образом, $\sigma(\pi n)/\sigma(nn) \approx 0{,}64$.

Опытные данные согласуются с этими заключениями (небольшие отклонения от них связаны с тем, что наряду с тремя "валентными" u- и d-кварками в структуре протона при высоких энергиях надо учитывать "море" кварк-антикварковых пар).

Одним из наиболее важных подтверждений гипотезы кварков явились эксперименты по так называемому глубоконеупругому рассеянию лептонов, сопровождающемуся рождением довольно большого числа вторичных адронов и передачей им значительной доли первоначального импульса лептона. Передача адронам большого импульса происходит с отклонением лептонов на большие углы и отвечает рассеянию их в глубинных, "внутренних" слоях нуклона. Изучая процессы с большой передачей импульса, можно получить сведения о "внутреннем" строении нуклонов. В процессах упругого рассеяния электронов на нуклонах, т.е. в процессах, не сопровождающихся рождением дополнительных адронов, было установлено, что электрический заряд протона "плавно" распределен по его объему, размеры которого по порядку величины совпадают с радиусом действия ядерных сил (10^{-13} см). Такое заключение было сделано на основании того, что вероятность упругого рассеяния электронов с передачей большого импульса быстро уменьшалась с ростом переданного импульса. Когда же начали изучать глубоконеупругое рассеяние электронов на нуклонах, выяснилось, что вероятность передачи большого импульса от электрона к адронам довольно велика*. Полученные данные можно было объяснить, предположив, что нуклон представляет собой "облако" точечных частиц, т.е. частиц значительно меньшего радиуса, которые выбиваются в процессе рассеяния из нуклона, а затем вновь объединяются во вторичные адроны. Эти частицы были названы Р. Фейнманом *партонами*. Для формирования представлений о партонах особенно важное значение имело открытие своеобразного закона подобия, наблюдающегося при взаимодействии адронов высокой энергии. Дело в том, что при столкновениях адронов высокой энергии рождается, как правило, большое число вторичных частиц. Такое множественное рождение частиц характеризуется большим числом кинематических параметров, и заметить какие-либо закономерности в этих процессах довольно непросто. В 1967 г. А.А. Логунов, М.А. Мествиришвили и Нгуен Ван Хьеу предложили изучать при высоких энергиях особый класс множественных процессов, который, как они показали, может дать важные сведения о динамике сильного взаимодействия. В настоящее время эти процессы называют инклюзивными. К инклюзивным процессам при столкновении каких-либо частиц a и b относят все процессы, в которых рождается определенная частица c, независимо от того, какие частицы x и в каком количестве сопровождают рождение c: $a + b \to c + x$. Исследования, проведенные в 1968 г. почти сразу после ввода в действие ускорителя ИФВЭ, показали, что в инклюзивных процессах существует интересная закономерность: оказалось, что вероятность рождения вторичных адронов c является при различных энергиях столкновения универсальной функцией, зависящей только от типа сталкивающихся (a, b) и

*На такую возможность еще в начале 60-х годов указывал М.А. Марков.

рождающегося (c) адронов и от отношения импульса рождающегося адрона (в системе центра инерции) к импульсу сталкивающихся частиц. Другими словами, имеет место закон подобия – *масштабная инвариантность:* с увеличением энергии сталкивающихся частиц пропорционально "растягивается" спектр вторичных адронов. Такая зависимость естественным образом привела к представлению о том, что сталкивающиеся адроны состоят из "облака" соответствующим образом распределенных (по отношению к начальному импульсу адрона) квазинезависимых частиц – партонов. Дальнейшие исследования показали, что требуемое для объяснения инклюзивных процессов распределение партонов по их импульсам совпадает с тем, которое получается в опытах по глубоконеупругому рассеянию лептонов.

Естественным явилось предположение, что роль партонов выполняют кварки. Подтверждение этой гипотезы было получено в экспериментах по глубоконеупругому рассеянию нейтрино и антинейтрино на нуклонах. Из опытов по глубоконеупругому рассеянию лептонов на нуклонах было установлено, что партонам следует приписать спин 1/2, а сравнение данных по рассеянию электронов и нейтрино показало, что они совместимы при дробных зарядах кварков.

Можно привести десятки примеров успешного применения модели кварков к процессам с участием адронов. К некоторым из них мы еще обратимся, обсуждая появление так называемых адронных струй. Но, в общем, можно сказать, что гипотеза кварков, предложенная вначале для объяснения систематики адронов, оказалась исключительно плодотворной при объяснении их динамики и позволила найти связи между различными процессами с участием адронов, а также дать простую интерпретацию масштабным закономерностям. Это явилось одним из важнейших доводов в пользу реального существования кварков, несмотря на безуспешные попытки обнаружить их в свободном состоянии. Создавшаяся ситуация натолкнула ученых на мысль поискать причину "невылетания" кварков из адронов в характере сил, действующих между кварками и связывающих их в адроны. Именно на этом пути был достигнут дальнейший прогресс в понимании динамики самих кварков. Однако прежде чем переходить к этому вопросу, следует упомянуть еще об одном удивительном предсказании модели кварков – предсказании существования так .называемых очарованных частиц (тем более что сделанные в результате этого предсказания открытия дали важнейшие сведения именно о динамике взаимодействия кварков между собой).

Предсказание и открытие очарованных частиц. Загадка J/ψ-частицы. Предсказание существования и свойств совершенно нового типа адронов, названных очарованными, стало одним из триумфов модели кварков. Оно явилось следствием гипотезы о том, что наряду с u-, d- и s-кварками должен существовать четвертый, так называемый очарованный c-кварк, значительно превышающий по своей массе u-, d- и s-кварки и обладающий особым квантовым числом – *очарованием,* сохраняющимся (наподобие странности) в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий. Гипотеза о существовании очарованного кварка понадобилась для объяснения парадоксального расхождения между теоретическими предсказа-

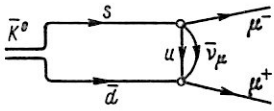


Рис. 1

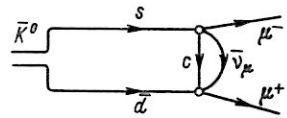


Рис. 2

ниями вероятности распада долгоживущего K_L^0-мезона на пару мюонов $(K_L^0 \to \mu^+\mu^-)$ и экспериментами, показавшими, что верхняя граница для вероятности такого распада лежит значительно ниже теоретических оценок.

Аналогичное расхождение существовало для разности масс долгоживущих (K_L^0) и короткоживущих (K_S^0) мезонов, для которых теоретические предсказания намного превышали наблюдаемое значение. В теории с тремя кварками распад $K_L^0 \to \mu^+\mu^-$ должен был происходить в два этапа (во втором порядке по слабому взаимодействию). Один из таких путей состоял в том, что странный s-кварк в составе K^0-мезона переходил в u-кварк, испуская μ^--мезон и антинейтрино $\bar{\nu}_\mu$ $(s \to u + \bar{\nu}_\mu + \bar{\mu})$, а затем родившийся u-кварк и антинейтрино аннигилировали с $\bar{d}$-кварком, превращаясь в μ^+-мезон $(\bar{d} + u + \bar{\nu}_\mu \to \mu^+)$. Константы, характеризующие каждый из указанных процессов, были хорошо известны из других экспериментов. В частности, было известно, что константа, определяющая переход $s \to u + \bar{\nu}_\mu + \bar{\mu}$, в 4–5 раз меньше, чем константа перехода $\bar{d} \to \bar{u} + \mu^+ + \nu_\mu$. Для того чтобы согласовать с опытными данными рассмотренный способ перехода $K_L^0 \to 2\mu$, который согласно теории должен был обязательно существовать, но давал завышенное значение вероятности, была высказана гипотеза о возможности еще одного способа перехода $K_L^0 \to 2\mu$, компенсирующего первый. Такая компенсация оказалась бы возможной, если бы наряду с переходом $K_L^0 \to 2\mu$ через u-кварк в промежуточном состоянии (рис. 1) существовал переход через "новый", а именно c-кварк (рис. 2), причем константа перехода $c \to s$ была бы такая же, как и $u \to d$, а константа перехода $c \to d$ равнялась бы по абсолютной величине константе перехода $u \to s$, но имела противоположный ей знак (другими словами, если бы благодаря слабому взаимодействию u-кварк переходил в комбинацию $d' = d \cos\theta_c + s \sin\theta_c$, а c-кварк – в "ортогональную" комбинацию $s' = -d \sin\theta_c + s \cos\theta_c$, где θ_c – так называемый угол Каббибо – характеризует "подавление" переходов $u \to s$ и $c \to d$). Предложенный способ взаимодействия через гипотетический c-кварк приводил к соответствию с экспериментом в распаде $K_L^0 \to 2\mu$ и к подавлению разности масс K^0- и K^0-мезона.

Вместе с тем из гипотезы c-кварка следовало, что должен существовать большой класс адронов, содержащих c-кварк (или его антикварк), причем наиболее низкие по массе члены этого семейства должны распадаться в процессе слабого взаимодействия в основном на странные частицы. Указанное предсказание подтвердилось на опыте. К настоящему времени открыты и довольно хорошо изучены мезоны D^+, D^-, D^0, $\bar{D}^0$, F^+ и $\bar{F}$ со спином, равным нулю, состоящие соответственно из кварков $c\bar{d}$, $\bar{c}d$, $c\bar{u}$, $\bar{c}u$, $c\bar{s}$ и $\bar{c}s$, их "возбужденные" состояния $D^{\pm *}$, D^{0*}, $\bar{D}^{0*}$, F^*, имеющие спин 1, а также барион Λ_c, представляющий систему из u-, d-, c-кварков. Изучение очарованных частиц интенсивно проводится на всех ускорителях, имеющих достаточную энергию для их генерации.

Первой обнаруженной экспериментально частицей, содержащей c-кварки, была так называемая J/ψ-частица, состоящая из очарованного кварка c и его антикварка $\bar{c}$. Поскольку для такой системы квантовое число очарование равно нулю, ее называют частицей со скрытым очарованием. Хотя возможность существования такой частицы не исключалась (согласно гипотезе о четвертом c-кварке), открытие ее в 1974 г. явилось подлинной сенсацией. Оказалось, что при массе около 3 ГэВ J/ψ-частица обладает удивительно малой шириной (около 70 кэВ). Это значение отвечает времени жизни J/ψ-частицы, примерно на три порядка большему, чем характерное

ядерное время 10^{-23} с. Было совершенно непонятно, почему аннигиляция $c\bar{c}$-кварков с образованием более легких кварков так сильно подавлена. Разрешение этой задачи сыграло важнейшую роль в установлении сил, действующих между кварками.

ОТ ИЗОТОПИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ К КАЛИБРОВОЧНЫМ ПОЛЯМ ЯНГА–МИЛЛСА И ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАРКОВ

Открытие позитрона и теория β-распада – начало новой эры, релятивистской квантовой физики. Следует отметить, что сама постановка вопроса о нахождении сил, действующих между кварками, является в определенном смысле беспрецедентной для физики. Действительно, гравитационные, электромагнитные, ядерные силы были обнаружены экспериментально как силы, действующие между определенными существующими в свободном состоянии объектами. Именно из экспериментов удалось получить основные сведения о соответствующих законах взаимодействия и в некоторых случаях (как это имеет место, например, для электромагнитных и гравитационных сил) построить соответствующую теорию взаимодействия. При исследовании кварков, само существование которых в свободном, несвязанном в адронах состоянии не обнаружено (и, весьма вероятно, вообще невозможно), примат переходит к теории. Задачей является построение таких моделей взаимодействия между кварками, которые объясняли бы экспериментальные закономерности процессов с участием адронов и, что желательно, допускали бы прямую экспериментальную проверку, позволяющую корректировать эти модели. Удивительным достижением последних лет является построение такой модели – квантовой хромодинамики, которая, несмотря на ряд нерешенных вопросов (в том числе вопроса об удержании кварков в адронах), в настоящее время успешно претендует на роль теории сильных взаимодействий частиц на малых расстояниях.

Если попытаться проследить развитие идей, приведших к созданию квантовой хромодинамики, то в качестве исходного пункта можно указать два открытия, последовавших почти сразу за открытием нейтрона, – открытие позитрона и создание теории β-распада.

Открытие позитрона, предсказанного Дираком, означало начало новой эры в физике – релятивистской квантовой физики. В рамках настоящей статьи нет возможности подробно остановиться на замечательной симметрии природы относительно частиц и античастиц, которая вытекает из квантовой теории и свойств четырехмерного пространства-времени Минковского. Эта симметрия нашла впоследствии свое выражение в так называемой *CPT*-теореме и подтверждена всем дальнейшим развитием физики (в частности, открытием антинуклонов, антидейтронов, антиядер ^{3}He и трития)*. Принципиально важным для теории элементарных частиц был

*Существование этой симметрии поставило перед физикой и космологией фундаментальную проблему – о причинах барионной асимметрии нашего участка Вселенной. Одним из возможных объяснений этого является несохранение числа барионов при нарушении комбинированной *CP*-симметрии. Особый интерес эта проблема приобрела в настоящее время в связи с предсказаниями нестабильности протона, сделанными на основе некоторых моделей великого объединения сил.

другой аспект открытия позитрона – подтверждение основных представлений квантовой электродинамики о возможности рождения и аннигиляции частиц и античастиц в результате электромагнитного взаимодействия. Это, по существу, открывало в соответствии с квантово-полевыми представлениями возможность рождения и исчезновения частиц благодаря существованию других типов взаимодействий, отличных от электромагнитных. Математический аппарат для описания такого рода процессов – аппарат вторичного квантования полей – был разработан еще в 1927–1928 гг. Дираком, Иорданом, Клейном и Вигнером. Указанные представления и были положены в основу теории β-распада, развитой в 1934 г. Ферми. Согласно теории Ферми причиной β-распада ($n \to p + e^- + \bar{\nu}$), т.е. перехода нейтрона в протон с испусканием электрона и антинейтрино (по современной терминологии – электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$), является локальное взаимодействие квантовых полей четырех указанных частиц с полуцелым спином (фермионов), приводящее к исчезновению нейтрона с одновременным рождением протона, электрона и антинейтрино. Фундаментальное значение предложенной теории состояло не только в том, что в ней впервые было введено новое β-взаимодействие, которое, как показали дальнейшие исследования, является одним из проявлений универсальных сил природы – сил слабого взаимодействия, но и в том, что в ней был предложен способ описания любого возможного типа взаимодействия частиц в форме взаимодействия их квантовых полей, приводящего к процессам взаимного превращения частиц. Именно поэтому указанная работа стала основой физики элементарных частиц и их взаимодействий.

Сразу же после создания теории β-сил она была использована И.Е. Таммом и Д.Д. Иваненко для попытки объяснения короткодействующего обменного характера ядерных сил (в предположении, что взаимодействие между нейтроном и протоном осуществляется путем обмена парой электрон–антинейтрино). Исторически эта попытка имела важное значение, хотя константа взаимодействия, определенная из β-распада, давала значение действующих между нуклонами сил, на много порядков меньшее, чем экспериментальная оценка ядерных сил. Развивая этот подход к проблеме ядерных сил, Юкава высказал гипотезу о том, что нуклоны в результате особого взаимодействия (отличного от β-взаимодействия) могут испускать или поглощать массивную частицу, которая, таким образом, и является переносчиком ядерных сил. Из известного радиуса действия ядерных сил можно было указать массу промежуточной частицы (200–300 электронных масс), а исходя из величины ядерных сил определить константу ее взаимодействия с нуклонами, которая оказалась приблизительно на три порядка больше постоянной тонкой структуры $\alpha = 1/137$, определяющей интенсивность электромагнитного взаимодействия. Так был предсказан один из переносчиков ядерных сил – пион и, по существу, впервые сформулировано само понятие *сильного взаимодействия*.

Теория универсального слабого $(V-A)$-взаимодействия. Особая выделенность векторных полей. После открытия пионов и мюонов выяснилось, что их распады можно объяснить с помощью четырехфермионных взаимодействий, аналогичных по своей интенсивности и структуре β-взаимодействию. Возникла идея об универсальном характере взаимодействий такого

рода – идея универсального слабого взаимодействия, которая получила дальнейшее развитие после открытия странных частиц и изучения их распадов. Важным этапом в изучении слабых взаимодействий было открытие того факта, что в процессах, которые они вызывают, нарушается пространственная четность, т.е. зеркальная симметрия. Огромная исследовательская работа завершилась в 1957–1958 гг. установлением $(V-A)$-закона универсального фермиевского взаимодействия, согласно которому четырехфермионное взаимодействие представляется в виде произведения суперпозиции заряженного векторного и аксиального токов.

Важным составным элементом теории универсального фермиевского взаимодействия явился закон сохранения векторного тока адронов, указавший на аналогию между слабыми и электромагнитными взаимодействиями (поскольку он аналогичен закону сохранения электрического заряда адронов). Структура универсального фермиевского взаимодействия в виде произведения заряженных векторных токов наводила на мысль о том, что слабое взаимодействие между токами может переноситься заряженными массивными векторными частицами – промежуточными $W^{\pm}$-бозонами*. Поскольку электромагнитное взаимодействие также переносится векторными частицами – фотонами, обладающими спином 1, гипотеза о существовании промежуточных векторных бозонов в слабом взаимодействии, естественно, привела к вопросу, который, как оказалось, имеет фундаментальное значение: *в чем причина особой выделенности векторных полей в качестве переносчиков элементарных взаимодействий?*

Теория калибровочных полей Янга–Миллса и единая теория электрослабых взаимодействий. В действительности к тому времени, когда указанный вопрос мог быть поставлен, на него уже существовал ответ. Этот ответ содержался в работе Янга и Миллса 1954 г. и заключался в том, что векторные поля естественным образом возникают в качестве так называемых компенсирующих полей из требования существования локальной симметрии, приводящей к тем или иным законам сохранения. Теория компенсирующих (калибровочных) полей Янга–Миллса возникла как обобщение хорошо изученного электромагнитного взаимодействия. В электромагнитных взаимодействиях, как известно, электрический заряд играет двоякую роль: он является, с одной стороны, сохраняющейся величиной, которая согласно теореме Нетер отвечает вполне определенной симметрии лагранжиана заряженных частиц, а с другой – источником электромагнитного поля. Такая двоякая роль заряда связана с тем, что электромагнитное поле можно рассматривать в качестве некоторого компенсирующего поля. Симметрия лагранжиана, отвечающая закону сохранения электрического заряда, заключается в том, что он не меняется при следующих преобразованиях полей заряженных частиц: $\varphi \to \varphi e^{i\alpha}$; $\varphi^* \to \varphi^* e^{-i\alpha}$ (при $\alpha = \text{const}$ – так называемая глобальная симметрия)**.

---

*Идея о том, что четырехфермионное взаимодействие переносится промежуточной частицей, высказывалась неоднократно, начиная с работы Юкавы 1935 г.

** Если представить комплексное поле заряженной частицы в виде суммы двух действительных полей $\varphi = (\varphi_1 + i\varphi_2)/\sqrt{2}$, то указанное преобразование отвечает "повороту" компонент φ_1 и φ_2 вокруг "третьей" оси.

Если же в соответствии с концепцией локального поля потребовать инвариантности лагранжиана относительно приведенных преобразований с величиной α, являющейся произвольной функцией пространственно-временной точки $\alpha(x, y, z, t)$ (локальная симметрия), то такое требование можно выполнить только при условии, что заряженные частицы взаимодействуют с некоторым векторным полем, определенным с точностью до калибровочного преобразования: $A_\mu \to A'_\mu = A_\mu - (1/c)\partial\alpha/\partial x^\mu$, компенсирующего произвол в выборе функции $\alpha(x)$. Поскольку при этом тензор $F_{\mu\nu} = \partial A_\nu/\partial x^\mu - \partial A_\mu/\partial x^\nu$ оказывается не зависящим от произвольной функции $\alpha(x)$, из него и конструируется однозначно релятивистски-инвариантный лагранжиан свободного векторного поля, который в точности совпадает с лагранжианом электромагнитного поля. Так как по условию калибровочной инвариантности величина $A_\mu A^\mu$ не может входить в лагранжиан свободного поля, частицы, отвечающие калибровочным полям, должны обладать нулевой массой покоя.

По аналогии с электродинамикой был поставлен вопрос: не могут ли другие сохраняющиеся величины, существование которых следует из определенных симметрий, играть роль зарядов и быть источниками новых полей. В качестве такой симметрии в работе Янга и Миллса была выбрана изотопическая симметрия, т.е. инвариантность лагранжиана взаимодействий относительно "вращений" в изотопическом пространстве. Вращению в изотопическом пространстве, если рассматривать нуклоны, отвечает замена волновых функций нейтрона и протона их суперпозицией, т.е. преобразование, осуществляемое матрицей размером 2×2, которая должна быть унитарной и иметь детерминант, равный единице. Такое преобразование является простейшим нетривиальным представлением группы $SU(2)$, характеризуемой тремя независимыми параметрами (например, углами поворота в трехмерном изотопическом пространстве). Инвариантность лагранжиана взаимодействия относительно таких поворотов (с постоянными для всего четырехмерного пространства Минковского параметрами) и приводит к сохранению изотопического спина (и его третьей проекции, связанной с зарядами частиц). Если же считать, что параметры поворота в изотопическом пространстве могут быть произвольными функциями пространственно-временной точки x, то инвариантность лагранжиана относительно таких преобразований (локальной симметрии) требует введения трех векторных (безмассовых) компенсирующих полей, для которых изотопический спин будет играть роль заряда. Частицы, отвечающие этим полям, должны иметь электрические заряды ± 1 и 0. Важнейшая особенность таких полей Янга–Миллса, отличающая их от электромагнитного поля, связана с тем, что повороты в изотопическом пространстве вокруг разных осей не коммутируют друг с другом [группа $SU(3)$ неабелева]. Благодаря этому частицы, отвечающие полям Янга–Миллса, в отличие от фотонов обладают собственными "изотопическими зарядами" и должны сами являться источниками подобных себе полей. Структура лагранжиана свободных полей Янга–Миллса однозначно определяется условием калибровочной инвариантности и отвечает возможности существования элементарных процессов превращения одной частицы Янга–Миллса в две или три подобные частицы, т.е. уравнения для полей Янга–Миллса

оказываются нелинейными. В дальнейшем идея Янга и Миллса, которая выявила особую роль векторных полей в качестве компенсирующих полей, связанных с определенной локальной симметрией взаимодействия, стала играть выдающуюся роль в создании теории как электрослабых, так и сильных взаимодействий.

Фундаментальное значение идеи Янга–Миллса, как уже отмечалось, было по-настоящему понято после открытия универсального $(V-A)$-закона слабых взаимодействий и появления гипотезы существования промежуточных векторных бозонов. Однако на пути применения этой идеи к слабым взаимодействиям была существенная трудность. Дело в том, что в качестве переносчиков слабого взаимодействия должны были выступать частицы с большой массой, отвечающей короткодействующему характеру этих сил, в то время как поля Янга–Миллса являются безмассовыми. Указанная трудность была устранена с помощью механизма спонтанного нарушения симметрии, предложенного Хиггсом. На этой основе и была создана современная теория электрослабых взаимодействий Салама–Вейнберга. Группой симметрии здесь является группа $SU(2)_L \times U(1)$, где $SU(2)_L$ – группа "слабого" изотопического спина, в качестве мультиплетов которой выступают, например, дублеты лептонов и кварков $\binom{\nu_e}{e}$, $\binom{\nu_\mu}{\mu}$, $\binom{u}{d'}$, $\binom{c}{s'}$ с левыми (L) спиральностями, а группа $u(1)$ отвечает сохранению гиперзаряда соответствующих мультиплетов.

Указанная симметрия порождает четыре безмассовых векторных калибровочных поля, два из которых имеют электрический заряд (W_μ^+, W_μ^-), а два нейтральны (W_μ^0, B_μ). Спонтанное нарушение симметрии осуществляется благодаря взаимодействию с некоторым скалярным полем (полем Хиггса), которое в основном состоянии (вакууме) имеет определенное отличное от нуля значение, т.е. представляет своего рода "конденсат". В результате взаимодействия с этим конденсатом заряженные векторные бозоны $(W_\mu^\pm)$ приобретают массу, а нейтральные поля W_μ^0, B_μ "перемешиваются" между собой так, что одна из комбинаций поля (A_μ) может считаться безмассовой (и представлять, таким образом, электромагнитное поле), а другая (Z_μ^0) имеет массу и становится переносчиком слабых взаимодействий между нейтральными токами частиц. При этом предсказываются вполне определенная структура и интенсивность слабого взаимодействия с нейтральными токами. Взаимодействие с вакуумным полем Хиггса в этой модели также приводит к появлению массы лептонов и кварков.

Проведенные к настоящему времени эксперименты полностью подтвердили предсказания теории относительно слабого взаимодействия нейтральных токов*. Однако для решающей проверки единого электрослабого взаимодействия необходимо прямое обнаружение промежуточных $W^\pm$- и Z^0-бозонов, масса которых однозначно предсказывается тео-

*Впервые взаимодействие нейтральных токов было экспериментально обнаружено в нейтринных экспериментах ЦЕРН в 1973 г. Взаимодействие нейтральных токов электронов с нуклонами было впервые установлено по эффектам несохранения четности в атомных явлениях на основании опытов, проведенных в Новосибирске в

рией, если исходить из интенсивности слабых взаимодействий с нейтральными и заряженными токами и значения элементарного электрического заряда частиц. Значения массы ожидаются соответственно такими: $m_W \approx \approx 78$ ГэВ и $M_{Z\,0} \approx 85$ ГэВ.

Есть надежда, что после проведения опытов на встречных протон-антипротонных пучках ЦЕРН в ближайшее время можно будет ответить на этот вопрос. Вопрос же о механизме спонтанного нарушения симметрии очень неясен. Существующая теория не может предсказать ни массу хиггсовских бозонов, ни причины, по которым взаимодействие лептонов и кварков с хиггсовскими бозонами столь неуниверсально и приводит к большому различию в массах частиц.

В настоящее время помимо модели Хиггса рассматриваются и другие возможные механизмы спонтанного нарушения симметрии (например, с помощью состояний из супертяжелых кварков – так называемая модель техницвета). Для решения поставленного вопроса необходимы экспериментальные исследования, которые будут проводиться на новых поколениях ускорителей (при энергии несколько тераэлектронвольт в системе центра инерции).

Квантовая хромодинамика – теория взаимодействия кварков. Убедившись на примере электрослабого взаимодействия в фундаментальной роли компенсирующих векторных полей, вернемся к вопросу о взаимодействии кварков и попытаемся построить модель взаимодействия кварков с помощью калибровочных полей. Для этой цели прежде всего надо решить, какой симметрии, т.е. каким сохраняющимся величинам, могут соответствовать калибровочные поля, осуществляющие взаимодействие кварков. Исключительно удачной оказалась гипотеза о том, что в качестве такой симметрии следует выбрать симметрию между "цветовыми" квантовыми числами кварков. Как упоминалось выше, понятие цвета было введено в качестве сохраняющегося квантового числа, принимающего три значения для характеристики трех возможных состояний каждого типа кварков (поскольку предположение о трех возможных состояниях каждого кварка позволяло избежать противоречия с принципом Паули в составной модели барионов). В рамках этого предположения можно и естественно было считать, что сильное взаимодействие кварков не зависит от их цвета. По аналогии с изотопической инвариантностью, проявляющейся как зарядовая независимость ядерных сил, независимость сильных взаимодействий от цвета могла быть обеспечена инвариантностью лагранжиана взаимодействия относительно преобразования, состоящего в замене волновой функции каждого кварка суперпозицией трех цветовых состояний. Это преобразование, осуществляемое унитарной унимодулярной матрицей (3×3), отвечает простейшему представлению группы $SU(3)$. В отличие от приближенной (нарушенной) $SU(3)$-симметрии, рассматривавшейся ранее для различных типов ("ароматов") кварков (u, d, s), цветовую симметрию $SU(3)_c$ можно было предполагать точной. Поскольку группа $SU(3)_c$ характеризуется восемью параметрами, отвечающими различным "поворотам" в цветовом пространстве, локальная цветовая $SU(3)_c$-симметрия приводила к восьми векторным безмассовым полям;

1978 г., и подтверждено результатами измерений рассеяния электронов на протонах и дейтронах в Стэнфорде (США). Отметим, что идея опытов для поиска взаимодействия нейтральных токов была предложена Я.Б. Зельдовичем еще в 1959 г. – до создания единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

частицы, соответствующие этим полям, были названы глюонами (от английского слова "glue" – "клей"), поскольку предполагалось, что с их помощью кварки могут быть "склеены" в адроны. Так как группа $SU(3)$ неабелева, глюоны должны обладать цветовым зарядом и сами являться источниками глюонных полей, т.е. уравнения для полей глюонов должны быть нелинейными. Калибровочная инвариантность приводит к существованию элементарных процессов перехода одного глюона в два и три глюона ($g \to 2g$; $g \to 3g$) и однозначно устанавливает структуру и интенсивность соответствующего взаимодействия. Квантовая теория взаимодействующих цветовых полей была по аналогии с квантовой электродинамикой названа *квантовой хромодинамикой* (КХД).

Как показали дальнейшие теоретические исследования, благодаря указанным переходам $g \to 2g$ КХД обладает замечательным свойством: значение цветового заряда, определяющего взаимодействие кварка с глюоном, уменьшается с ростом переданного кварку импульса, т.е. с уменьшением расстояния. Это свойство было названо асимптотической свободой, так как оно отвечает "выключению" взаимодействия между кварками на асимптотически малых расстояниях и позволяет рассматривать их как свободные, невзаимодействующие частицы. Существование асимптотической свободы с КХД представляется фундаментально важным в двух отношениях. С одной стороны, при уменьшении цветового заряда, т.е. константы сильных взаимодействий, на малых расстояниях наблюдается тенденция сближения его и, возможно, совпадение с зарядом электрослабых взаимодействий. Этот факт лежит в основе попыток построения единой теории ("великого объединения") всех существующих взаимодействий. С другой стороны, увеличение цветового заряда с увеличением расстояния является, возможно, причиной удержания кварков в адронах.

Вполне вероятно, что изолированный цветовой заряд не может существовать в виде одиночного заряда, поскольку благодаря своеобразному эффекту "антиэкранировки" он должен был бы притягивать к себе из вакуума заряды того же цвета и тем самым приобретать бесконечное значение. Вместе с тем при наличии рядом с ним заряда противоположного цвета силовые линии глюонного поля могли бы замыкаться в своего рода трубку, связывающую оба заряда. В этом случае при раздвижении зарядов сила взаимодействия между ними не уменьшалась бы (а потенциальная энергия линейно возрастала бы с расстоянием).

Таким образом, цветовые заряды противоположного знака не могли бы оторваться друг от друга, а глюонная трубка играла бы роль струны, сцепляющей их. Сильное растяжение такой струны, которое может получиться, если один из цветовых зарядов (кварк или антикварк) приобретает в результате столкновения с другими частицами большой импульс, может приводить к разрыву струны в одном или нескольких местах. Но тогда на месте разрыва появляются новые кварк и антикварк, которые объединяются с разорванными частями так, что разлетающиеся состояния вновь оказываются "бесцветными". Таким образом, любой вылет кварка из системы сопровождается его "обесцвечиванием" и превращением в обычный адрон. К сожалению, описанная картина базируется пока лишь на качественных соображениях, и обосновать (или опровергнуть) ее строгими расчетами еще не удалось.

Примечательно, что как в изложенном механизме удержания цветных кварков, так и в некоторых других фундаментальную роль могут играть свойства физического вакуума. Существуют правдоподобные соображения о том, что в отношении цветовых полей физический вакуум ведет се-

бя аналогично сверхпроводнику, выталкивающему из себя магнитное поле. Глюонные трубки между цветовыми зарядами в системе аналогичны в этом случае промежуточному состоянию сверхпроводников. Поэтому не исключено, что строгое объяснение "удержания" кварков на основе КХД (если оно возможно) потребует не меньшего труда, чем объяснение сверхпроводимости.

Экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу существования "цвета" и справедливости КХД. А д р о н н ы е с т р у и. При столкновении электронов с позитронами может происходить их аннигиляция в адроны. Эксперименты на ускорителях со встречными e^+e^--пучками показали, что образующиеся в большом количестве при такой аннигиляции адроны разлетаются не независимо друг от друга, а в виде двух противоположно направленных струй. Подобный характер процесса хорошо согласуется с кварковыми представлениями. Согласно этим представлениям e^+e^--аннигиляция сначала происходит с образованием пары кварк – антикварк, которые в силу закона сохранения импульса должны разлетаться в противоположные стороны. Однако благодаря явлению удержания свободные кварки не могут удаляться друг от друга, поэтому при их разлете происходит рождение из вакуума дополнительных кварк-антикварковых пар, которые "обесцвечивают" разлетающиеся кварки и превращают их в "обычные" адроны. Таким образом, возникают струи из адронов с направлениями движения, близкими к направлениям движения первоначально образовавшихся кварка и антикварка. Наблюдаемое на опыте угловое распределение струй относительно направления сталкивающихся e^+e^--пучков полностью согласуется с такой картиной процесса. КХД вносит вместе с тем некоторые дополнения в указанную картину процесса. Действительно, при разлете кварка и антикварка (еще до того, как произошло их обесцвечивание) один из них может испустить глюон. Глюон, являясь цветным состоянием, также обесцвечивается путем рождения дополнительных пар кварков и антикварков. Таким образом, в определенной доле событий e^+e^--аннигиляция с образованием адронов должна происходить в виде трех струй: кварковой, антикварковой и глюонной. Согласно расчетам КХД доля "трехструйных" событий должна расти с увеличением энергии сталкивающихся пучков. Сооружение колец для встречных e^+e^--пучков на энергию около 30 ГэВ позволило обнаружить такие трехструйные события и убедиться, что их кинематические характеристики полностью соответствуют предсказаниям КХД (в частности, тому, что спин глюона равен 1).

Эксперименты по e^+e^--аннигиляции с образованием адронов дают еще один простой количественный аргумент в пользу существования цветных кварков. Речь идет о величине R – отношении сечения e^+e^--аннигиляции с образованием адронов к сечению аннигиляции с образованием пары $\mu^+\mu^-$. При энергии ниже 3 ГэВ значение указанной величины должно равняться утроенной сумме квадратов зарядов для u-, d-, s-кварков: $R = 3\,(Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2) = 3\,(4/9 + 1/9 + 1/9) = 2$. Это значение отвечает предположению о том, что ниже порога рождения c-кварков e^+e^--аннигиляция с образованием адронов происходит через кварки трех цветов – u, d, s – и хорошо совпадает с экспериментально измеренным значением R. Выше порога рождения J/ψ-

частицы значение R возрастает скачком, что отвечает открытию нового канала аннигиляции с образованием адронов через очарованные кварки, а при энергиях, превышающих область энергии Υ-частиц, которые состоят из b-кварков с зарядом $Q_b = -1/3$, значение R становится близким к теоретическому значению:

$$R = 3\,(Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2 + Q_b^2) = 3\,(4/9 + 1/9 + 1/9 + 4/9 + 1/9) \approx 3{,}67^*.$$

Тот факт, что теоретическое значение R хорошо согласуется с экспериментальным только при учете трех возможных цветовых состояний, является веским аргументом в пользу существования квантового числа цвет.

Спектроскопия "чармония" и "бьютиония". На основе представлений квантовой хромодинамики оказалось нетрудным объяснить загадку J/ψ-частицы -- ее малую ширину. Поскольку J/ψ представляет связанное состояние $c\bar{c}$-кварков, а квантовое число шарм (очарование) сохраняется в сильных взаимодействиях, распад J/ψ по сильному взаимодействию мог бы происходить либо путем рождения дополнительных пар легких u- и d-кварков и образования ими связанных систем с c-кварками: $c\bar{u} + \bar{c}u$; $c\bar{d} + \bar{c}d$, либо путем аннигиляции $c\bar{c}$-кварков с образованием более легких. Первый путь для J/ψ, т.е. распад $J/\psi \to D^0 + \bar{D}^0$ или $J/\psi \to D^+ + D^-$, закрыт, так как масса J/ψ оказалась меньше суммы масс двух D-мезонов**. Казалось бы, возможен второй путь – аннигиляция $c\bar{c}$-кварков с образованием обычных частиц. Однако аномально малая ширина J/ψ указывает на то, что этот канал сильно подавлен. В чем же причина его подавления? Прежде чем ответить на этот вопрос, надо отметить, что аналогичное подавление аннигиляционного канала, хотя и не в такой степени, имеет место и для φ-мезона, представляющего собой состояние со скрытой странностью $s\bar{s}$. Действительно, φ-мезон распадается в основном с рождением дополнительных легких кварков $\varphi \to K^+ + K^-$; $\varphi \to K_S^0 + K_L^0$, хотя масса φ лишь немного превосходит сумму масс K-мезонов и, казалось бы, более вероятными должны были быть распады φ с образованием пионов с аннигиляцией пары $s\bar{s}$, сопровождающейся образованием легких кварков. Причина подавления аннигиляционного канала в обоих случаях одна и та же.

Дело в том, что элементарным взаимодействием в квантовой хромодинамике является взаимодействие кварков и глюонов. Поэтому аннигиляция кварков должна происходить в цветные глюоны, которые, обесцвечиваясь, переходят в обычные адроны. Но аннигиляция бесцветных состояний, какими являются J/ψ и φ, в один цветной глюон невозможна, так как при этом нарушился бы закон сохранения цвета. Невозможна аннигиляция J/ψ и φ и с образованием двух глюонов. Последнее обстоятельство связано с тем, что J/ψ и φ имеют спин, равный 1, а переход векторного мезона в две безмассовые векторные частицы, какими являются глюоны, запрещен согласно известной теореме, установленной независимо Л.Д. Ландау и Ли и Янгом. Таким образом, аннигиляция $c\bar{c}$-кварков в J/ψ-частицы и $s\bar{s}$-кварков в φ-частицы может происходит только через три глюона. Это и является причиной подавления аннигиляционного канала в J/ψ- и φ-частицах. Различная же степень подавления этого канала для J/ψ- и φ-частиц объясняется специфиче-

---

*При сравнении с опытом к указанному значению необходимо прибавить "глюонные" поправки, составляющие около 1,5–2%.

**Именно так распадается возбужденное состояние ψ'' ($m_{\psi''} = 3{,}77$ ГэВ), имеющее вследствие этого значительно большую ширину, чем J/ψ.

ским для КХД свойством асимптотической свободы и уменьшением эффективного цветового заряда с ростом переданного импульса. Поскольку масса J/ψ втрое больше, чем масса φ, в процессе $c\bar{c}$-аннигиляции передается существенно больший импульс. Поэтому уменьшение цветового заряда, который входит в вероятность трехглюонной аннигиляции в шестой степени, обеспечивает значительное подавление аннигиляционного канала в J/ψ-частице по сравнению с φ-частицей, так что он становится сравнимым с аннигиляционным каналом, идущим по электромагнитному взаимодействию через виртуальный фотон (например, $J/\psi \to \mu^+\mu^-, e^+e^-$).

Таким образом, в разрешении "загадки" J/ψ-частицы оказываются определяющими наиболее характерные особенности КХД – наличие сохраняющегося цвета, спин глюона и асимптотическая свобода.

Развитые представления блестяще подтверждаются всей картиной уровней энергии в системе, состоящей из $c\bar{c}$-кварков. По своему строению такая система напоминает позитроний, и в силу этой аналогии ее называют *чармонием*. Состояние J/ψ представляет собой основное состояние *орточармония* со спином 1 [в спектроскопических обозначениях $^3(1S)_1$]. Наряду с ним существуют другие состояния: $^3(2S)_1$ – ψ'-частица с массой 3,7 ГэВ; $^3P_2$, $^3P_1$, $^3P_0$ – так называемые χ-частицы с квантовыми числами 2^+, 1^+, 0^+. Экспериментально обнаружены и уровни *парачармония*, например $^1(1S)_0$ – уровень с квантовыми числами 0^-, называемый η_c-частицей (ее масса равна 2,9 ГэВ и лежит ниже массы J/ψ). На основе кварковой модели можно оценить положение уровней чармония, их ширины и способы распада. Существенно, что аннигиляция $c\bar{c}$-пары в случае η_c- и χ_2-, χ_0-частиц может происходить не через три, а через два глюона. Поэтому указанные частицы имеют ширину, существенно превышающую ширину J/ψ- и ψ'-частиц. Для расчета уровней чармония успешно применяется в качестве нулевого приближения нерелятивистская модель кварков с эффективным потенциалом, вид которого выбирается на основе соображений КХД: на малых расстояниях он имеет характер кулоновского притяжения, что отвечает обмену безмассовыми глюонами, а на больших расстояниях его выбирают увеличивающимся с расстоянием, что имитирует удержание кварков.

Развитая на основе КХД картина взаимодействия тяжелых кварков хорошо подтвердилась и в применении к новому, открытому в 1978 г. группой Ледермана семейству Υ-частиц, содержащих b-кварки с новым квантовым числом бьюти (*прелесть*). В отличие от c-кварка, в пользу существования которого были серьезные теоретические аргументы, открытие состояний с b-кварками произошло в известной мере случайно. (Хотя следует отметить, что существование b-кварка подозревалось на основе некоторых моделей нарушения CP-инвариантности, а после открытия тяжелых τ-лептонов – также и на основе замеченной ранее универсальности слабых взаимодействий кварков и лептонов.) В первых экспериментах (в силу недостаточного разрешения) семейство Υ-частиц было замечено в виде широкого (порядка 1 ГэВ) пика в распределении по эффективной массе $\mu^+\mu^-$-пар, рождающихся в нуклон-нуклонных столкновениях. Представлялось естественным попытаться интерпретировать этот пик системой узких резонансов, аналогичных J/ψ и ψ', но содержащих новые, более тяжелые кварки. Поскольку пик наблюдался при массе $\mu^+\mu^-$ около 10 ГэВ, новым кваркам следовало приписать массу около 5 ГэВ.

Однако существовавшие к тому времени расчеты (проведенные на основе КХД) потенциалов приводили к заключению, что для кварков такой массы должно быть не два, как в случае $c\bar{c}$-системы, а три узких состояния. С помощью квантовой хромодинамики можно было оценить ширину этих состояний, сечение их образования и способы распадов. Все эти предсказания были затем подтверждены экспериментально. В настоящее время хорошо установлено существование в системе $b\bar{b}$ *трех* узких резонансов: Υ (9,46 ГэВ), Υ' (10 ГэВ) и Υ''(10, 4 ГэВ), измерены их полная ширина и ширина распада на e^+e^-- или $\mu^+\mu^-$-пару. Из этих данных следует, что b-кварку надо приписать заряд $Q_b = -1/3$. Наблюдалось и состояние Υ''', которое распадается на мезоны с "открытой" прелестью, т.е. систему из легкого кварка и b-кварка. Установлено также, что такие мезоны распадаются в основном на очарованные частицы, т.е. доминирует слабый переход $b \to c$.

Помимо приведенных выше существует много других экспериментальных закономерностей, которые свидетельствуют в пользу положений КХД (например, в явлениях с большим переданным импульсом системе адронов). Все сказанное указывает на то, что современная физика элементарных частиц, взяв на вооружение идею калибровочных полей, находится на правильном пути. Именно это и побуждает теоретиков идти дальше, разрабатывая модели великого объединения сил. Несомненно, однако, что для решения поставленных проблем необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований при энергиях сотни и тысячи гигаэлектронвольт в системе центра инерции. Этой цели служат проекты ускорителей нового поколения, сооружение которых начато в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие нейтрона, сделанное полвека тому назад, явилось завершением исследований, позволивших решить проблему строения атомных ядер. Это имело колоссальное научное и прикладное значение и стало важнейшим элементом всей современной научно-технической революции.

Вместе с тем открытие нейтрона приобрело фундаментальное значение для последующего развития физики элементарных частиц. Обнаружение семейства адронов, состоящего из протона и нейтрона, было первым шагом на пути к установлению систематики всех адронов и гипотезе об их составном кварковом строении. На всех этапах этого пути существование нейтрона играло решающую роль. Для объяснения β-распада нейтрона была создана теория β-взаимодействий, ставшая прообразом теории всех существующих взаимодействий; нейтрон и протон были использованы для построения первой, еще предварительной, докварковой теории адронов — модели пиона; наконец, идея локальной изотопической инвариантности нейтрона и протона послужила основой для создания теории калибровочных векторных полей, ставшей фундаментом построения единой теории всех взаимодействий.

Именно эти открытия вывели современную физику элементарных частиц на новые рубежи познания природы. Они привели к установлению составного строения адронов, открытию связей между различными вза-

имодействиями, новому подходу к проблеме происхождения масс элементарных частиц и строения физического вакуума. Полученные результаты способствовали слиянию физики элементарных частиц с космологией, наметившемуся за последние годы. Несомненно, что на этом пути нас ждут новые поразительные открытия.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Chadwick J. Possible Existence of a Neutron. – Nature, 1932, vol. 129, p. 312.

Iwanenko D. Sur la constitution des noyauk atomiques. – Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1932, vol. 195, p. 439.

Heisenberg W. Uber den Bau der Atomkerne I. – Z. Phys., 1932, Bd 77, S. 1.

Fermi E. Versuch einer Theorie der β-Strahlen. – Z. Phys., 1934, Bd 88, S. 161.

Tamm I. Exchange Forces between Neutrons and Protons and Fermi's Theory. – Nature, 1934, vol. 133, p. 981.

Iwanenko D. Interaction of Neutrons and Protons. – Ibid., p. 981.

Yukawa H. On the Interaction of Elementary Particles. – Proc. Phys.-Math. Soc. Jap., 1935, vol. 17, p. 48.

Янг Ч., Миллс Р. Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность. – В кн.: Элементарные частицы и компенсирующие поля: Пер. с англ./Под ред. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964, с. 28.

Герштейн С.С., Зельдович Я.Б. О мезонных поправках в теории β-распада. – Журн. эксперим. и теорет. физ., 1955, т. 29, с. 698.

Feynman R.P., Gell-Mann M. Theory of the Fermi Interaction. – Phys. Rev., 1958, vol. 109, p. 193.

Sudarshan E.C.G., Marshak R.E. The Nature of the Four-Fermion Interaction. – In: Proc. of the Padua – Venice Conf. on the Mesons. Venice, 1957, p. V 14.

Logunov A.A., Mestvirishvili M.A., Nguyen Van Hieu. High-Energy Behaviour of Inelastic Cross-Sections. – Phys. Lett., 1967, vol. 25B, p. 611; Proc. Intern. Conf. on Particles and Fields. N.Y., 1967, p. 258.

Logunov A.A., Nguen Van Hieu. On Some Consequences of Analyticity and Unitarity. – In: Proc. Topical Conf. on High-Energy Collisions of Hadrons. Vol. 2. Geneva: CERN, 1968, p. 74.

Марков М.А. Нейтрино. М.: Наука, 1964.

Зельдович Я.Б. Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии. – Успехи физ. наук, 1981, т. 133, с. 479.

Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981 (там же подробная библиография).

НЕЙТРОН И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

А.М. Петросьянц

Нейтрон – это тот "золотой ключик", без которого нельзя было бы открыть "дверь" в большую ядерную энергетику. Без использования нейтрона – в физических реакциях, без его взаимодействия с ядрами атомов и поглощения атомными ядрами, вплоть до самых тяжелых, без уникальной способности нейтрона, исчезая, вызывать ядерные реакции, из которых особое значение для ядерной энергетики имеет деление ядер урана и плутония, невозможно было бы высвобождение внутриядерной энергии и создание, таким образом, ядерных энергетических установок, предназначенных для мирных и военных целей.

К сожалению, человечество использовало чудесные свойства освобожденной с помощью нейтрона внутриядерной энергии в первую очередь в

военных целях, для нанесения бомбовых ударов по японским городам Хиросима и Нагасаки и уже позднее – в мирных, созидательных целях – для получения энергии с помощью атомных электростанций, ядерных пароэнергетических установок на морских судах, в космических аппаратах, для получения радиоактивных нуклидов и т.д.

Высокая эффективность нейтрона при осуществлении ядерных реакций, своеобразие взаимодействия медленных нейтронов с веществом делают нейтрон исключительно важным средством исследований в ядерной физике, физике твердого тела, важнейшим фактором, "ключом" к ядерной энергетике. В этом смысле роль нейтрона очень велика в практической деятельности человека, в ядерной энергетике, в производстве трансурановых элементов, в получении радиоактивных нуклидов (искусственная радиоактивность), в прикладных исследованиях и в промышленном применении, в том числе химической промышленности (активационный анализ), в геологических разведках (нейтронный каротаж), в медицине (для диагностики и лечения), в биологии и т.п.

Открытие нейтрона произошло в феврале 1932 г., однако идея его существования как нейтральной частицы уже лет за десять до его обнаружения Дж. Чадвиком укоренилась в умах физиков.

В то время ученые во главе с Резерфордом много дискутировали о различных сочетаниях протонов и электронов как фундаментальных частиц, входящих в состав атомов, о модификациях атома водорода, о предполагаемом существовании нейтральной частицы. И такая нейтральная частица была, наконец, обнаружена, получила все права "гражданства" и обрела свое нынешнее название – нейтрон.

Дальнейшие работы по ядерной физике, многочисленные исследования по изучению нейтрона привели к классификации нейтронов в зависимости от их энергии: ультрахолодные (до 10^{-7} эВ), очень холодные (10^{-7} – 10^{-4} эВ), холодные ($10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ эВ), тепловые ($5 \cdot 10^{-3}$ – 0,5 эВ), резонансные (0,5–10^{4} эВ), промежуточные (10^{4} – 10^{5} эВ), быстрые (10^{5} – 10^{8} эВ), релятивистские (10^{10} эВ и выше). Все нейтроны с энергией до 10^{5} эВ определяются как медленные нейтроны.

Мощным источником нейтронов является ядерный реактор. Энергия нейтронов, возникающих в реакторе при делении ядер урана или плутония, составляет несколько миллионов электронвольт. Для замедления быстрых нейтронов, т.е. для преобразования их в медленные, в том числе и ультрахолодные нейтроны, места их образования окружают специальными веществами, в которых нейтроны замедляются до нужных исследователю энергий. Кстати, доля ультрахолодных нейтронов сравнительно мала и составляет всего лишь 10^{-13} общего числа образовавшихся нейтронов.

Наиболее широкое применение получили тепловые, медленные нейтроны, которые главным образом используются в многогранной деятельности человека, в том числе в ядерной энергетике.

Хотя время жизни свободного нейтрона как нестабильной частицы сравнительно невелико (немногим более 10 мин), этого все же вполне достаточно, чтобы использовать его как "снаряд" для деления ядер тяжелых элементов. Особенностью нейтрона, определяющей его исключи-

тельное значение в ядерной физике, является отсутствие у него электрического заряда, в силу чего нейтрон способен проникать в любые ядра атомов и при любой энергии.

Для проведения тонких исследований в области нейтронной физики, нейтронной спектроскопии ядер, физики конденсированных сред и других областях были созданы и ныне широко используются в СССР импульсные реакторы на быстрых нейтронах (ИБР-1, ИБР-2). Необходимость сооружения ИБР была вызвана тем, что стационарные ядерные реакторы генерируют постоянно (во времени) мощный поток нейтронов. Для работ по нейтронной спектроскопии пучок нейтронов необходимо периодически прерывать с помощью селектора нейтронов, пропускающего нейтроны в короткие промежутки времени, т.е. короткими импульсами.

ИБР – это реактор, который периодически генерирует короткими импульсами нейтроны, реактор периодического действия. ИБР-2, сооруженный в Дубне, – уникальный вид реактора, генерирующий мощные нейтронные потоки с мгновенным значением плотности потока в импульсе $2 \cdot 10^{16}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$ и мощностью в импульсе 5000 МВт при средней мощности 4 МВт.

С открытием нейтронов и началом их применения человечество получило новые, исключительные возможности использования атомной энергии, а ядерная физика приобрела новое, невиданное качество, вот почему уже через 10 лет после открытия нейтрона стал возможным пуск первого ядерного реактора в декабре 1942 г. в США с активным участием ученых-физиков из многих стран мира. В декабре 1946 г. в Советском Союзе был пущен первый в Европе и Азии исследовательский ядерный реактор, созданный силами советских ученых, инженеров и рабочих.

Фундаментальные работы в области ядерной физики советские ученые начали вести еще в начале 30-х годов. Значение атомной энергии они поняли на самой ранней стадии работ. Еще в 1922 г. академик В.И. Вернадский заявил:

"Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не могут сравняться все им раньше пережитые. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетие. Но ясно, что это должно быть.

Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение?

Дорос ли он до уменья использовать ту силу, которую неизбежно должна дать ему наука?

Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного прогресса. Они должны себя чувствовать ответственными за последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества"*.

Перечитывая эти слова, можно только удивляться мудрости и политической прозорливости советских ученых. Ведь это было сказано за 10 лет

*Вернадский В.И. Очерки и речи. Петроград: Научное химико-техническое изд-во, 1922, с. 1.

до открытия нейтрона и почти за 25 лет до взрыва атомных бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки.

Напомним, что уже в первые годы советской власти были созданы Петроградский государственный рентгенологический и радиологический институт, затем Физико-технический, Оптический, Радиевый институты, расширился Московский физический институт. В этих и многих других институтах росли как ученые, набирались опыта многие в будущем выдающиеся советские физики и радиохимики — гордость советской ядерной физики, атомной науки и техники.

Уровень знаний наших ученых, технические возможности лабораторий того довоенного периода хорошо показывает такой факт. В мае 1932 г. английские ученые Кавендишской лаборатории (Кембридж) Кокрофт и Уолтон объявили о расщеплении ядра лития ускоренными протонами. Это было поистине сенсацией в науке. В том же 1932 г. через несколько месяцев после эксперимента английских физиков, уточняя его, советские ученые К.Д. Синельников, А.К. Вальтер, А.И. Лейпунский и Г.Д. Латышев доложили о расщеплении ими ядра лития в Харьковском физико-техническом институте.

После выдающегося открытия в конце 1938 г. немецкими учеными Ганом и Штрасманом деления ядер урана использование внутриядерной энергии стало реальной возможностью. Экспериментальные исследования деления ядер урана нейтронами заняли центральное место в лабораториях ядерной физики Ленинградского физико-технического института, Физического института АН СССР им. П.Н. Лебедева, в Харьковском физико-техническом институте, Радиевом институте, Институте химической физики АН СССР и ряде других. Было установлено число вторичных нейтронов при делении ядер урана, открыто явление спонтанного деления урана, создана теория цепной реакции деления ядер урана и многое другое.

Последняя довоенная — V Всесоюзная конференция по атомному ядру состоялась в ноябре 1940 г. в Москве. Война прервала все работы по атомному ядру, но они возобновились в конце 1943 г. Работы по созданию экспериментального исследовательского ядерного реактора с самоподдерживающейся цепной реакцией делений ядер урана на тепловых нейтронах начались в трудные, тяжелые годы войны — в конце 1943 г. Здание для первого в СССР исследовательского ядерного реактора Ф-1 было готово к июню 1946 г.

После того как были проведены все необходимые эксперименты, разработана система управления и защиты реактора, установлены размеры реактора, проведены все необходимые опыты с моделями реактора, определена плотность нейтронов на нескольких моделях, получены графитовые блоки (так называемой ядерной чистоты) и (после нейтронно-физической проверки) урановые блочки, в ноябре 1946 г. приступили к сооружению реактора Ф-1.

Общий радиус реактора был 3,8 м. Для него потребовалось 400 т графита и 45 т урана. Реактор собирали слоями и в 15 ч 25 декабря 1946 г. был собран последний, 62-й слой. После извлечения так называемых аварийных стержней был произведен подъем регулирующего стержня, начался отсчет плотности нейтронов, и в 18 ч 25 декабря 1946 г. ожил, зарабо-

тал первый в СССР реактор. Это была волнующая победа ученых – создателей ядерного реактора и всего советского народа. А через полтора года, 10 июня 1948 г., промышленный реактор с водой в каналах достиг критического состояния и вскоре началось промышленное производство нового вида ядерного горючего – плутония.

Таким образом, ядерная физика создала научную основу ядерной техники, а ядерная техника в свою очередь явилась фундаментом ядерной энергетики, которая стала в настоящее время развитой отраслью электроэнергетического производства.

Промышленные реакторы отличались от Ф-1 не только очень большой тепловой мощностью, но и наличием в активной зоне реактора различных конструкционных элементов для отвода тепла от урановых блочков, аппаратурой для замены облученных высокоактивных блочков, накопивших плутоний, и т.д. Для первых промышленных реакторов по получению плутония была принята конструкционно-технологическая схема с графитовым замедлителем и отводом тепла (охлаждением) с помощью обычной воды.

Пуск и эксплуатация исследовательского реактора Ф-1 с получением первых, очень малых, микрограммовых количеств плутония, а также пуск первого в Советском Союзе промышленного реактора подвели итог огромной, по сути дела титанической работы большой армии советских ученых, физиков-теоретиков, экспериментаторов, радиохимиков, геологов, металлургов, металловедов и машиностроителей. Так усилиями советских людей была ликвидирована фанатически оберегаемая США ее монополия на ядерное оружие.

Однако, создавая ядерное оружие, советские ученые, следуя ленинской миролюбивой политике, тут же стали работать над использованием атомной энергии в мирных целях, над созданием атомных энергетических установок, атомных электростанций (АЭС). И такая АЭС была сооружена в СССР, что положило начало победному шествию ядерной энергетики по многим странам мира. Началось же оно в Обнинске (в 105 км от Москвы), где 27 июня 1954 г. в московскую энергосеть выдала электрическую энергию первая в мире АЭС. Ее пуску предшествовали огромный комплекс исследовательских работ, решение очень большого числа физических и технических задач, которые способствовали успешному созданию и бесперебойной и безопасной работе первенца АЭС.

Одной из важных задач, которые стояли перед физиками и конструкторами, было создание надежного и в то же время простого по конструкции тепловыделяющего элемента (твэла). Был создан твэл типа труба в трубе, в зазоре между которыми циркулировала охлаждающая вода. Решался вопрос, на каком уране – природном или обогащенном изотопом ^{235}U – будет развиваться ядерная энергетика. Одним из главных аргументов в пользу применения природного урана являлась возможность экономичного осуществления высокого воспроизводства вторичного ядерного топлива в том же реакторе – плутония. В то же время использование обогащенного урана позволяло повысить температуру теплоносителя, поднять энергонапряженность реактора, повысить прочностные характеристики применяемых материалов, сохранить сравнительно небольшие размеры реактора.

Эксплуатация твэлов для данного типа реактора позволяла получить плотность потока нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$ при тепловых нагрузках $1{,}5 \cdot 10^{6}$ $ккал \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$.

Успешная эксплуатация первой в мире АЭС позволила развить технические идеи, заложенные в ней, при строительстве Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова. Небольшая Обнинская АЭС мощностью 5 МВт ознаменовала новую эру в технике, в энергетике – получение электрического тока за счет энергии, образующейся при делении ядер урана. Эта АЭС, как первопроходец, открыла широкую дорогу большой ядерной энергетике. Опыт эксплуатации ядерно-энергетической установки Обнинской АЭС и проведенные на ней многочисленные экспериментальные работы позволили решить многие задачи по дальнейшему совершенствованию схем будущих АЭС и улучшению технико-экономических показателей.

За первые 20 лет существования АЭС ее посетили более 60 000 человек из разных стран мира, в том числе 2200 делегаций видных общественных, государственных и научных деятелей многих стран мира. Политические и государственные деятели полностью оценили значение появления нового источника энергии, используемого в мирных целях. Среди виднейших государственных деятелей из зарубежных стран на Обнинской АЭС побывали: Хо-Шин-Мин (ДРВ), Джавахарлал Неру, Индира Ганди (Индия), Пальмиро Тольятти (Италия), В. Ульбрихт, О. Гротеволь (ГДР), И. Броз Тито (СФРЮ); среди крупнейших ученых: Х. Баба (Индия), Ф. Перрен (Франция), Г. Сиборг (США), Льюис (Канада) и др.

За период с 1954 г. ядерная энергетика в Советском Союзе и в ряде других стран выросла, возмужала и создала условия для широкого промышленного использования энергии атома в производстве электрической энергии. Во всем мире на конец 1981 г. введено более 270 АЭС (блоков) установленной мощностью около 160 млн. кВт.

Ядерная энергетика ныне вошла в жизнь многих народов. Вот почему трудно переоценить значение пуска первой в мире АЭС. Простое перечисление 23 стран, где получение электрической энергии с помощью АЭС встало на промышленный путь (прежде всего СССР, США, Канада, Великобритания, Франция, Италия, ФРГ, Нидерланды, Бельгия, Швейцария, ЧССР, ГДР, НРБ, ВНР, Япония, а также Аргентина, Южная Корея и другие) показывает, как быстро ядерная энергетика завоевала доверие, стала необходимой при производстве электрической энергии.

Ни одна отрасль техники не развивалась так быстро, как ядерная энергетика. Понадобилось 100 лет, чтобы на обычных электростанциях был достигнут такой уровень инженерной техники и эксплуатации, какого достигла уже в 1975 г. ядерная энергетика.

По-разному представляют себе ученые, экономисты, руководители фирм и ведомств развитие ядерной энергетики, но в одном они сходятся, а именно в том, что ядерная энергетика будет развиваться и в недалеком будущем станет одним из основных источников получения энергии, в том числе электрической энергии. По прогнозам советских и зарубежных ученых доля мировой выработки энергии на АЭС к 2000 г. достигнет 25–30 и даже 40% общей выработки электрической энергии в мире.

Такому росту ядерной энергетики способствует ряд обстоятельств:

уменьшение природных запасов органического топлива (газа, нефти, а во многих экономических районах мира – и угля), повышенная сернистость, зольность этих видов топлива, резкое удорожание и сложность их добычи и т.д. Все это факторы объективные, с которыми нельзя не считаться, тем более что в настоящее время и по крайней мере до 2000–2050 гг. ядерная энергетика является единственной альтернативой всем остальным новым источникам энергии.

В некоторых странах мира уже ощущается нехватка органического топлива, и она тем ощутимее, чем выше промышленный потенциал страны. Потребление топлива за последнее десятилетие возросло в несколько раз по сравнению с прошлыми периодами и имеет тенденцию еще большего роста. Так, если с 1900 по 1970 г. человечество израсходовало около 250 млрд. т условного топлива, то за 30 лет с 1970 по 2000 г. расход всех видов топлива, по некоторым прогнозам, должен возрасти до 450 млрд. т. В ряде европейских стран природные запасы топлива уже находятся на грани их исчерпания. В Советском Союзе по сравнению со многими другими странами положение значительно лучше. Наша страна богата природными запасами топлива и еще далеко не исчерпанными гидроэнергоресурсами. Однако и наше будущее развитие энергетики тесно связано с развитием ядерной энергетики, особенно в европейской части СССР.

Рост потребления энергии приводит к тому, что все большее число развитых стран начинает зависеть от импорта энергоресурсов. Полагать, что все природные ресурсы в мире находятся на грани истощения, преждевременно. Известно, что всегда появлялись новые методы и способы добычи и использования полезных ископаемых. В то же время рост потребления всех видов топлива заставляет искать новые пути обеспечения человечества всеми видами топлива, и, конечно, человечеству в конце концов удастся найти новые высокоэффективные методы получения энергии за счет использования других источников энергии, ныне слабо используемых.

Однако очевиден непреложный закон природы – исчерпаемость запасов всех видов ископаемого топлива. И, что еще важнее, в силу вступает закон невозобновимости нефти и угля. Ведь уголь представляет собой органическое топливо, которое образовывалось в течение примерно 500 млн. лет. Мы же расходуем этот природный дар настолько быстро, что огромные запасы его в недрах земли быстро оскудевают, истощаются. Казалось бы, наступает безвыходное положение.

Но, как это постоянно бывало в жизни человечества, выход был найден. Новый, могучий источник энергии, заложенный в ядрах тяжелых атомов – урана, плутония, позволит возместить недостаток органического топлива. Впервые за все время своего существования человек сумел найти новый источник энергии, который по своим энергетическим возможностям превосходит все ранее найденные и используемые виды энергии.

Появление первой АЭС произвело в мире очень сильное впечатление. Не удивительно, что это событие большой исторической важности, исключительное по своим последствиям, привело к ничем не сдерживаемому оптимизму. Многим уже казалось, что теперь, при появлении нового источника энергии, будут решены все проблемы, что он принесет с собой все, о чем только мечтало человечество. Но у всякой ме-

дали есть оборотная сторона, и кроме действительно великолепных и исключительных по своим энергетическим возможностям, по удобству эксплуатации (например, отсутствие необходимости транспортирования огромных масс угля) качеств ядерная энергетика имеет и негативные стороны.

Известно, что ядерная энергия – потенциально наиболее опасный вид получения электрической энергии. Опасный, если иметь в виду возможное радиоактивное загрязнение окружающей среды в случае аварии реактора, расплавления активной зоны реактора, его твэлов, начиненных ураном или плутонием. Радиоактивное выпадание при аварии ядерного реактора может принести, конечно, неисчислимые потери, поэтому средства против таких аварий приобретают исключительное значение. Вот почему ученые и конструкторы, создающие оборудование АЭС, ядерных реакторов, делают буквально все необходимое для предотвращения аварий и тем более губительных последствий таких аварий. Ни один объект, ни одна техническая установка в мире не строились и не строятся с такой степенью надежности и безопасности, как ядерные реакторы, атомные электростанции.

Как известно, одно из преимуществ ядерной энергии – ее концентрация в очень малом объеме. Например, для электростанции мощностью 1 млн. кВт требуется в год примерно 48 000 железнодорожных вагонов угля и только два железнодорожных вагона уранового топлива, т.е. соотношение массы угля и массы урана, необходимых для выработки одинакового количества электроэнергии, составляет 24 000 : 1.

АЭС мощностью 1 млн. кВт экономит 2,4 млн. т угля в год. А какой труд, какая масса людей, какое множество механизмов, железнодорожных вагонов требуется при добыче этих 2,4 млн. т угля, при выдаче их "на гора" и при подаче угля к топкам электрических станций, сжигающих уголь.

Конечно, из всех других "альтернативных" видов энергии солнечная энергия в силу своей принципиальной неисчерпаемости наиболее привлекательная, безопасная и наиболее "чистая". Но повсеместное использование ее в крупных масштабах, учитывая уровень наших современных знаний, весьма проблематично.

Солнечная энергия по мере создания дешевых устройств трансформации сможет в энергетическом балансе южных районов, в частности в наших южных республиках, сыграть примерно такую же роль, как, скажем, гидроэлектростанция в средней полосе СССР, т.е. обеспечить несколько процентов всей получаемой энергии. Но малая средняя мощность дозы солнечного излучения на земной поверхности не позволяет рассчитывать на реализацию экономически оправданных крупных энергоустройств.

Еще меньше можно рассчитывать на искусственный фотосинтез, который дает пока 0,005%-ное использование солнечной энергии. Можно, конечно, надеяться на возможность увеличения "КПД", но все равно он будет очень и очень невысок, поэтому фотосинтез мало пригоден для крупномасштабного применения.

Не рассматривая все так называемые альтернативные источники энергии, можно сказать, что их использование закономерно, они надежны и бе-

зопасны. Известно, что в мире давно используются сила ветра, геотермальная энергия, энергетическая мощность морских приливов и отливов, но все это в сравнительно ограниченных масштабах. Их удельный вес в электроэнергетике незначителен и таким, по-видимому, останется, хотя их использование, несомненно, увеличится. Вот почему будущее связано с развитием ядерной энергетики. Другой альтернативы нет. Конечно, использование ядерной энергии в будущем будет происходить не только по проторенным дорогам, которые человечество нашло и по которым мы идем сегодня. Во всю ширь и мощь развернутся работы по управляемому термоядерному синтезу, могут появиться новые способы использования ядерной энергии, такие, как прямое, непосредственное преобразование ядерной энергии в электрическую (термоэмиссионное, термоэлектрическое, магнитогидродинамическое), в крупных, промышленных масштабах будут использоваться новые способы и методы синтеза легких элементов с применением лазеров и т.д.

Но в настоящее время единственной и надежной альтернативой, по крайней мере до 2000–2050 гг., является только ядерная энергетика, основанная на делении ядер тяжелых элементов и синтезе ядер легких элементов, т.е. опять-таки на использовании нейтрона – этой чудесной элементарной частицы, открытой в 1932 г.

В этой связи нельзя не учитывать долговременный потенциал энергии деления ядра, являющийся надежным источником энергии. По существующим прогнозам к 1985 г. ядерная энергия будет составлять более 5% всего мирового баланса первичной энергии и с ее помощью в мире будет производится около 17% электрической энергии.

Следует указать, что уже в 1981 г. в ряде ведущих стран мира (социалистических и капиталистических) производство ядерной энергии на АЭС составило 13–14% всего производства электроэнергии в данной стране, в таких странах, как Бельгия, НРБ, Швейцария, Швеция, эта доля достигла 25–35%, а во Франции она составляет более 40%. К концу 1981 г. в 22 государствах мира находилось в эксплуатации 270 ядерных энергетических установок, на которых вырабатывалось более 8% мировой электроэнергии.

Очень большие успехи в развитии ядерной энергетики были достигнуты в Советском Союзе к XXVI съезду КПСС (февраль 1981 г.).

В настоящий период ядерная энергетика СССР развивается в основном с реакторами на медленных нейтронах двух видов – уран-графитовыми канального типа кипящими (РБМК) и водо-водяного типа под давлением (ВВЭР). Развитие ядерной энергетики идет также по линии реакторов на быстрых нейтронах – генеральное направление развития ядерной энергетики СССР.

После пуска первой в мире АЭС, а затем АЭС в Сибири, на Урале, в 30 км от Свердловска, был сдан в эксплуатацию в 1964 г. первый блок с реактором уран-графитового канального типа электрической мощностью 100 МВт, а в 1967 г. был пущен второй блок на 200 МВт.

Под Ленинградом в 1973 г. был осуществлен пуск первого блока с реактором РБМК электрической мощностью 1000 МВт. В конце 1975 г. вошел в строй второй блок также мощностью 1000 МВт, в 1979 г. – третий блок и в 1981 г. – четвертый блок. Таким образом, общая электрическая

мощность Ленинградской АЭС им. В.И. Ленина достигла 4000 МВт, т.е. она стала одной из крупнейших в мире.

На Украине, недалеко от Киева, построена Чернобыльская АЭС (пуск первого блока состоялся в 1977 г., а второго – в 1978 г.) с реакторами РБМК. В 1981 г. вошел в строй третий блок и общая мощность Чернобыльской АЭС составила 3000 МВт. Строительство следующих блоков этой АЭС продолжается.

В РСФСР введена в строй Курская АЭС, где первый блок с реакторами РБМК на 1000 МВт дал энергию в 1977 г., а второй – в 1979 г. Строительство следующих блоков ведется ускоренными темпами.

Идет строительство Смоленской АЭС; пуск первого блока с реактором РБМК состоится в конце 1982 г.

В Литовской ССР строится крупнейшая в СССР Игналинская АЭС с несколькими реакторами РБМК электрической мощностью по 1500 МВт каждый. Пуск первого блока намечен на середину одиннадцатой пятилетки.

На далеком севере в Билибинско-Чаунском горнопромышленном районе в 1974 г. вошла в строй атомная электротеплоцентраль с реакторами уран-графитового типа. Эта АТЭЦ обеспечивает электроэнергией и теплом прилежащий район.

Недалеко от Воронежа построена крупная АЭС с несколькими реакторами ВВЭР. В 1964 г. на Нововоронежской АЭС был пущен первый блок электрической мощностью 210 МВт, в 1969 г. – второй блок мощностью 365 МВт, в 1971 г. – третий блок на 440 МВт, в 1972 г. – четвертый блок на 440 МВт, а в 1980 г. был сдан в эксплуатацию пятый блок на 1000 МВт. Общая мощность Нововоронежской АЭС составила 2455 МВт.

В Армении построена в 1976 г. и работает АЭС с двумя реакторами ВВЭР общей мощностью 810 МВт.

На Кольском п-ве, на северной окраине европейской части СССР, в 1973–1974 гг. сооружена АЭС с двумя реакторами ВВЭР общей электрической мощностью 880 МВт. Третий блок мощностью 440 МВт пущен в 1981 г. Строительство этой АЭС продолжается.

На Украине в районе Ровно в 1980 г. пущен первый блок с реактором ВВЭР мощностью 440 МВт. Второй блок также на 440 МВт был сдан в 1981 г. Строительство следующих блоков, но имеющих мощность уже по 1000 МВт, продолжается.

В Ульяновской области в Димитровграде в 1965 г. была построена опытная АЭС с реактором на медленных нейтронах водо-водяного типа кипящими с одноконтурной системой мощностью 70 МВт. Однако этот тип реактора по ряду причин не получил распространения в энергетической промышленности СССР.

В 1969 г. в Научно-исследовательском институте атомных реакторов им. В.И. Ленина в Димитровграде была пущена первая в СССР АЭС электрической мощностью 12 МВт с реактором на быстрых нейтронах БОР-60.

В 1973 г. в Закаспии (Казахстан) в Шевченко дала электроэнергию крупная АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-350. Эта АЭС двухцелевого назначения: для производства электроэнергии (150 МВт) и для опреснения 120 000 т в сутки соленой воды Каспийского моря.

В 1980 г. на Урале в качестве третьего блока Белоярской АЭС им.

И.В. Курчатова была сдана в эксплуатацию АЭС с реактором на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт. Эта станция является в настоящее время крупнейшей в мире АЭС подобного типа.

В создании и эксплуатации АЭС с реакторами на быстрых нейтронах Советский Союз занимает ведущее место в мире. СССР – единственная страна в мире, где действуют три АЭС подобного типа. Готовится сооружение АЭС с реакторами на быстрых нейтронах мощностью 800 МВт. Большие работы в этом направлении ведутся и в Великобритании, где была пущена такая АЭС на 250 МВт, и особенно во Франции. Во Франции в конце 1973 г. была сдана в эксплуатацию АЭС с реактором на быстрых нейтронах "Феникс" электрической мощностью 250 МВт, строится новая крупнейшая АЭС с реактором на быстрых нейтронах "Супер-Феникс" на 1200 МВт. Работа над АЭС с реакторами на быстрых нейтронах ведется также в ФРГ, Японии и некоторых других странах.

СССР одним из первых в мире приступил к сооружению двух промышленных атомных станций теплоснабжения (АСТ), атомных котельных. Одна из них строится в районе Горького, вторая – в районе Воронежа. Пуск этих АСТ определен в одиннадцатой пятилетке. Тепловая мощность каждой АСТ составляет 500 МВт.

Для обеспечения их полной безопасности принята трехконтурная система, давление в первом контуре определено в 16 ат, во втором 12 ат, в третьем сетевом контуре у потребителя тепла 16 ат. Пуск этих АСТ позволит получить эксплуатационный опыт для дальнейшего строительства и совершенствования атомных котельных этого типа.

Наибольшее развитие за рубежом ядерная энергетика, как и следовало ожидать, получила в Европе и Америке (в США, Канаде и Аргентине), а на Европу из 23 стран, построивших АЭС, приходится 13 стран.

В Советском Союзе ядерная энергетика, как уже указывалось, заняла прочные позиции, но строительство АЭС получило особенно широкое развитие в последние годы, поскольку для крупного строительства требовалось провести в масштабе всей страны необходимую организационно-техническую подготовку, реконструкцию действующих предприятий, создать атомно-энергетические мощности (заводы типа "Атоммаш"), осуществить международную кооперацию и интеграцию усилий в системе стран–участниц СЭВ.

В десятой пятилетке (1976–1980) ядерная энергетика в нашей стране успешно развивалась, достигла больших успехов, что позволило сэкономить органические виды топлива для других производственных целей.

Принятые XXVI съездом КПСС "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года" определили также и направления развития ядерной физики и ядерной энергетики. В разделе "Развитие науки и ускорение технического прогресса" указано: "... В области естественных и технических наук сосредоточить усилия на решении следующих важнейших проблем:

... развитие физики элементарных частиц и атомного ядра;

развитие ядерной и создание основ термоядерной энергетики, совершенствование методов преобразования и передачи энергии ..."*.

*Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981, с. 146.

В разделе "Развитие промышленности" записано: "... Улучшать использование топливно-энергетических ресурсов, сократить потребление нефти и нефтепродуктов в качестве котельно-печного топлива, опережающими темпами развивать атомную энергетику ...

В электроэнергетике довести выработку электроэнергии в 1985 году до 1500–1600 млрд. киловатт-часов, в том числе на атомных электростанциях до 220–225 млрд. киловатт-часов и на гидроэлектростанциях до 230–235 млрд. киловатт-часов. Обеспечить прирост производства электроэнергии в европейской части СССР в основном на атомных и гидроэлектростанциях.

Ввести в действие на атомных электростанциях 24–25 млн. киловатт новых мощностей. Продолжить работы по освоению реакторов на быстрых нейтронах и использование ядерного топлива для выработки теплоэнергии ...

В энергетическом машиностроении обеспечить значительное наращивание производства оборудования для атомных, гидро- и тепловых электростанций, в том числе атомных реакторов мощностью 1–1,5 млн. киловатт...

Изготовить и поставить первые атомные реакторы для теплоснабжения крупных городов*.

В разделе "Размещение производительных сил указано: "Ввести в действие мощности на Смоленской, Калининской, Курской АЭС.

... В Украинской ССР ... довести в 1985 году выработку электроэнергии до 280–290 млрд. киловатт-часов, получить основной ее прирост за счет атомных электростанций. Ввести в действие мощности на Южно-Украинской, Хмельницкой, Запорожской, Крымской, Чернобыльской, Ровенской АЭС и Одесской атомной ТЭЦ ...

... В Литовской ССР... обеспечить ввод в действие первой очереди Игналинской АЭС..."**.

Планы развития ядерной энергетики на одиннадцатую пятилетку являются весьма впечатляющими. Поражает не только мощность вводимых в строй и строящихся АЭС в СССР в 1981–1985 гг., но и масштаб грандиозных работ по ядерной энергетике, которые "видятся" в двенадцатой пятилетке и просматриваются до 2000 г.

Оценку роли ядерной энергии в топливно-энергетическом комплексе определяют несколько принципиальных положений.

Во-первых, основной экономический эффект от замещения органического топлива ядерным народное хозяйство получает не только непосредственно на АЭС, в электроэнергетике, но и в сфере добычи и доставки органического топлива. Таким образом, эффективность внедрения ядерного топлива определяется на межотраслевой основе, а не исходя лишь из экономичности собственно АЭС. Отсюда вытекает необходимость совместного рассмотрения вопросов экономики АЭС (и их топливного цикла) и тепловых электрических станций (и их топливной базы).

Во-вторых, капиталовложения в АЭС могут в 1,5 раза и более превышать капиталовложения в тепловые электростанции (ТЭС). Несмотря на

---

*Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981, с. 147–155.

**Там же, с. 186–192.

это, АЭС остаются экономически выгодными вследствие существенно более низких капиталовложений в предприятия топливного цикла по сравнению с капиталовложениями на расширение добычи и средств доставки твердого органического топлива. Вместе с тем технология получения ядерного топлива и работа предприятий топливного цикла в инженерном отношении неизмеримо сложнее добычи и доставки органического топлива. В связи с этим возникает необходимость более высокого уровня технической и промышленной готовности в сфере строительства и эксплуатации АЭС и подготовки кадров для них.

В-третьих, в структуре себестоимости электроэнергии на АЭС заработная плата составляет несколько процентов. Вместе с тем внедрение ядерного топлива влечет за собой резкое сокращение трудовых затрат на добычу и доставку органического топлива и существенное повышение производительности труда на единицу производимой энергии в системе электростанция – топливоснабжение. Поэтому трудовые затраты на производство энергии следует рассматривать с учетом топливно-энергетического комплекса в целом.

Развитие ядерной энергетики приобрело широкие масштабы. Суммарная мощность АЭС в СССР на конец 1981 г. составила 16 млн. кВт, доля вырабатываемой на них электроэнергии – более 6%.

В настоящее время строительство АЭС ведется более чем на 20 площадках с постепенным вытеснением электростанций на органическом топливе в районах Северо-Запада, Запада, Центра, Юга европейской части страны. Строятся АЭС в районах Кавказа, Поволжья, Урала. Наращивание установленной мощности АЭС в одиннадцатой пятилетке будет происходить за счет преимущественного ввода энергоблоков единичной мощностью 1000 МВт с реакторами РБМК-1000 и ВВЭР-1000. В настоящее время накоплен большой опыт эксплуатации таких блоков на Ленинградской, Курской и Чернобыльской АЭС и продолжается дальнейшее строительство АЭС с доведением числа блоков на них до четырех–шести.

В одиннадцатой пятилетке, как уже указывалось, начнут работать первые блоки мощностью по 1500 МВт на Игналинской АЭС. В перспективе такие блоки будут сооружены также на Костромской и Смоленской АЭС.

Основной экономический эффект от внедрения АЭС народное хозяйство получает вне электроэнергетики – за счет сокращения масштаба угледобывающей промышленности, уменьшения капиталовложений и трудовых затрат в сфере добычи угля и сокращения перевозок угля на железнодорожном транспорте. В целом строительство АЭС выгодно и экономически, и по трудовым затратам. Этот вывод вытекает из следующих факторов: особенностей размещения электростанций по территории СССР, сокращения потребления топливно-энергетических ресурсов в нашей стране и, конечно, высокой калорийности ядерного топлива. Затраты на расширение топливной базы и развитие транспорта при развитии энергетики на органическом топливе сопоставимы по масштабу, а при дальней транспортировке превышают затраты на строительство собственно ТЭС. Поэтому суммарные народнохозяйственные затраты на создание новых мощных ТЭС и развитие топливной базы и транспорта очень велики.

При прогнозируемом возрастании уровня капиталовложений на добычу и доставку твердого топлива для потребителей (в европейской части СССР – до 40 руб., а в далекой перспективе – до 80 руб. на 1 т условного топлива) более высокая капиталоемкость АЭС по сравнению с ТЭС (300–350 руб. на 1 т условного топлива) не выводит их за пределы экономической конкурентоспособности при оценке на межотраслевой основе. Анализ показывает, что этот вывод справедлив и в долгосрочной перспективе. Следовательно, выгоднее осуществлять капиталовложения в строительство АЭС, добычу урана и атомное машиностроение, чем в развитие добычи угля и его транспортировки.

Основным преимуществом ядерной энергетики по сравнению с традиционной является, как уже отмечалось, высокая калорийность ядерного топлива. В расчете на единицу массы она примерно в 2 млн. раз выше калорийности органического топлива. Объем потребляемого и перерабатываемого в топливном цикле ядерного топлива в десятки тысяч раз меньше объема органического топлива, добываемого, транспортируемого и сжигаемого при тех же энергетических потребностях.

Ядерная энергетика не только экономит огромное количество органического топлива, но и обеспечивает наивысшую производительность труда на единицу производимой и потребляемой народным хозяйством энергии.

Важное значение имеет использование ядерной энергии не только для получения электрической энергии, но и в теплофикационных целях – для снабжения теплом промышленных и жилых зданий. Строятся АСТ в Горьком и Воронеже, начато строительство Одесской АТЭЦ с реактором ВВЭР-1000, в перспективе намечается сооружение еще нескольких АТЭЦ подобного типа.

Для теплофикации используется также нерегулируемый отбор пара на АЭС. В настоящее время теплофикационный отбор пара для теплоснабжения осуществляется на Белоярской, Курской, Чернобыльской, Нововоронежской, Кольской и Армянской АЭС. Намечено соорудить теплофикационную установку повышенной производительности на Ростовской АЭС. Примером решения проблемы тепло- и электроснабжения служит эксплуатация на Чукотке Билибинской АТЭЦ (1974–1976), состоящей из четырех блоков с уран-графитовыми реакторами канального типа мощностью по 12 МВт каждый и теплофикационным отбором общей мощностью 100 Гкал/ч.

Открытие нейтрона и использование его чудесных свойств привело в конечном счете к широкому развитию ядерной энергетики. Электростанции, использующие внутриядерную энергию с помощью уникальных свойств нейтронов, снабжают во многих районах мира людей теплом и энергией. Прошло всего только 50 лет после открытия нейтрона, а как много сделано и как много еще будет сделано в интересах мира и прогресса!

К несчастью, нейтрон широко заявил о себе диким разрушением городов Хиросима и Нагасаки, бессмысленным уничтожением огромных масс людей американскими бомбами. Появлению в наше время нового, страшного по своим последствиям для человеческих жизней нейтронного ору-

жия все прогрессивное и свободолюбивое человечество должно противопоставить свое решительное, безоговорочное, мощное "нет".

Тут уж поистине нельзя не процитировать бытующую в капиталистическом мире поговорку: "Военные платят – ученые делают. Военные применяют – ученые хватаются за голову". Однако мало лишь хвататься за голову, нужны широкие организованные протесты мировой общественности против воинствующей политики агрессивных правящих кругов капиталистических стран мира. Тогда мир на Земле победит и нейтрон будет служить человечеству в мирных целях, только в целях созидания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров А.П.** Генеральный доклад на МИРЭК-VII. – Атомная энергия, 1968, т. 25, вып. 4, с. 356–363.
2. **Петросьянц А.М., Доллежаль Н.А., Александров А.П. и др.** Перспективы развития ядерной энергетики в СССР. – Атомная энергия, 1971, т. 31, вып. 4, с. 316–319.
3. **Денисов В.П., Марков Ю.В., Сидоренко В.А., Скворцов С.А. и др.** Развитие АЭС с водо-водяными реакторами в Советском Союзе. – Атомная энергия, 1971, т. 31, вып. 4, с. 323–333.
4. **Эксплуатация** реакторных установок Нововоронежской АЭС. М.: Атомиздат, 1972.
5. **Доллежаль Н.А.** Ядерная энергетика и научно-технические задачи ее развития. – Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 3, с. 203–212.
6. **Абрамов В.М., Бондаренко А.В., Ваймугин А.А. и др.** Билибинская атомная электростанция. – Атомная энергия, 1973, т. 35, вып. 5, с. 299.
7. **Воронин Л.М., Сидоренко В.А., Скворцов С.А.** Нововоронежской АЭС 10 лет. – Теплоэнергетика, 1974, № 12, с. 7–11.
8. **Иваненко Д.Д.** Как создавалась модель атомного ядра. – В кн.: Нейтрон. Предыстория. Открытие. Последствия. М.: Наука, 1975, с. 9–22.
9. **Игонин В.В.** Атом в СССР. Саратов: Изд. Саратовского ун-та, 1975.
10. **Петросьянц А.М.** Атомная энергетика. М.: Наука, 1976.
11. **Блохинцев Д.И.** Рождение мирного атома. М.: Атомиздат, 1977.
12. **Емельянов И.Я.** О развитии ядерной энергетики. – Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1977, № 5, с. 17–32.
13. **Казачковский О.Д., Мешков А.Г., Митенков Ф.М. и др.** Программа и состояние работ по быстрым реакторам в СССР. – Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 5, с. 343–351.
14. **Доллежаль Н.А.** Рождение атомной энергетики. – Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 1, с. 14–17.
15. **Александров А.П.** Атомная энергетика и научно-технический прогресс. М.: Наука, 1978.
16. **Жежерун И.Ф.** Строительство и пуск первого в СССР атомного реактора. М.: Атомиздат, 1978.
17. **Петросьянц А.М.** Проблемы атомной науки и техники. М.: Атомиздат, 1979.
18. **Синев Н.М., Батуров Б.Б.** Экономика атомной энергетики. М.: Атомиздат, 1980.
19. **Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я.** Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
20. **Петросьянц А.М., Батуров Б.Б.** Роль атомной энергии в энергетическом комплексе страны. – Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 6, с. 371–373.
21. **Петросьянц А.М.** Ядерная энергетика. 2-е изд. М.: Наука, 1981.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОТКРЫТИЮ НЕЙТРОНА – ПОЛВЕКА

Б.М. Кедров

Бериллий и его проблемы. Когда мы сегодня оглядываемся назад на полувековую историю ядерной физики, протекшую с момента открытия нейтрона в начале 1932 г., перед нашими глазами встает также предыстория этого открытия – ближайшая и более отдаленная. Эта предыстория связана с бериллием, точнее, казалось бы, с мало интересным вопросом о формуле его окиси и о его атомном весе*. Позднее отсюда возникла проблема определения места бериллия в периодической системе элементов и затем вопрос о заряде его атомного ядра.

Как это нередко случается в науке, вопрос, сначала казавшийся незначительным, вдруг по тем или иным причинам выдвигается на передний край науки и приобретает порой решающее значение для развития всей науки. Так именно случилось и с изучением свойств бериллия. Еще в первой половине XIX в. для его окиси (в соответствии с общей установкой школы Берцелиуса) была принята глиноземная формула, что впоследствии означало признание трехвалентности бериллия. Это было сделано на основании сходства между окисями бериллия и алюминия. Против такого умозаключения выступил еще в 1842 г. И.В. Авдеев, который, исходя из результатов своих исследований, утверждал, что для окиси бериллия следует принять формулу магнезиальной окиси, т.е. окиси магния. Однако И.В. Авдеев не получил поддержки большинства ученых.

Но вот в 1869 г. Д.И. Менделеев открыл периодический закон, и первая же трудность, с которой он столкнулся, была связана с бериллием. В то время, исходя из глиноземной формулы для его окиси (Be_2O_3), принимали атомный вес бериллия равным 14. Но это место в строившейся системе элементов к тому моменту уже твердо занял азот ($N = 14$), да и соседние места также были уже заполнены. К тому же нельзя было поместить металл бериллий-14 между двумя неметаллами – углеродом-12 и кислородом-16. Место же в ряду магния между литием-7 и бором-11 было свободным. Д.И. Менделеев пошел на смелый шаг: он изменил формулу окиси бериллия с Be_2O_3 на BeO (как предлагал И.В. Авдеев), иначе говоря, признал бериллий двухвалентным, откуда следовало, что атомный вес бериллия равен 9,3. Это изменение стало вскоре одним из методологических принципов работы Д.И. Менделеева; оно сыграло впоследствии огромную роль в разработке периодического закона, в частности позволило удвоить атомный вес урана, установив его равным 240. В результате уран

*В статье при изложении истории открытия нейтрона сохранен термин тех лет "атомный вес" – средний вес смеси изотопов.

как самый тяжелый элемент был помещен в конце всего периодического ряда элементов, в связи с чем встал вопрос: почему этот ряд обрывается на уране?

Добавим, что в 80-х годах XIX в. вновь разгорелся ожесточенный спор вокруг бериллия: шведские химики Нильсон и Петтерсон оспаривали его двухвалентность и, следовательно, равенство девяти его атомного веса, настаивая на том, что бериллий трехвалентен. Спор продолжался несколько лет, пока по совету чешского химика Б. Браунера шведские химики не определили плотность паров хлористого бериллия, в результате чего прочно утвердилось значение атомного веса бериллия 9.

В начале XX в. по положению бериллия между литием и бором (гелий был открыт еще в конце XIX в.) был установлен порядковый номер бериллия (по Мозли) и заряд ядра его атомов $Z = 4$ (по Бору – ван ден Бруку).

Почему же вопрос об атомном весе бериллия и его месте в периодической системе элементов позднее приобрел такое важное значение для ядерной физики? Установление $A = 9$ и $Z = 4$ для него давало еще раньше повод допустить, что ядро атома бериллия образовано двумя α-частицами и одним протоном (p^+), соединенным с электроном (e^-), который своим отрицательным зарядом нейтрализовал положительный заряд протона. Уже одно это должно было привлечь внимание специалистов, работающих в области ядерной физики, к бериллию. Действительно, сам Дж. Чадвик вспоминал 30 лет спустя после открытия им нейтрона, что случай с бериллием интересен по двум причинам: "Во-первых, бериллий не выделял протонов в процессе бомбардировки α-частицами; во-вторых, хотя это и неверно, было известно, что минерал берилл содержит необычное количество гелия, что позволяло предположить возможность распада ядер бериллия под действием космического излучения на две α-частицы и нейтрон.

Это вещество возбуждало во мне интерес на протяжении нескольких лет. Я обстреливал бериллий α- и β-частицами, воздействовал на него γ-излучением... Позднее... с Констеблем и Поллардом я снова исследовал бериллий, и в какой-то короткий, но волнующий миг мы подумали, что обнаружили признаки нейтрона. Но затем эти признаки исчезли. Я все еще бродил в темноте"*. Так вспоминал Чадвик о своих собственных, более ранних неудачных работах с бериллием, сделанных в конце 20-х годов. Далее он говорил: "Первое указание на нейтрон появилось в работе Г. Вебстера с γ-излучением, возбуждаемым в бериллии при облучении его α-частицами. О возможности возбуждения γ-излучения посредством бомбардировки легких элементов α-частицами я думал несколько лет. Попытку разработать ее предпринял Л. Бастингс, но его постигла неудача".

Тем временем В. Боте и Г. Беккер начали изучать тот же круг вопросов. Результаты их исследований, появившиеся в печати в середине 1930 г., свидетельствовали о том, что "α-лучи при столкновении с некоторыми легкими элементами вызывают слабое, но весьма проникающее γ-излуче-

*Воспоминания Дж. Чадвика, которые цитируются в этой статье, помещены в нашем сборнике на с. 6–10.

ние" (с. 140)*. Выяснилось, что самое мощное излучение обнаруживается у бериллия и что оно значительно превосходит по своей интенсивности излучения всех других легких элементов и их соединений. При введении между препаратом и счетчиком слоя свинца толщиной 1 см ослабление излучения было наименьшим опять-таки у бериллия. "Таким образом, новое излучение настолько жестко, что едва ли возможны сомнения в его происхождении из ядер облученных атомов. Обсуждение вопросов происхождения и связи обнаруженного излучения с такими свойствами атомного ядра, как атомный вес, расщепляемость и эффект упаковки, мы вынуждены оставить для более обстоятельной работы..." (с. 141).

Итак, обсуждение указанных вопросов Боте и Беккер отложили, хотя они не сомневались в физической природе наблюдаемого ими излучения, а именно в том, что оно является γ-излучением. Об этом свидетельствует уже само название их статьи: "Ядерное γ-излучение легких элементов". Но несомненная заслуга названных авторов состоит в том, что они обнаружили следующее: бериллиевое излучение резко выделяется из всего ряда излучений других легких элементов. Естественно возникал вопрос о причине подобного явления. Выяснению его причины, как вспоминает Чадвик, способствовали до некоторой степени работы уже упоминавшегося Вебстера, который установил, что излучение бериллия в направлении падения α-частиц более проникающее, чем излучение в обратном направлении: "Этот точно установленный факт взволновал меня: его можно было легко объяснить, лишь предполагая, что излучение состоит из частиц, судя по их проникающей силе, нейтральных. Уверенный в том, что и нейтральная частица должна производить хоть какую-нибудь ионизацию, я предложил Вебстеру пропустить излучение через камеру Вильсона. К нашему огорчению, ибо мы были убеждены, что речь идет о какой-то нейтральной частице, никаких следов не было обнаружено. Мы были озадачены и не знали, как увязать результаты наблюдений". Вскоре, в июне 1931 г., Чадвик решил снова взяться за исследования, но его приготовления (возможно, к счастью, как он сам заметил) были отложены в связи с чисто случайными обстоятельствами. "Возможно, к счастью" потому, что в этот момент готовились или уже даже развертывались решающие опыты, проведенные супругами Жолио-Кюри и давшие Чадвику необходимый экспериментальный материал для открытия нейтрона. Поэтому предпринимаемые в этом направлении лабораторные работы Чадвика вполне могли оказаться излишней тратой сил.

Добавим, что примерно тогда же Милликен в докладе, сделанном в Париже, сообщил о том, что на фотографиях космического излучения, полученных по методу Вильсона в сильном магнитном поле, наблюдаются треки, оставленные протонами и электронами и исходящие из одной точки. Но об этом явлении у Милликена не было еще достаточно точных сведений. Это могло свидетельствовать о распаде нейтрона, находящегося в космическом излучении, на протоны, электроны и нейтрино.

---

*Здесь и далее ссылки делаются на книгу **Нейтрон. Предыстория. Открытие. Последствия** : Сб. статей. М.: Наука, 1975.



Группа сотрудников Кавендишской лаборатории. В первом ряду слева направо: Дж. Радклиф, П. Л. Капица, Дж. Чадвик, Р. Лабенберг, Дж. Дж. Томсон, Э. Резерфорд, Ч. Вильсон, Ф. Астон, К. Эллис, П. Блэкетт, Дж. Кокрофт

Группа участников 1-й Всесоюзной конференции по теоретической физике (Харьковский физико-технический институт, 1929 г.). Слева у стола И. В. Обреимов (директор института), справа у стола П. Иордан. В первом ряду слева Д. Д. Иваненко, В. А. Фок, В. А. Амбарцумян и др. Справа в первом ряду группа теоретиков: Л. Д. Ландау, Г. А. Гамов, Л. Я. Штрум, Ю. А. Крутков, Я. И. Френкель. Во втором ряду слева В. Гейтлер





Группа сотрудников Харьковского физико-технического института во время приезда в Харьков П. Эренфеста. В первом ряду слева направо П. Эренфест, И. В. Обреимов (директор института), Т. А. Афанасьева-Эренфест, А. Ф. Иоффе и др. На полу сидят Д. Д. Иваненко и А. Н. Бриллиантов. Во втором ряду третий слева А. И. Лейпунский

Этторе Майорана



Лизе Мейтнер в год своего 80-летия (1958)

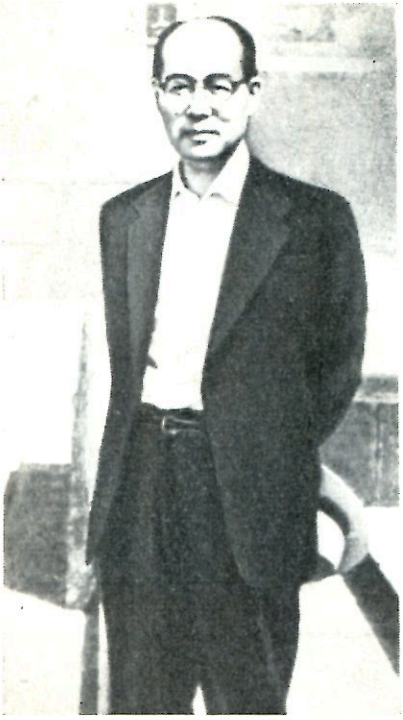




Отто Ган и Фриц Штрасман в Геттингене в день 88-летия О. Гана (8 марта 1967 г.)

Д. Д. Иваненко, П. А. М. Дирак и В. Гейзенберг. Дискуссия на Планковском юбилейном конгрессе (Берлин, 1958 г.)







С. Саката

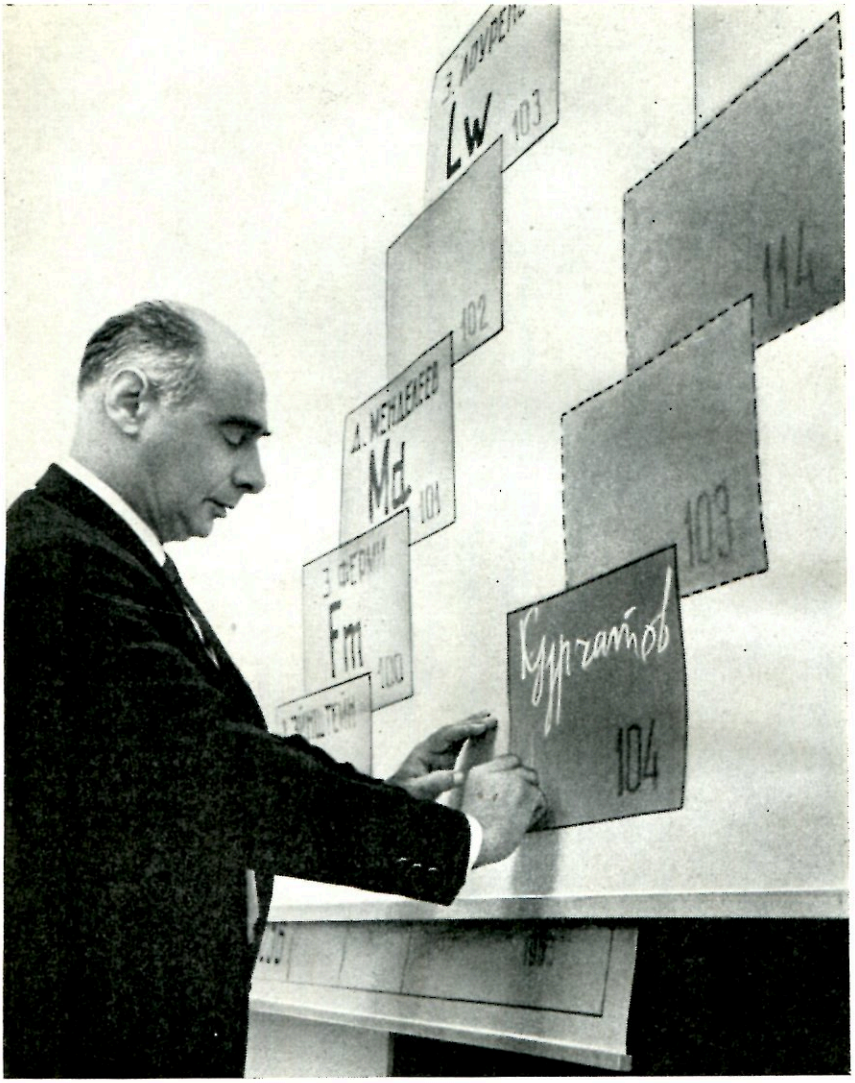
Хидеки Юкава у здания физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 1959 г.

Нильс Бор с сыном Оге Бором в МГУ им. М. В. Ломоносова, 1961 г.





Д. В. Скобельцын, 1958 г.



Г. Н. Флеров на заседании Ученого совета ОИЯИ впервые вписывает в периодическую таблицу Д. И. Менделеева название нового элемента — курчатовия



Г. Н. Флеров и К. А. Петржак на расширенной сессии Ученого совета, посвященной 40-летию открытия спонтанного деления



Делегация Франции во главе с министром промышленности и технического развития Ортоли, послом Франции в СССР Ж. Сейду, руководителем Комитета по использованию атомной энергии Франции А. Жиро у пульта управления Серпуховского ускорителя протонов на энергию $70 \cdot 10^9$ эВ. В центре А. М. Петросьянц

Б. М. Кедров в своем кабинете за работой



Открытие нейтрона. В этом открытии две стороны: первая, начальная – эмпирическая, вторая, заключительная и решающая – теоретическая. Первая связана с именами Ирен Кюри и Фредерика Жолио, вторая – с именем Джеймса Чадвика.

В январе 1932 г. Ж. Перрен доложил в Парижской Академии наук работу супругов Жолио-Кюри "Излучение протонов большой скорости водородсодержащими веществами под влиянием сильнопроникающих γ-лучей". В этой работе говорилось, что были изготовлены экраны из водородсодержащих веществ (парафина, воды, целлофана), и когда на них действовало γ-излучение, возбуждаемое α-излучением в бериллии и боре, появлялись быстрые протоны (ядра H). "Так как это дополнительное излучение наблюдалось только с экранами, состоящими из водородсодержащих веществ, то мы предположили, что дело идет о H-лучах. Эта гипотеза была подтверждена... опытами...". И далее: "Это заставляет отвергнуть гипотезу электромагнитного излучения и соответствует поведению H-лучей... Испускание H-лучей предполагает необычно сильное поглощение γ-лучей водородсодержащими веществами; проводимые сейчас опыты подтверждают справедливость этого заключения" (с. 142).

По поводу природы явления, которое они наблюдали, супруги Жолио-Кюри не выдвинули какой-либо определенной гипотезы, но продолжали считать бериллиевое излучение потоком фотонов, предполагая, что соответствующие фотоны могут сообщать протонам часть своей энергии с помощью процесса, аналогичного эффекту Комптона. "Объяснение этого явления затрудняется тем, что энергия фотонов, испускаемых бериллием и бором, может быть оценена лишь очень приблизительно" (с. 142). Единственное, что авторы считали бесспорным, – это то, что речь идет о "вторичных H-лучах". Эта работа датирована 11 января 1932 г.

Чадвик мог узнать об этой статье довольно скоро. Надо учесть время ее публикации в очередном выпуске тома 194 "Трудов Парижской Академии наук" и время доставки этого выпуска в Кембридж. Вот как вспоминает об этом Чадвик: "Однажды утром я прочел в "Comptes rendus" сообщение Ирен Кюри и Жолио о еще более удивительном свойстве излучения беррилия – о его способности выбивать протоны из веществ, содержащих водород, – свойстве, поистине поразительном. Через несколько минут ко мне пришел Фезер рассказать об этом сообщении, удивившем его так же, как и меня, а чуть позже в это утро я разговаривал с Резерфордом... Рассказав ему о наблюдении Кюри-Жолио и их истолковании своего наблюдения, я заметил на его лице растущее удивление; наконец, он воскликнул: "Я не верю этому!". Подобная вспыльчивость была не свойственна ему, и за все время моего продолжительного союза с ним я не припомню другого подобного случая. Я говорю об этом, чтобы подчеркнуть, насколько электризующим было воздействие сообщения Кюри-Жолио. Конечно, Резерфорд доверял их наблюдениям, но совсем другое дело – объяснение". Чадвик продолжает: "... мысли мои были, естественно, сосредоточены на нейтроне. Мне было ясно, что наблюдения Кюри-Жолио нельзя приписать эффекту Комптона, с исследованием которого мне не раз приходилось сталкиваться. Я был уверен, что здесь нечто новое и незнакомое. Нескольких дней напряженной работы оказалось достаточно,

чтобы убедиться в том, что эти странные эффекты обязаны своим происхождением нейтральной частице; мне удалось также измерить ее массу".

Свои воспоминания о поисках нейтрона Чадвик заканчивает указанием на то, что "всегда гораздо труднее сказать первое слово о предмете, каким бы очевидным он впоследствии ни оказался, чем последнее слово".

Так Чадвик подводит читателя к пониманию двух фаз научного открытия: эмпирической (сказано первое слово о предмете) и теоретической (последнее слово о нем). С этим мнением Чадвика вряд ли можно согласиться: явно из скромности, дабы не выпячивать свою собственную заслугу, состоявшую в теоретическом объяснении эмпирических наблюдений, сделанных другими учеными, он вообще готов поставить на второй план теоретическую фазу открытия. Действительное же открытие нейтрона состояло именно в правильном теоретическом объяснении ранее полученных опытных данных. Между получением сведений об опытах супругов Жолио-Кюри и датированием первой статьи Чадвика "Возможность существования нейтрона" (17 февраля 1932 г.) прошло всего несколько напряженных дней, и 17 февраля 1932 г. надо считать днем подлинного открытия нейтрона.

Повторяющиеся ситуации в истории науки. Эмпирия и теория. Прежде всего отметим, что точку зрения на соотношение эмпирической и теоретической фаз открытия, близкую к чадвиковской, высказал в том же 1932 г. В. Гейзенберг. Его первая статья "О строении атомных ядер" начинается так: "Опытами Кюри и Жолио при истолковании их Чадвиком установлено, что в строении ядер важную роль играет новая элементарная частица, нейтрон". Следовательно, Гейзенберг видит открытие нейтрона (установление его существования) в том, что дали опыты Кюри и Жолио, и считает, что Чадвику принадлежит лишь истолкование этих опытов. Между тем вся суть дела именно в этом истолковании. Вся история научного познания показывает, что решающий шаг в науке делает не тот, кто лишь наблюдает и эмпирически констатирует новое явление, а тот, кто проникает в его сущность и дает ему теоретическое объяснение. Достаточно вспомнить историю открытия клетки (в биологии), периодического закона (в химии), радиоактивности (в физике) и др. Во всех этих случаях революцию в естествознании вызывали не сами по себе наблюдение и фиксация нового, ранее не известного явления или предмета природы, а его теоретическое толкование. Другими словами, крупное революционизирующее открытие характеризовалось тем, что руки экспериментатора его подготовляли, а голова теоретически мыслящего ученого его совершала. Тут необходимы единство и взаимодействие рук и головы, эмпирического и теоретического. Как говорил М.В. Ломоносов, руки без очей слепы, очи без рук пусты.

Разберем несколько различных ситуаций. Р. Гук (XVII в.) наблюдал ячеистое строение растительных тканей, но не сделал отсюда теоретических выводов, не объяснил значение наблюденного им факта для понимания процессов жизнедеятельности организмов. Это было сделано только в 1838–1839 гг., когда была создана клеточная теория, а потому, по сути дела, только тогда и была открыта клетка.

Сложнее, но в сущности так же обстояло дело с открытием периоди-

ческого закона. До Д.И. Менделеева некоторые химики стали располагать элементы в последовательном порядке по атомной массе. В результате у них получались эмпирические таблицы, с внешней стороны похожие на те, которые позднее составил Д.И. Менделеев. Однако все они оставались до Д.И. Менделеева в рамках эмпирической фазы открытия и не понимали его теоретического смысла. Впервые раскрыл теоретическую основу эмпирически составленных таблиц только Д.И. Менделеев (1869): именно он пошел дальше эмпирической фазы и открыл периодический закон, о существовании которого до него никто не догадывался.

Сходным образом была открыта радиоактивность. А. Беккерель (1896) наблюдал это явление чисто эмпирически, а первое его теоретическое объяснение дали Э. Резерфорд и Ф. Содди (1902), доказав, что здесь имеет место спонтанный распад атомов, самопроизвольное превращение одних химических элементов в другие. Поэтому они-то, собственно говоря, и открыли радий в качестве "великого революционера" в науке.

Примеров такого рода история науки знает немало. К их числу относится и открытие нейтрона, где эмпирия и теория, наблюдение и объяснение были разделены во времени и пространстве. И только теоретическое объяснение нового явления, которое наблюдали ранее, явилось собственно научным открытием, решающим шагом в данной области науки. Для выяснения истории любого достаточно крупного открытия существенно, во-первых, кто, где и когда непосредственно подготовлял данное открытие, эмпирически наблюдал новое явление и установил факт, требующий своего объяснения, во-вторых, кто, где и когда дал правильное теоретическое объяснение новому факту и тем самым явился творцом и автором самого открытия по существу. Иногда решение той и другой задачи совмещается в одном лице. Так было в случае открытия эффекта Комптона (1923), искусственной радиоактивности супругами Жолио-Кюри (1934), явления ядерной изомерии у искусственно-радиоактивных элементов И.В. Курчатовым с сотрудниками (1936). В этих случаях теоретическое объяснение давали те, кто эмпирически наблюдал новое явление.

В истории открытия нейтронов дело обстояло иначе: сначала эмпирически наблюдались новые излучения и их физические эффекты, которые не получили, однако, правильного теоретического истолкования. Боте и Беккер нашли новое, чрезвычайно жесткое излучение, возникающее при воздействии α-частиц на ядра легких элементов. Они приписали ему, естественно, электромагнитный характер, полагая, что имеют дело с образованием фотонов высокой энергии. Супруги Жолио-Кюри стали изучать действие этого излучения на водород, содержащийся в различных веществах, при этом они обнаружили особого рода эффект, состоявший в образовании большого числа быстрых протонов. Жолио-Кюри объяснили наблюдавшееся ими новое явление тем, что здесь имеет место особый случай эффекта Комптона: фотон, обладающий громадной энергией, рассеивает протоны (выбивает их из водорода) каким-то совершенно необычным образом, не согласующимся с принятыми до тех пор теоретическими положениями.

В действительности Жолио-Кюри наблюдали излучение нейтронов и их действие на атомы водорода (выбивание из них протонов и сообщение им

высокой энергии). Но они оставались целиком в плену категорий господствовавшей еще в то время электромагнитной концепции, а поэтому (подобно Боте и Беккеру) толковали и наблюдаемое ими излучение и найденный ими новый физический эффект как явления электромагнитной природы. Вот почему они не смогли довести до конца подготовленное ими открытие, вот почему они остановились на его эмпирической фазе. Они подошли вплотную к двери, ведущей к разгадке новой тайны природы, они ощупали эту дверь и даже постучались в нее, но открыть ее не смогли, так как дверь эта открывалась не "к себе" (т.е. не в сторону электромагнитной концепции), а "от себя" (т.е. в сторону категорического отказа от этой концепции).

Судьба идей Жолио-Кюри в этом отношении аналогична судьбе идей Гука: они наблюдали раньше других нечто новое, но не поняли истинного значения того, что наблюдают. Не сделав основного научного открытия, они все же его подготовили, подобно тому как эмпирическое получение (нахождение) будущего кислорода подготовило создание кислородной теории Лавуазье, а эмпирическое обнаружение радиоактивности подготовило создание теории радиоактивного распада атомов Резерфордом и Содди. Как без предварительного накопления эмпирического материала нельзя его правильно теоретически объяснить и вообще как без эмпирии нет теории, так и в научном открытии опыты Жолио-Кюри, приведшие к обнаружению нового, трудно объяснимого физического эффекта, послужили прямой предпосылкой и непосредственным толчком к открытию нейтрона Чадвиком.

Чадвик, ученик Резерфорда, полностью был согласен с гипотезой своего учителя о нейтроне. Он сам занимался много лет экспериментальной проверкой этой гипотезы, а потому в эффекте Жолио-Кюри он также усмотрел прежде всего возможность участия тяжелой нейтральной частицы – нейтрона. Этот факт говорит о том, что гипотеза действительно является формой развития естествознания, поскольку естествоиспытатели теоретически мыслят, о чем писал еще Энгельс. Если принять, хотя бы для начала, чисто гипотетическое существование какой-то неизвестной формы материи, то экспериментальные исследования должны будут группироваться определенным образом вокруг этой гипотезы с целью ее проверки – подтверждения или опровержения. Таковы были атомная гипотеза Дж. Дальтона в химии XIX в., гипотеза нейтрино В. Паули в физике XX в. и вообще все подлинно научные гипотезы.

Поскольку Чадвик теоретически мыслил, и мыслил правильно, он, естественно, пропускал, как через фильтр разделяемой им гипотезы (гипотезы нейтрона), весь соответствующий – и свой и чужой – экспериментальный материал и в конце концов в предельно короткий срок после первого сообщения об опытах Жолио-Кюри дал этим опытам правильное теоретическое объяснение. Повторив эти эксперименты и проанализировав излучение, образующееся при облучении бериллия α-частицами, он доказал, что это вовсе не особый вид электромагнитного излучения, как считали другие физики, а поток электрически нейтральных частиц с массой, почти равной массе протона. Так был открыт нейтрон. После того как Чадвик это сделал, он стал разводить руками, что, дескать, открытие

нейтрона могло быть сделано раньше, и выяснять причины, почему этого не случилось. По нашему мнению, приходится удивляться не этому, а тому, что между первым известием об опытах Жолио-Кюри и первым сообщением Чадвика о возможном существовании нейтронов прошло так мало времени.

Встает вопрос: можно ли считать супругов Жолио-Кюри соавторами открытия нейтрона? На основании всего сказанного выше на этот вопрос следует, как нам кажется, ответить категорически – нет. Они лишь подготовили это открытие, скачок же в науке, решающий шаг в постижении истины сделал, опираясь на их данные, Чадвик. Этим решающим шагом явились не новые опытные данные (в форме эффекта Жолио-Кюри), как полагает сам Чадвик, а их правильное объяснение. В этом, и только в этом состояло, строго говоря, открытие нейтрона.

Что же касается исторических параллелей, которые, правда, всегда рискованны, то можно было бы сказать, что история эффекта Комптона отчасти напоминает историю обнаружения эффекта Жолио-Кюри, а именно эмпирической фазой научного открытия. Но Комптон не только обнаружил сам эффект, но и теоретически объяснил его, тогда как супруги Жолио-Кюри не дали правильного объяснения тому, что они наблюдали. Эту теоретическую фазу научного открытия, а значит, и само открытие, повторяем, сделал только Чадвик.

Условие неудач и удач в истории открытия нейтрона. Две первые физические концепции из трех. Надо глубже разобраться в том, почему супруги Жолио-Кюри не открыли нейтрона, хотя "держали" *его* эмпирически в своих руках, тогда как Чадвик, держа в руках только их статью, открыл нейтрон "мысленно". Ведь нельзя дело представить таким образом, что И. и Ф. Жолио-Кюри были, дескать, чистыми эмпириками, поэтому и не смогли найти теоретического объяснения сделанного ими наблюдения, а Чадвик был способным к теоретическому мышлению, а потому, будто бы, и дал теоретические объяснение опытному материалу, полученному не им (им только проверенному), а французскими физиками. Нет, супруги Жолио-Кюри были достаточно сильными в теоретическом отношении учеными, Чадвик же был в первую очередь физиком-экспериментатором. В чем же дело? Только в том, что в *данной* конкретной ситуации он мыслил теоретически правильно, а супруги Жолио-Кюри в той же ситуации мыслили теоретически неправильно. Для того чтобы яснее понять, почему все произошло таким образом, необходимо обратиться к выяснению познавательно-психологического аспекта научного творчества, которое совершалось на фоне одной из трех основных концепций природы материи, сменявших одна другую в истории физики за последние 400 лет и по-разному трактовавших фундаментальные свойства материи, характер сил, действующих между ее структурными образованиями, и характер ее превращений. Первая концепция соответствовала механической картине мира, сложившейся в XVII в. и просуществовавшей в видоизмененной форме почти до конца XIX в. В течение этого времени атом рассматривался как цельная частичка материи. Вторая, электромагнитная, концепция зародилась в XIX в. и утвердилась в физике в первой трети XX в. в соответствии с общей электромагнитной картиной мира того времени. В это вре-

мя главное внимание физиков было обращено на изучение атомной оболочки.

Третья концепция соединила в себе некоторые черты первых двух и вместе с тем коренным образом отличалась от них. Она возникла в "великое трехлетие" (1932–1934) в непосредственной связи с рядом открытий в ядерной физике. Ее исходным пунктом во многих отношениях стало открытие нейтрона, за которым последовали открытия дейтрона (1932), позитрона (1933), искусственной радиоактивности (1934) и многие другие. С этого момента главное внимание физиков было перенесено на атомное ядро. Таким образом, в центр физических исследований последовательно выдвигались атом, его оболочка, его ядро. С этим и была непосредственно связана смена механической концепции электромагнитной, а электромагнитной – новой, более полной концепцией – ядерно-физической.

Чтобы разобраться в этом вопросе глубже, необходимо подойти к нему с исторической точки зрения.

В основе механической концепции лежит понятие механической массы, которая впоследствии стала толковаться как собственная масса тела, или его масса покоя. Масса считалась постоянным и неизменным признаком всех физических тел, их фундаментальным свойством. Согласно взглядам, существовавшим в XVII–XIX вв., она не зависит ни от каких процессов, в том числе от движения тела и его скорости.

Дальтон (1803) принял атомный вес за определяющий признак химического элемента: все атомы каждого элемента совершенно тождественны между собой и имеют один и тот же вес, специфический для данного элемента. Д.И. Менделеев, исходя из мысли, что атомный вес является характернейшим свойством химического элемента, от которого зависят все остальные его свойства, пришел к открытию периодического закона. Это был кульминационный пункт механической трактовки природы материи.

В соответствии с этим понимались и превращения материи: считалось, что атомы в соединениях сохраняются неизменными и лишь сополагаются друг с другом по смежности (принцип юкстапозиции). Взаимное превращение веществ состоит в том, что атомы, уже заранее "предсуществующие" внутри молекулы в готовом виде, либо перегруппировываются, либо отделяются, либо к ним извне присоединяются другие атомы.

Параллельно развитию механической концепции в XIX в. зародилась электрическая концепция природы материи и ее превращений. Одну из таких концепций выдвинул И.Я. Берцелиус в первой половине XIX в.; в середине XIX в. она рухнула, поскольку пришла в противоречие с новыми фактами физики (сохранение и превращение энергии) и химии (реакция замещения). Другая электрическая концепция связана с именем М. Фарадея и его учением об электрохимизме и электромагнитном поле. В конце XIX в. учение Фарадея получило развитие в открытиях Максвелла – в теории электромагнитного поля и его электромагнитной теории света, в предсказании электромагнитных волн, а также в теории электролитической диссоциации С. Аррениуса (1887) с ее центральным понятием иона (осколка молекулы, несущего электрический заряд).

Однако сторонники механической концепции не принимали этих новых

физических воззрений на материю и соответствующих им новых физических и физико-химических теорий. Они по-прежнему считали определяющим свойством материальных тел механическую массу, а не электрический заряд, и вообще рассматривали электромагнитные свойства и состояния тел как временное, преходящее физическое состояние. Даже в разгар "новейшей революции в естествознании" Д.И. Менделеев пытался объяснить радиоактивность как род электризации: сначала тела электризуются при участии мирового эфира, а затем постепенно излучают то, чем они были наэлектризованы ранее. В этом духе была написана Д.И. Менделеевым работа "Попытка химического понимания мирового эфира" (1902). Вполне понятно, что такая попытка спасти механическую концепцию оказалась совершенно безнадежной и безрезультатной: механическая концепция была обречена и спасти ее не удалось даже Менделееву. Она рухнула окончательно в начале XX в.

Что же касается электромагнитной концепции, то она стала складываться в качестве господствующей еще в конце XIX в. Ее несла с собой начавшаяся тогда "новейшая революция в естествознании". В ее пользу говорили следующие открытия: электромагнитные волны Герца (80-е годы), рентгеновское излучение, изобретение радио А.С. Поповым (1895), открытие радиоактивности (самопроизвольного излучения электрически заряженных частиц) А. Беккерелем (1896) и электрона Дж. Томсоном (1897), открытие радия супругами Пьером Кюри и Марией Склодовской (1898), создание теории квантов М. Планком и измерение светового давления П.Н. Лебедевым (1900) и многие другие, среди которых особое место занимает создание теории радиоактивности Э. Резерфордом и Ф. Содди (1902) в качестве теории спонтанного распада атомов. Перед этим (в самом начале XX в.) Резерфорд разделил все радиоизлучения на три рода лучей: α-лучи (поток положительно заряженных тяжелых частиц) β-лучи (поток отрицательно заряженных легких частиц) и γ-лучи (коротковолновое электромагнитное излучение). Как видим, все три излучения вполне вписываются в общую электромагнитную концепцию: одни из них состоят из частиц вещества, несущих электрический заряд и обладающих массой покоя, другие являются электромагнитным излучением.

Когда был открыт электрон – первая элементарная частица, оказалось, что его масса переменна и зависит от его скорости. Поэтому считалось, что она по своему происхождению носит электромагнитный, но не механический характер (позднее эту массу стали называть массой движения в отличие от массы покоя).

Вскоре А. Эйнштейн (1905) сделал два великих открытия: установил (параллельно с Пуанкаре) специальный принцип относительности, из которого он вывел фундаментальный закон $E = mc^2$, связывающий массу тела m с его полной внутренней энергией E; ввел понятие "частицы" света – фотона. Так была найдена вторая элементарная частица. Электромагнитная концепция материи и ее превращений укреплялась все более. "С каждым днем становится вероятнее, что химическое сродство сводится к электрическим процессам"* – так характеризовал В.И. Ленин соот-

*Ленин В.И. Полн. собр. соч., т. 18, с. 265.

ветствующие взгляды физиков и химиков начала XX в. Могучим стимулом для дальнейшего развития электромагнитной концепции послужило открытие Э. Резерфордом (1911) атомного ядра и выдвижение идеи планетарного строения атома. Была открыта еще одна элементарная частица — протон (ядро атома водорода) — уже третья по счету.

Исключительную роль в судьбе электромагнитной концепции сыграли физические открытия 1913 г.: они связали физические открытия, сделанные на рубеже XIX и XX вв. (рентгеновское излучение, радиоактивность, электрон, теория квантов, понятие фотона), с менделеевской периодической системой элементов. Говоря конкретнее, электромагнитную концепцию двинули вперед открытия порядкового номера элементов (Мозли), правила сдвига (Содди, Фаянс, Рассел), изотопии (Содди), значения заряда ядра (Мозли, ван ден Брук); на основе всех этих открытий была разработана модель атома (Н. Бор).

В итоге стали считать, что если все тела природы состоят из атомов, а все атомы построены из электрически заряженных частиц (ядер и электронов), то, значит, вся природа материи и все ее превращения носят электромагнитный характер.

Представлялось окончательно установленным, что электромагнетизм составляет самый фундамент материи, ее физическую основу, а вовсе не какое-то преходящее состояние, как это полагали до тех пор сторонники механической концепции. Напротив, прежний признак механической массы (или массы покоя) был, казалось бы, навсегда низведен со своего пьедестала. Ведь явление изотопии свидетельствовало, что атомы одного и того же элемента могут различаться по массе (по своим массовым числам), но так как они имеют одинаковый положительный заряд атомных ядер, химические свойства оказываются у них одинаковыми. Объяснялось это тем, что химические свойства зависят от конфигурации электронной оболочки атома (особенно ее наружной части, где сосредоточены валентные электроны). А эта конфигурация целиком обусловлена значением заряда ядра. Бор даже выдвинул тезис, являющийся ярким выражением и прямым следствием электромагнитной концепции: химические свойства элемента зависят исключительно от заряда ядра, поэтому у изотопов одного и того же элемента они должны быть абсолютно одинаковыми.

В полном соответствии с этой же концепцией Ф. Панет (1916) дал новое определение химического элемента: химический элемент — это вид атомов, характеризуемый общим для всех его атомов значением положительного заряда атомного ядра.

В духе той же концепции развертывались позднейшие исследования Резерфорда и его многочисленных учеников. Так, Э. Резерфорд (1919) произвел первое искусственное превращение элементов, что проложило путь к последующему овладению атомной энергией.

Все эти и многие другие открытия в общем согласовывались с электромагнитной концепцией. Но возникал вопрос: как можно построить все атомы мироздания, исходя из трех уже известных элементарных частиц, природа которых носит электромагнитный характер, — электрона, протона и фотона? Так как протон имеет массу, равную примерно

одной атомной единице, и несет один положительный заряд, то для того чтобы построить ядро какого-либо элемента, необходимо было допустить, что избыток положительных зарядов нейтрализуется соответствующим числом "внутриядерных" электронов. Например, ядро натрия $^{23}_{11}Na$ надо было считать состоящим из 23 протонов и 12 "внутриядерных" электронов. Соответственно этому объяснялись и процессы β-распада: из ядра выделяются уже заранее "пресуществовавшие" в нем в готовом виде "внутриядерные" электроны (нейтрино и спин еще не были открыты).

Даже когда Резерфорд впервые выдвинул идею о нейтроне, эта идея опиралась у него на смелое предположение о том, что протон может вступить с электроном в тесное взаимодействие и такая система во всех внешних проявлениях будет вести себя как электрически нейтральная. Следовательно, идея нейтрона была высказана в рамках и на основе электродинамической концепции.

Далее Резерфорд в том же духе предположил, что один "внутриядерный" электрон может связать собой два протона, в результате чего образуется ядро тяжелого водорода ($^{2}_{1}H$).

Во всех рассмотренных воззрениях сохраняется тот же принцип юкстапозиции, который лежал в основе механической концепции, но только с той разницей, что в механической концепции внутри частиц материи сохраняются и сополагаются друг с другом атомы с постоянной массой, а в электромагнитной концепции – заряженные частицы (ионы, ядра, протоны, электроны).

Правда, в отношении фотонов – их излучения и поглощения – принцип юкстапозиции оказывался неприложимым: фотон не сохранялся как таковой, будучи поглощен телом, и не отделялся как заранее готовый при излучении. Тем не менее фотон полностью вписывался в электромагнитную картину физических процессов, поскольку его природа была электромагнитной. Пожалуй, кульминационным пунктом развития электромагнитной концепции с ее принципом юкстапозиции можно считать открытие эффекта Комптона (1923), представляющего собой явление упругого взаимодействия ("соударения") электрона с фотоном, при этом меняется скорость движения электрона и происходит соответствующее изменение длины волны рентгеновского излучения в результате рассеяния его электронами, входящими в состав атомов вещества. Однако уже следующие физические открытия в области микроявлений выступили как начало подрыва господствующей электромагнитной концепции.

Теперь можно ответить на вопрос, в чем заключается познавательно-психологический источник прежних неудач с открытием нейтрона. Он заключается в том, что ученые, стоявшие последовательно на односторонних позициях электромагнитной концепции, видели всюду взаимодействия электромагнитного характера, в том числе между заряженными частицами, а также образованиями электромагнитного поля. В этих условиях все их внимание было направлено на то, чтобы новые ядерно-физические процессы объяснять только с этих позиций и искать в их основе действие электромагнитных сил. Вполне понятно, что такой подход априори исключал возможность открытия нейтрона как новой элементарной частицы принципиально иной, неэлектромагнитной природы.

Подготовка и начало перехода к третьей, современной физической концепции. Условие удачи в открытии нейтрона. Третьей, основной концепцией в физике, пришедшей в наше время на смену уже устаревшей к концу первой трети XX в. электромагнитной концепции, явилась ядерно-физическая концепция истолкования наиболее элементарных материальных образований из ныне известных, лежащих в самом фундаменте физического строения материи. Особенность этой третьей концепции состояла, в частности, в том, что в ней как бы "снимались", преодолевались односторонности, присущие обеим предшествующим концепциям. Но она не отбрасывала своих предшественниц, а как бы синтезировала их, беря от каждой то, что было подтверждено и удержано в качестве относительно истинного самой наукой, и выправляя образовавшиеся в них "крайности". Поэтому третью, современную физическую концепцию мы вправе охарактеризовать как *двустороннюю.*

Первым шагом к ней, несомненно, явилась Бейкерианская лекция Э. Резерфорда "Ядерное строение атома", прочитанная в 1920 г. В ней говорилось: "При рассмотрении возможного строения элементов естественно предположить, что они построены в конечном счете из ядер водорода и электронов. С этой точки зрения ядро гелия состоит из четырех ядер водорода и двух отрицательных электронов, так что результирующий заряд равен двум" (с. 138).

Указав на дефект массы, Резерфорд выдвинул как весьма правдоподобную мысль о том, "что один электрон может связать также два Н-ядра, а может быть, и одно Н-ядро. Тогда в первом случае возможно существование атома с массой, примерно равной 2, и одним зарядом, который нужно рассматривать как изотоп водорода. В другом случае предполагается возможность существования атома с массой 1 и нулевым зарядом ядра. Подобная атомная структура представляется вполне возможной. С современной точки зрения нейтральный атом водорода следует рассматривать как ядро с единичным зарядом, к которому на некотором расстоянии присоединен электрон, и спектр водорода объясняется движением этого удаленного электрона. При некоторых условиях, однако, электрон может быть связан с Н-ядром намного сильнее, образуя нечто вроде нейтрального дублета. Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами" (с. 139).

Такие нейтральные частицы (слово "нейтрон" еще тогда не было предложено) "должны легко проникать в недра атома и могут либо соединяться с ядром, либо распадаться под действием интенсивного поля ядра, результатом чего будет, вероятно, испускание Н-атома, или электрона, или же обоих вместе" (с. 139).

Фактически неявный "подкоп" под электромагнитную концепцию продолжался в 20-х годах XX в. Уже квантовая механика несла в себе зародыш нового, более широкого и содержательного взгляда на микропроцессы. Хотя она и не являлась специально теоретическим объяснением и описанием движения и поведения одних только электронов (и вообще заряженных микрочастиц материи), однако и не противоречила электромагнитной концепции. Квантовая механика фактически стала вновь выдвигать на первый план не электрические заряды частиц и вообще не электромагнитную природу материи, а свойство массы микрочастиц. Так, во

все основные уравнения или соотношения квантовой механики входила масса микрочастиц, и она играла при этом не второстепенную, а решающую роль. Это касается волнового соотношения де Бройля (1923–1924), связывающего микрочастицу с длиной сопоставляемой с нею волны, волнового уравнения Шредингера (1926), соотношения неопределенностей Гейзенберга (1927).

Вместе с тем открытие спина у электрона Гаудсмитом и Уленбеком (1925) и выдвижение принципа (запрета) Паули (1925) вносили нюансы в продолжающую еще господствовать электромагнитную концепцию, при этом первоначально идея спина связывалась с механической моделью вращающегося волчка ("веретена") и лишь позднее приобрела более точное выражение как проблема особого квантовомеханического состояния или свойства микрочастиц.

Однако наиболее существенную роль с точки зрения будущего подрыва электромагнитной концепции сыграла гипотеза нейтрино, выдвинутая В. Паули (1931) в целях объяснения кажущихся аномалий в энергетическом распределении β-частиц (электронов), вылетающих при β-распаде. Эта гипотеза позволила объяснить сохранение энергии, а вместе с тем суммарного спина в результате β-распада; для этого следовало допустить одновременно излучение двух легких частиц с полуцелым спином каждая – электрона и нейтрино (точнее – антинейтрино, по более поздним представлениям).

Гипотетическое нейтрино было четвертой элементарной частицей (после электрона, фотона и протона), с которой столкнулась современная физика. Если физическая природа трех предыдущих могла считаться электромагнитной, то в отношении нейтрино такое допущение могло быть сделано лишь с большой натяжкой. Этим явно подрывалась общность электромагнитной концепции, которая до тех пор явно еще не сталкивалась с подобными трудностями. Тем не менее до 1932 г. ее можно было считать все же почти безраздельно господствующей в физике.

Решающим шагом на пути выработки и признания новой двусторонней концепции физической природы материи и ее превращений явилось, несомненно, открытие нейтрона. Это была пятая по счету элементарная частица материи, найденная физиками.

Прежде чем анализировать влияние открытия нейтрона на крушение электромагнитной концепции и выработку двусторонней концепции, интересно выяснить, в чем состояла существенная предпосылка сделанного открытия. Здесь мы снова обращаемся к анализу познавательно-психологической стороны научного творчества. В данном случае результат такого анализа показывает, что открытию нейтрона в высшей степени благоприятствовала научная обстановка в школе Э. Резерфорда, о чем свидетельствует сам Чадвик. Свои "Воспоминания о поисках нейтрона" он начинает именно с этого: "В июне 1920 г. Э. Резерфорд прочел Бейкерианскую лекцию, в которой впервые высказал занимавшие его некоторое время мысли о возможном существовании нейтральной частицы, образованной в результате тесного соединения протона и электрона. Спустя несколько месяцев после этой лекции он пригласил меня продолжить вместе с ним проводившиеся им в Манчестере эксперименты по искусственному

расщеплению ядер азота... Он подробно излагал мне свои взгляды на проблему структуры ядра и, в частности, указывал на трудности в понимании строения ядра, полагая единственными существующими элементарными частицами протон и электрон, и на необходимость в связи с этим ввести понятие нейтрона. Резерфорд охотно допускал, что многое в этом было чистым домыслом, и чуждый фантазерству, не основанному на эксперименте, редко, только в частных беседах, говорил об этом... Однако он не отказался от своей идеи и заразил ею меня. В течение последующих лет... мы продолжали проводить эксперименты в надежде найти признаки существования нейтрона...".

Сразу после Бейкерианской лекции Резерфорда его сотрудники начали экспериментальные поиски нейтронов. Чадвик вспоминает, что в 1923 г. с одобрения Резерфорда он попытался обнаружить γ-излучение как результат образования нейтронов в большой массе водорода. В 1928 г., когда появились счетчики Гейгера, Резерфорд и Чадвик воспользовались этими приборами для повторения эксперимента с водородом. "Мы шли на все уловки, чтобы найти хоть какие-нибудь следы нейтрона".

Позже Чадвик безрезультатно искал нейтрон в различных физических условиях и все же не терял надежду его поймать. Он писал Резерфорду: "Я считаю, что мы должны приступить к подлинным поискам нейтрона. Уверен, что располагаю действенной схемой работы..." Год или два Чадвик упорно стоял на своем, но, как оказалось, понапрасну тратил силы.

Однако вся творческая атмосфера, которая окружала Чадвика в течение одиннадцати с половиной лет (с июня 1920 г. до начала 1932 г.) была насквозь пропитана, если можно так выразиться, духом нейтрона; в самом воздухе лаборатории и школы Резерфорда витали идеи о нейтроне. Это и явилось решающим условием того удивительного на первый взгляд факта, что Чадвик в исторически считанные часы сумел разгадать истинную сущность опытов Жолио-Кюри и открыть нейтрон.

Укажем на одно интересное совпадение в биографиях учителя (Резерфорда) и его ученика и последователя (Чадвика): в год рождения Чадвика (1891) 20-летний Резерфорд, студент Новозеландского университета, выступил впервые с сообщением о разрушимости атомов, т.е. с той самой идеей, которая, начиная с 1902 г., стала могучим импульсом развертывания новейшей революции в естествознании. В 1981 г. одновременно исполнилось 90 лет со дня рождения знаменитого физика Джеймса Чадвика, автора одного из величайших открытий современного естествознания, и со дня рождения в голове юного Резерфорда великой идеи о превращении элементов, которая легла в дальнейшем в основу всей ядерной физики, включая и открытие нейтрона Чадвиком.

Начало перехода к новой концепции. Хотя нейтрон во всех своих внешних проявлениях оказался электрически нейтральным, как это и предвидел Резерфорд за 12 лет до его открытия, все же сам факт существования и обнаружения нейтрона еще не разрушал электромагнитной концепции: ведь можно было его представить как систему тесно взаимодействующих протона и электрона, так что в его основе по-прежнему можно было видеть электрически заряженные частицы материи — так и представлял себе Резерфорд будущий нейтрон.

Однако вскоре было доказано, что внутри атомного ядра, а значит и внутри нейтрона, не может существовать готовый электрон в непосредственной близости от протона. Принцип юкстапозиции оказался здесь, таким образом, столь же несостоятельным, как и в случае процессов поглощения и испускания фотонов соответствующими телами. В исследованиях Д.Д. Иваненко (1932), проводимых в контакте с В.А. Амбарцумяном и позднее развитых Е.Н. Гапоном, было впервые показано, что атомное ядро не может содержать никаких "внутренних" электронов в готовом виде, а должно состоять только из тяжелых частиц – протонов и нейтронов. В частности, этого требовал также и принцип сохранения суммарного спина, нарушаемый при прежнем допущении о составе атомного ядра (из протонов и электронов).

Но если внутри атомного ядра нет готовых электронов, как нет их и внутри нейтрона, то спрашивается: откуда они берутся при распаде β-радиоактивного ядра? Ответ мог быть только один: электрон (так же как и антинейтрино) рождается подобно тому, как рождается фотон при испускании света. На смену механическому принципу юкстапозиции пришел новый принцип, предполагающий возможность рождения и исчезновения определенных форм материи и их коренное, качественное превращение в иные формы или же их возникновение из качественно иных форм материи.

Стало ясно, что наряду с электрически заряженными частицами материи существуют электрически нейтральные в самой своей основе, и следовательно, имеющие неэлектромагнитную природу частицы.

Открытие нейтрона имело решающее значение для всей ядерной физики. В области теории оно позволило развить новую концепцию, в которой учитывались два свойства вещества – его масса и его электромагнетизм, отражаемые до тех пор прежними концепциями порознь и в противопоставлении друг другу. Далее, открытие нейтрона позволяло строить модели атомного ядра, исходя лишь из представления о тяжелых частицах (протонах и нейтронах).

В области эксперимента открывались широкие возможности использовать нейтрон в качестве идеального ядерного снаряда; по причине своей нейтральности он не испытывал на себе действия сил отталкивания, вызванных положительным зарядом ядра, и мог приближаться к ядру даже при небольшой начальной скорости. Сокрушительный удар электромагнитная концепция испытала благодаря открытию тяжелой воды – тяжелого водорода (дейтерия) и дейтрона, которое было сделано Юри (1932). Этим было подтверждено другое предвидение Резерфорда, высказанное за 12 лет до того, но еще в рамках и на основе прежней электромагнитной концепции. По новым же представлениям ядро дейтерия – дейтрон – должно было состоять не из трех ядерных частиц (двух протонов и одного электрона), а только из двух – протона и нейтрона, т.е. только из одних тяжелых частиц – нуклонов.

Главное же заключалось в том, что у дейтерия (тяжелого водорода $^{2}_{1}\mathrm{H}$) химические и физико-химические свойства оказались заметно отличными по своим значениям от тех же свойств у протия (легкого водорода $^{1}_{1}\mathrm{H}$). Уже само открытие тяжелой воды было связано с различием в таком важ-

ном физико-химическом свойстве двух типов воды, как константа их диссоциации.

Это означало, что рухнул центральный пункт прежней электромагнитной концепции о полной тождественности химических свойств изотопов одного и того же элемента и о зависимости этих свойств только от конфигурации электронной оболочки атома, но не от массовых чисел изотопов, хотя бы в некоторой степени.

Свойства дейтерия в отличие от свойств протия и сама история открытия тяжелой воды наглядно свидетельствовали о том, что хотя бы отчасти химические свойства атомов зависят от их массы (как на этом всегда настаивал Д.И. Менделеев), а не только от конфигурации их оболочки.

Тогда же произошло еще одно важное ядерно-физическое открытие: Кокрофт и Уолтон (1932) выработали способ ускорения протонов и впервые осуществили ядерную реакцию с помощью искусственно ускоренных протонов. Вскоре Лоуренс (1933) получил дейтроны при помощи циклотрона и провел при их участии ядерные реакции.

Итак, открытия 1932 г. стали поворотным пунктом в развитии всей ядерной физики, вызвав переход от прежней односторонней электромагнитной концепции к новой, более широкой и полной, которая в известной степени являлась возвращением к некоторым пунктам более ранней (механической) концепции в отношении учета фундаментальной роли массы частиц материи и ее определяющего влияния на другие их свойства. Но такой возврат происходил на этот раз не в одностороннем порядке — путем простого отрицания того, что дала электромагнитная концепция, а на основе удержания всего положительного, что было накоплено физикой и химией в рамках этой концепции. Короче говоря, новая концепция, пришедшая на смену электромагнитной, была по существу двусторонней: она соединила в себе учет и массы, и электромагнетизма, преодолевая существовавший до тех пор разрыв между ними, присущий обеим предшествующим ей концепциям.

Открытие позитрона и взаимопревращений вещества и света. На рубеже 1932 и 1933 гг. Блэкетт и Оккиалини открыли в космическом излучении процессы, которые позднее (после открытия позитрона) были истолкованы как процессы рождения и уничтожения (аннигиляции) пары электрон — позитрон. Тем самым несостоятельность принципа юкстапозиции становилась очевидной, что доказывалось прямым наблюдением, а новая (двусторонняя) концепция получала непосредственное подтверждение.

В 1933 г. Андерсон доказал правильность обнаружения им в 1932 г. в космическом излучении позитрона. Это была шестая по счету открытая элементарная частица, которая вместе с тем была первой античастицей, ставшей известной физикам. Косвенно именно в качестве античастицы (антиэлектрона) позитрон был предугадан еще Дираком (1928), но не в форме определенной физической частицы, а в виде некоторой "дырки" в специфическом пространстве (вакууме), которая способна заполняться электроном.

Из свойств античастиц вытекала их способность рождаться парами (частица и античастица) и аннигилировать (взаимоуничтожаться), превращаясь в другие материальные образования.

Стало известно уже шесть элементарных частиц: три электрически нейтральные (нейтрон, нейтрино и фотон, причем первые две – не электромагнитной природы), две положительные (протон и позитрон) и одна отрицательная (электрон). Уже из самого перечня этих фундаментальных физических частиц вытекает задача определенным образом сочетать в представлении о физическом фундаменте материи то рациональное, что порознь, изолированно отражалось в механической концепции (с ее акцентированием массы как основного свойства тела) и в электромагнитной концепции (с ее акцентированием электрических свойств и состояния тела как основных).

Но как произойдет синтез обоих моментов в новой двусторонней концепции, было еще неясно. Ведь во всякой революции сначала, причем достаточно быстро и резко, осуществляется ее негативная, критическая, разрушительная функция и лишь затем сравнительно медленно и постепенно реализуется ее позитивная, конструктивная, созидательная функция. Так это происходило и в данном случае. Открытие нейтрона и истолкование его физической природы сразу же разрушили электромагнитную концепцию в ее прежней односторонности. Однако конструктивного решения вновь возникшей проблемы это разрушение в себе еще не содержало. Таким решением могла бы служить разработка общей теории структуры атомного ядра и внутриядерных сил, а в более глубоком смысле – общая теория элементарных частиц. В то время все поиски таких решений были еще впереди, да и сегодня они еще далеки от их относительного завершения.

В изучении процессов взаимопревращения вещества и света большое место занимают исследования супругов Жолио-Кюри. Они показали, что образование из света (γ-фотонов) пары частиц вещества (электрона и позитрона) в поле тяжелого ядра происходит согласно принципу сохранения суммарной массы и соответственно суммарной энергии превращающихся частиц (по закону Эйнштейна). Жолио-Кюри тщательно подсчитали энергетический баланс такого рода превращений и доказали, что энергия исходного γ-фотона (и соответствующей ей массы движения) превращается в энергию (и соответственно массу) образующейся пары, т.е. в энергию (массу) покоя позитрона и электрона и их кинетическую энергию. Позднее Жолио-Кюри изучали также обратный процесс – аннигиляцию позитрона при его столкновении с электроном.

Так, было показано, что рождение пары вещественных частиц происходит не из ничего, а из массы и энергии "световых частиц" (фотонов), точно так же, как и их аннигиляция происходит не путем их полного уничтожения и превращения в ничто, а путем их обратного перехода в фотоны с сохранением их массы и энергии. Другими словами, как это показал позднее С.И. Вавилов, здесь имеет место превращение одного физического вида материи (света, т.е. электромагнитного поля) в другой ее физический вид (вещество) или же обратное превращение вещества в свет. При этом происходят глубочайшие качественные изменения самой материи – появление или исчезновение таких фундаментальных ее физических свойств, как масса покоя, присутствующая у электрона и позитрона и отсутствующая у фотона, вся масса которого является массой движения. Точно так

же происходит своеобразная электрическая поляризация частиц с появлением у электрона отрицательного заряда,у позитрона – равного по величине положительного заряда, даже следы которых отсутствуют у фотона; кроме того, у них появляются полуцелые спины, которых не было и нет у фотонов. Электромагнитная концепция не в состоянии была объяснить этого, так как превращения подобного рода выходят за ее рамки.

Эти явления наряду с Жолио-Кюри изучали и другие физики. Блэкетт и Оккиалини (1933–1934) изучали позитроны, γ-излучение, рождение из них пар (электрон и позитрон) и аннигиляцию этих пар.

Все эти исследования и открытия с новой силой подтвердили несостоятельность принципа юкстапозиции, а вместе с ним и всей электромагнитной концепции (не говоря уже о более ранней, механической). Необходимость отказа от электромагнитной концепции, которую разделяли ранее Жолио-Кюри и которая помешала им открыть нейтрон, когда они уже буквально держали его в своих руках, становилась все более очевидной и необходимой. Ее крушение ускорило открытие искусственной радиоактивности, сделанное супругами Жолио-Кюри в следующем году. Это открытие явилось продолжением их прежних исследований по обстрелу легких элементов потоком α-частиц. Но на этот раз оно было "по-комптоновски" доведено до конца, т.е. сами Жолио-Кюри дали ему теоретическое объяснение.

Открытие искусственной радиоактивности. Полное крушение в ее односторонности электромагнитной концепции. Открытием, которое нанесло решающий удар по односторонней электромагнитной концепции, явилось открытие супругами Жолио-Кюри (1934) искусственно вызванной радиоактивности у легких элементов. На этот раз Жолио-Кюри оказались вполне на должной теоретической высоте: они не только установили новый факт (эмпирическая фаза открытия), но и дали ему правильное физическое объяснение (теоретическая фаза открытия). Очевидно, научная атмосфера, которую создала вокруг себя Мария Склодовская-Кюри, и учение о радиоактивности, составлявшее стержень всех научных интересов этой славной семьи, оказывали на ближайших учеников Марии Кюри – ее дочь Ирен Кюри и зятя Фредерика Жолио – столь же благоприятное воздействие, как и идеи Резерфорда на его учеников, в том числе идея о нейтроне на Чадвика. Поэтому как только Жолио-Кюри получили первые опытные данные, свидетельствующие о появлении искусственно вызванной радиоактивности у легких элементов, они незамедлительно теоретически верно объяснили это явление.

Так, Жолио-Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия α-частицами образуется радиоактивный фосфор, а при бомбардировке ими же бора и магния получаются радиоактивные азот и кремний, при этом некоторые искусственно образующиеся радиоактивные изотопы легких элементов испускали при β-распаде не электроны (вместе с антинейтрино) подобно всем ранее известным радиоактивным элементам, а позитроны (вместе с нейтрино). Значит, был одновременно открыт совершенно новый, ранее не известный тип радиоактивных превращений – позитронная радиоактивность.

Огромное значение открытия искусственной радиоактивности состо-

яло, в частности, в том, что оно указывало на необходимость при характеристике атомного ядра учитывать в качестве его фундаментального свойства, определяющего границы устойчивости его заряда, массу ядра (массовое число). Возьмем в качестве примера изотопы кислорода. Устойчивы (стабильны) среди них следующие три: ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O. Это значит, что на восемь протонов в ^{16}O приходится восемь нейтронов, в ^{17}O – девять нейтронов и в ^{18}O – десять нейтронов. Если масса более тяжелого ядра ^{18}O увеличится на одну атомную единицу (на один нейтрон), то получится нестабильный β-радиоактивный изотоп ^{19}O (с определенным периодом полураспада), излучающий электроны (и антинейтрино) и превращающийся в стабильное ядро ^{19}F. В итоге происходит сдвиг на одно место вправо по периодической системе (заряд ядра увеличивается на единицу).

Но если масса более легкого ядра ^{16}O уменьшится на одну атомную единицу (на один нейтрон), то получится также нестабильный β-радиоактивный изотоп ^{15}O (с другим периодом полураспада), излучающий на этот раз уже не электроны, а позитроны (и нейтрино) и превращающийся в стабильное ядро ^{15}N. В итоге совершается сдвиг на одно место влево по периодической системе (заряд ядра уменьшается на единицу).

Здесь массовое число (суммарное число нуклонов, т.е. протонов и нейтронов) остается постоянным, устойчивым, и оно определяет устойчивость заряда ядра и сам характер его изменения (тип радиоактивного распада). Если массовое число выше (соответственно ниже) верхней (нижней) границы устойчивости заряда ядра, как в случае ^{19}O (^{15}O), то это означает, что заряд ядра оказывается слишком малым (большим) по сравнению со значением массы ядра. В результате заряд ядра путем β-излучения приводится в соответствие со значением массового числа, как это имеет место при переходе ^{19}O в ^{19}F (^{15}O в ^{15}N).

Это доказывает, что масса (массовое число) детерминирует и регулирует заряд ядра, а заряд ядра выступает как нечто производное и зависимое от массы ядра.

Сущность же β-распада (электронная и позитронная радиоактивность) сводится к тому, что в одном случае внутри ядра один нейтрон превращается в протон ("заряжается", испуская электрон и антинейтрино), в другом – один протон превращается в нейтрон ("разряжается", излучая позитрон и нейтрино).

В соответствии с этим определение химического элемента, данное Панетом (1916), должно быть развито и углублено так, чтобы видовой признак (заряд ядра) и признак разновидности (массовое число) были приведены во взаимосвязь: элемент есть вид атомов, характеризуемый общностью значения заряда ядра у всех атомов (признак вида), устойчивость которого определяется граничными значениями (верхним и нижним) массового числа (признаком разновидности). Тем самым вновь отводится определенная роль массе при характеристике химического элемента; в этом ныне состоит одно из проявлений двусторонней, синтетической концепции, пришедшей на смену прежней односторонней электромагнитной концепции и восстановившей до известной степени прежний менделеевский признак элемента (атомную массу) в качестве фундаментального и определяющего.

Решающую роль в таком утверждении и углублении двусторонней концепции сыграло открытие искусственной радиоактивности супругами Жолио-Кюри. В этом также состоит непреходящее значение их открытия в истории науки.

Только что изложенная история открытия искусственной радиоактивности легких элементов убедительно свидетельствует о том, какая сила теоретической мысли и какой высокий творческий накал характеризуют научную деятельность Жолио-Кюри. А тот факт, что, "держа в руках" нейтрон, они не сумели его увидеть и открыть, объясняется совсем не тем, что у Жолио-Кюри будто бы отсутствовало необходимое теоретическое мышление, что они, дескать, были узкими эмпириками и принадлежали к ученым "продуктивно-стимулятивного" типа в отличие от Чадвика – ученого "креативного" типа. Нет, причина отмеченного выше факта заключалась в том, что Жолио-Кюри в данном конкретном случае стояли на позициях устаревшей уже электромагнитной концепции, непригодной для объяснения того явления, которое они наблюдали. В этом все дело. А это случилось потому, что творческая атмосфера всей семьи Кюри была с самого начала пропитана идеями электромагнетизма в их нераздельной связи с идеями радиоактивности. Этим и объясняется тот факт, что, не сумев открыть нейтрон, который они "держали в руках" в 1932 г., Жолио-Кюри спустя всего два с небольшим года открыли явление искусственной радиоактивности, доказав этим, что свойство радиоактивности присуще изотопам всех химических элементов вообще, в том числе и самых легких.

Укрепление двусторонней концепции. Дальнейшие открытия в ядерной физике. Наряду с продолжением традиционного изучения действия α-частиц на легкие элементы к 1934 г. развернулись исследования действия на атомные ядра нового ядерного снаряда – нейтрона, более эффективного по сравнению с α-частицами. Такому его применению сопутствовало дальнейшее изучение свойств самого нейтрона. Так, Ф. Жолио-Кюри (1934) показал, что масса нейтрона немногим больше, чем масса протона. Из этих результатов следовал вывод, что нейтрон, возможно, обладает отрицательной β-радиоактивностью. Такое предвидение подтвердилось позднее (1951), когда было обнаружено явление β-распада нейтрона. Это означало, что нейтрон, не содержа в себе электрона (и антинейтрино) в качестве готовых частиц, способен порождать их, но не из ничего, а из своей массы и своей энергии.

И.Е. Тамм (1934) выдвинул гипотезу о том, что внутриядерные силы обусловлены переносом сопряженными частицами – электроном и нейтрино (теперь бы сказали точнее: антинейтрино) – взаимодействия между нуклонами (нейтронами и протонами). Эту гипотезу И.Е. Тамм разработал математически, придав ей количественное выражение. Такую же гипотезу одновременно с ним предложил Д.Д. Иваненко. Основная идея этой гипотезы натолкнула Юкаву на мысль о "тяжелом электроне", которая стала прототипом современных представлений о мезонном механизме действия ядерных сил. Все это продолжало способствовать укреплению и развитию двусторонней концепции природы материи и ее превращений.

Тогда же (1934) Ферми с сотрудниками наблюдали искусственную радиоактивность с испусканием электронов в результате воздействия нейтронов (в частности, медленных) на ядра тяжелых элементов, в том числе урана. Был обнаружен ряд β-излучений, что требовало теоретического объяснения. И вновь повторилась старая история: фактически Ферми с сотрудниками наблюдали реакцию деления тяжелого ядра под воздействием медленных нейтронов с образованием β-радиоактивных осколков. Это была эмпирическая фаза открытия. Но объяснение эмпирически наблюдаемому явлению они дали неправильное, приняв появление β-излучения за свидетельство образования трансурановых элементов. Другими словами, возник типичный разрыв между эмпирической и теоретической фазами открытия, продолжавшийся почти пять лет.

Позднее, когда деление ядра было открыто, ученые, видевшие уже в 1934 г. эту реакцию, сами не могли понять и объяснить, почему они не догадались о том, что в действительности перед их глазами совершалось. Амальди (один из сотрудников Ферми) признавался: "Возможность деления, предположенную немецким химиком Идой Ноддак, мы не восприняли всерьез, хотя позднее не могли понять, почему"*.

С психологической и методологической точек зрения такое отношение к идее деления ядра вполне понятно: в сознание ученых глубоко вошла мысль, что ядерные (включая радиоактивные) процессы протекают при участии лишь легких частиц и таких тяжелых частиц, масса которых не превышает массы α-частиц. Считалось, что все эти ядерные реакции относятся к одному, а потому и единственно возможному типу. Эта мысль вошла в сознание ученых настолько глубоко, что заслонила собой все иные, отличные от нее решения. Поэтому и представление о делении тяжелого ядра на две части оказалось совершенно чуждым сознанию физиков и никак не укладывалось в общепринятые в то время воззрения. Мнение Иды Ноддак о возможности деления ядра прозвучало тогда как одинокий голос в пустыне и не нашло никакого отклика.

Неправильное возведение особенности во всеобщность, в результате чего игнорируется или даже отрицается возможность иных решений проблемы, является характерным источником односторонних научных концепций, которые мешают увидеть другие связи и отношения между вещами, не укладывающиеся в данную одностороннюю в этот момент принимаемую за единственно истинную концепцию. Так было, например, во времена Д.И. Менделеева, когда особенность (химическое сходство элементов, образующих одну естественную группу) была возведена во всеобщность, т.е. в общий принцип систематизации химических элементов. Поэтому сближение химически несходных элементов по близости их атомных весов (например, калия-39,1 и хлора-35,5 или натрия-23 и фтора-19) было совершенно чуждо сознанию химиков.

Открытие Д.И. Менделеевым периодического закона (1869) состояло, в сущности, в том, что он фактически вышел за рамки этой особенности и стал сближать элементы не только по их химическому сходству, но и по

*Воспоминания Э. Амальди, которые цитируются в этой статье, помещены в нашем сборнике на с. 67–85.

значению их атомных весов, т.е. стал сближать химически несходные элементы. Тем самым он учитывал не только признак сходства, но и признак различия в его единстве с признаком сходства.

Точно такое же положение создавалось в других областях естествознания. В области учения о строении материи сложилось в течение многих десятилетий такое положение, при котором каждому из двух основных физических видов материи – веществу и свету – приписывалась своя особая структура: веществу – атомистическая (дискретная), свету – волновая (непрерывная). Открытие электрона (1897) доказало наличие дискретной структуры и у электричества. Создание теории квантов (1900) и введение понятия фотона (1905) вызвали переворот в оптике, так как особенная структура одного вида материи (вещества) была распространена на другой ее вид (свет, электромагнитное поле), для которого она считалась несвойственной (с тех пор как физики отказались от ньютоновой корпускулярной теории света).

Решение пришло только тогда, когда Л. де Бройль (1923–1924) показал, что волновая и корпускулярная структуры не являются особыми структурами, одна – для света, другая – для вещества, а обе вместе представляют собой всеобщую, универсальную структуру для всех микрообъектов природы, одни из которых носят характер света (электромагнитного поля), не имеющего массы покоя, другие – характер вещества, имеющего массу покоя.

Точно так же в 1934 г. известные типы ядерных реакций считались универсальными и исключалась возможность других не известных дотоле их типов, подобных делению ядра. Этим, на наш взгляд, и объясняется тот факт, что не только в 1934 г., но и в течение последующих лет (до конца 1938 – начала 1939 г.) мысль о возможности деления тяжелого ядра упорно не укладывалась в сознании ученых.

Сразу же после великого трехлетия в ядерной физике (1932–1934) началось дальнейшее развитие сделанных за эти годы открытий. Юкава (1935), отталкиваясь от гипотезы советских физиков (1934) о механизме действия ядерных сил, выдвинул идею о "тяжелом электроне" (мезоне), обладающем массой свыше 100 электронных масс, посредством которого осуществляется взаимодействие между нуклонами (нейтронами, протонами) внутри атомного ядра. Гипотеза Юкавы была подтверждена позднее благодаря открытию π-мезонов, или пионов (1947).

Андерсон (1936) вместе с Неддермейером, идя тем же путем, каким он обнаружил позитрон, открыл в космическом излучении "тяжелый электрон" со средней массой около 200 электронных масс (оказавшийся впоследствии μ-мезоном, или мюоном). Это была седьмая элементарная частица, ставшая известной физикам, и первая, которую зачислили в разряд мезонов. Однако в действительности это была одна из легких частиц (ныне они именуются лептонами), хотя первое время казалось, что она и есть тот "тяжелый электрон", существование которого предсказал Юкава (1935). Блэкетт, Конверси, Панчини, Пиччони (1937) исследовали подробнее свойства мюона.

Следует добавить, что И.В. Курчатов с сотрудниками (1936) открыли явление ядерной изомерии у искусственно-радиоактивных атомных ядер

и дали ему теоретическое объяснение, т.е. осуществили открытие, так сказать, "по-комптоновски".

Все эти исследования и открытия способствовали укреплению и дальнейшему развитию двусторонней концепции. Но особенно важное значение имели работы, касающиеся нейтронного воздействия на атомные ядра тяжелых элементов. Правда, первое время, как уже говорилось выше, работы шли в русле тех идей, согласно которым при этом образуются трансурановые элементы. Характерно, что такие же взгляды разделял Отто Ган, который позднее, в конце 1938 г., открыл вместе со Штрасманом деление ядра, т.е. теоретически правильно истолковал эмпирически наблюдаемое β-излучение продуктов реакции урана с медленными нейтронами. По этому поводу Амальди писал: "... в 1935 и 1936 гг. Ган и Мейтнер не только подтвердили наши результаты, но и продолжили наши исследования: в то время они считали, что нужно определить два β-радиоактивных ряда, образующихся при захвате нейтронов двумя разными урановыми изотопами...", при этом речь шла об образовании трансурановых элементов с порядковыми номерами 93, 94 и 95, а возможно, и с бóльшими.

Характерно, что Ирен Жолио-Кюри и П. Савич, изучая совместно радиоактивность, искусственно вызванную воздействием нейтронов на ядра урана, обнаружили (1938) в продуктах этих реакций радиоактивные элементы, отвечающие по химическим свойствам лантану, т.е. элементу с порядковым номером 57, стоящему в середине периодической системы. Они не придали этому факту особого значения, продолжая полагать, что при обработке урана нейтронами образуются β-радиоактивные трансурановые элементы. В действительности же, как выяснилось несколько месяцев спустя, при этом получались не трансурановые элементы, а β-радиоактивные продукты вызванного нейтронами деления ядер урана на ядра элементов, стоящих в середине менделеевской периодической системы. Так, в приведенном случае образования $_{57}$La исследователи должны были получить ядро $_{35}$Br в качестве второго осколка, разделившего надвое ядро урана $_{93}$U. Здесь во второй раз теоретическое мышление замечательных физиков Жолио-Кюри дало осечку: они опять "держали в руках" прямое доказательство реакции деления ядра, но и на этот раз снова оказались в плену старых категорий и не смогли выйти из эмпирической фазы открытия. Факт обнаружения лантана в продуктах ядерной реакции мог стать при определенных условиях началом нового, мощного подъема революции в естествознании. Но тот же факт мог совершенно бесполезно пропасть в руках исследователей, если они не оказались способными постичь теоретически его внутреннюю сущность.

Другие такого же рода факты были установлены в том же 1938 г., когда в продуктах ядерной реакции при нейтронном воздействии на уран был обнаружен $_{57}$Ba, т.е. элемент, стоящий опять-таки в середине периодической системы элементов. Из таких экспериментальных данных Ган и Штрасман (1938) сделали правильный теоретический вывод: происходит деление ядра $_{92}$U на два осколка, например на $_{56}$Ba и $_{36}$Kr. Экспериментальные исследования в лаборатории Жолио-Кюри сыграли большую роль в подготовке этого открытия, и в этом еще одна их огромная заслуга.

Открытие деления ядра явилось исключительно сильным аргументом против односторонней электромагнитной концепции в пользу двусторонней концепции. В самом деле, нестабильность атомного ядра тяжелого элемента (урана) вызывается единственно тем, что его масса увеличивается на одну атомную единицу (в результате присоединения к ядру урана одного лишнего нейтрона). Значит, не только устойчивость заряда атомного ядра (как в случае искусственной радиоактивности легких элементов), но и целостность всего ядра как совокупности нуклонов оказываются в прямой зависимости от массы ядра (массового числа).

Далее, в пользу определяющей роли массы,массового числа,по отношению к заряду говорит тот факт, что в обоих осколках, на которые делится тяжелое ядро, резко нарушается то соотношение между массой и зарядом, которое имеет место у стабильных элементов. Поэтому только после ряда последовательных β-распадов, т.е. после ряда сдвигов вправо по периодической системе с одного места на другое, достигается, наконец, такой элемент, у которого при данном массовом числе заряд ядра оказывается устойчивым.

При всех этих вторичных радиоактивных β-излучениях массовое число остается постоянным и явно регулирует последовательное увеличение заряда ядра так, как если бы этот заряд был свойством, реально зависящим от массового числа.

Вернемся еще раз к "бериллиевому излучению". Особенность его, в частности, заключалась в том, что оно представляет собой аналог простейшего случая реакции деления атомного ядра с испусканием одного нейтрона: ${}^{9}_{4}\mathrm{Be} = 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + n^{0}$. Поэтому его можно было бы назвать "клеточкой" по отношению ко всей области деления атомного ядра.

С момента открытия реакции деления тяжелого ядра (1938) началась новая эра в развитии науки и техники, которую часто называют эрой атомной энергии. Анализ ее истории требует особого исследования. Следует лишь помнить, что одним из решающих открытий в области ядерной физики, сделанных на подступах к этой новой эре, явились ядерно-физические открытия "великого трехлетия" (1932–1934) и прежде всего – открытие нейтрона (1932).

Философский аспект переворота, вызванного открытием нейтрона. Остановимся на трех вопросах методологического характера, которые можно считать выводом из рассмотренной выше истории развития и смены концепций природы материи и ее превращений.

Первый касается общего характера развития науки, научного познания, идущего через противоречия. Сначала в науке возникают и борются между собой противоположные концепции, причем верх берет одна из них, как правило, более простая, имеющая, казалось бы, более непосредственное опытное подтверждение. Противоположная же ей концепция отодвигается в это время на задний план, а то и вовсе затирается. Но проходит время, и сама действительность вливает силы в эту ранее отвергнутую концепцию, а та, что господствовала до сих пор, свергается со своего пьедестала, так что концепции как бы меняются местами.

Однако дело не завершается утверждением одной из двух противоположных, конкурирующих между собой концепций. Выясняется, что кон-

цепция, одержавшая верх, содержит свое собственное отрицание. Тогда раскрываются единство и нераздельная связь между обеими сторонами противоречия, которые до тех пор представали перед мысленным взором исследователей порознь и даже в их противопоставлении одна другой.

С этой точки зрения раскрывается глубочайший философский смысл великих открытий в физике, сделанных в 1932–1934 гг., в результате которых на смену односторонней электромагнитной картине мира пришла более сложная, двусторонняя концепция, подобно тому как в свое время (на рубеже XIX и XX вв.) сама эта электромагнитная картина, тогда только еще возникшая, пришла на смену механической картине мира.

В самый разгар "новейшей революции в естествознании" В.И. Ленин (1908) отверг ложные заявления идеалистов, будто материализм утверждал "обязательно "механическую", а не электромагнитную, не какую-нибудь еще неизмеримо более сложную картину мира, как *движущейся материи*"*.

История физики это блестяще подтвердила. С возникновением в 20-х годах XX в. квантовой механики начала уже создаваться подобная "неизмеримо более сложная" физическая картина микропроцессов, а открытия ядерной физики 1932–1934 гг. привели к необходимости отказа от прежней, односторонней электромагнитной концепции и перехода к новой, двусторонней, несравненно более сложной концепции.

В новой, двусторонней концепции обнаружились некоторые черты, сходные с теми, какие были присущи первоначальной (механической) концепции, например подчеркивание фундаментального значения массы и преходящего значения электрического заряда. И хотя это было сделано теперь в совершенно иной связи и на совершенно иной основе, нежели делалось Д.И. Менделеевым, а до него Галилеем и Ньютоном, Лавуазье и Дальтоном, тем не менее несомненным был факт, что наряду с электрическим зарядом микрочастиц большое место заняла их масса покоя, особенно у электрически нейтральных частиц.

Второй вопрос касается существа того коренного переворота, который вызвали открытия 1932–1934 гг., в понимании природы качественных превращений материи. Для обеих односторонних (механической и электрической) концепций был типичен механистический принцип юкстапозиции: частицы сохраняются готовыми, как таковые, в соединении между собой и отделяются друг от друга при распаде их соединений.

Здесь чрезвычайно ярко конкретизировалась ленинская идея, высказанная в "Философских тетрадях" (1915) по поводу двух принципов, касающихся превращения материи, из которых один назван выше принципом юкстапозиции, а другой охарактеризован как признание рождения и аннигиляции частиц. Характеризуя взгляды древнегреческих философов, В.И. Ленин писал, что "превращение одни понимают в смысле наличности мелких качественно-определенных частиц и роста (respective уменьшения) [соединения и разъединения] их. Другое понимание (Гераклит) –

---

*Ленин В.И. Полн. собр. соч., т. 18, с. 296.

превращение *одного* в *другое*"*. В случае рождения и аннигиляции пары конкретизируется именно это диалектическое "превращение одного в другое", а именно – света в вещество (при рождении пары) или вещества в свет (при ее самоуничтожении).

В итоге как сам процесс развития ядерной физики, так и достигнутые ею результаты, прежде всего двусторонняя концепция природы материи и ее превращений, имеет ярко выраженный диалектический характер.

Третий вопрос носит более общий характер. Рассматривая историю науки, в частности ядерной физики, как результат деятельности человека, в том числе и его мыслительной деятельности, можно выделить две формы (или две ступени) деятельности человеческого сознания: одна из них именуется разумом, другая – рассудком. Не будем здесь подробно характеризовать их. Остановимся лишь на одной важной особенности разума в его противопоставлении рассудку: разум видит в каждом крупном достижении научного познания, в каждом великом научном открытии, в каждом сколь угодно большом шаге науки вперед по пути к раскрытию все новых и новых истин и овладению ими очередной ступени на бесконечной лестнице познания лишь новую веху на безграничном пути человеческого познания. То, что достигнуто и познано людьми, представляет собой лишь конечный участок бесконечного движения человеческого разума ко все более и более полному и глубокому знанию. Поэтому это только песчинка по сравнению с тем, что еще предстоит познать людям в будущем. Эту мысль выразил В.И. Ленин (1914), говоря про "связь (всех частей) бесконечного прогресса"** и про "бесконечность материи вглубь..."***.

Еще раньше В.И. Ленин (1908) писал по этому же поводу: "сущность" вещей или "субстанция" *тоже* относительны; они выражают только углубление человеческого познания объектов, и если вчера это углубление не шло дальше атома, сегодня – дальше электрона и эфира (теперь надо было бы сказать: электромагнитного поля – *Б.К.*), то диалектический материализм настаивает на временном, относительном, приблизительном характере всех этих *вех* познания природы прогрессирующей наукой человека"****.

В противоположность такому взгляду на процесс познания материи человеческий рассудок имеет тенденцию задерживаться на достигнутой ступени познания, с которой он уже успел освоиться и которая стала для него чем-то привычным, почти обыденным. Соответственно этому он стремится переоценивать долю познанного по сравнению с общим (бесконечным) объемом всего предмета познания. При этом обнаруживается специфическая, парадоксальная ситуация: чем меньше знает человек, тем легче и охотнее он склоняется признать, что он познал уже все до конца, что он овладел абсолютной истиной или близок к ней, что имеющиеся в его распоряжении знания позволяют ему составить исчерпывающую картину мира.

---

* **Ленин В.И.** Полн. собр. соч., т. 29, с. 241.

** Там же, с. 103.

*** Там же, с. 100.

**** Там же, т. 18, с. 277.

Так было, когда сложилась механическая картина мира и соответствующая ей механическая концепция природы материи и ее превращений. Так повторилось, хотя и в несколько ослабленной форме, когда утвердилась электромагнитная картина мира и соответствующая ей односторонняя концепция материи и ее превращений.

Но так не должно быть, когда на смену односторонним концепциям с лежащим в их основе механистическим принципом юкстапозиции пришла двусторонняя, по своему существу диалектическая концепция, сама история возникновения и развития которой направлена против всякой односторонности, против всякого механицизма, столь понятного для человеческого рассудка и легко согласующегося с ним.

Вот почему юбилейные даты в истории науки имеют не только внешнюю, так сказать, официальную сторону, но и глубокий внутренний смысл: показать торжество человеческого разума, который неуклонно движется вперед к познанию истины, преодолевая на своем пути ложные, а иногда и вредные иллюзии, навеянные человеческим рассудком с присущей ему ограниченностью. Уроки прошлого, которые преподает история науки, позволяют понять источники заблуждений ученых и отклонений их мысли от верного пути к достижению истины.

Как было сказано выше, остановка на полдороге к подлинному открытию нередко была обусловлена тем, что исследователь видел новый факт, но не догадывался о его смысле и значении. Это было следствием задержки его мысли на более низком уровне, который вполне воспринимает рассудок, при одновременной неспособности подняться в данном, конкретном случае на более высокий уровень, доступный только разуму. Рассудок же с его склонностью к ограниченности и односторонности может только помешать совершить такой подъем, а тем самым помешать довести открытие до его теоретического завершения, т.е. совершить, собственно говоря, это открытие.

Так в истории научных открытий своеобразно переплетаются две ступени человеческого сознания: более низкая, менее совершенная, которая именуется рассудком, и более высокая, более совершенная, которую называют разумом. Если вся история науки дает такого рода поучительные уроки последующим поколениям ученых, то особенно яркий, впечатляющий характер эти уроки носят в тех случаях, когда они своими нитями уходят в эпохи крупных переломов и революционных переворотов в науке, к числу которых, несомненно, относится и великое трехлетие в ядерной физике, захватившее 1932–1934 гг., и, прежде всего, открытие нейтрона Чадвиком.

Важнейшая предпосылка научного открытия и возможность его осуществления. Суть научной революции. Теперь мы можем ответить на вопрос, что конкретно обусловило самую возможность открытия нейтрона и последующее революционизирующее его воздействие на развитие физики и всего естествознания. При наличии уже необходимого экспериментального материала, полученного Жолио-Кюри, для совершения открытия требовалось участие ученого, способного не просто теоретически мыслить – этой способностью в достаточной мере обладали и супруги Жолио-Кюри, но мыслить *правильно* применительно именно к *данному, конкрет-*

ному случаю. Ученый может быть теоретически мыслящим, но в данном случае придерживаться уже устаревших концепций, исчерпавших себя полностью и требующих выработки принципиально нового подхода к изучаемому объекту. Нередко такой новый подход не просто состоит в отрицании им прежнего подхода, продолжающего еще господствовать в науке, а оказывается в корне противоположным прежнему. В таком случае говорят о *перевороте* в науке, называя его революционным. Такой переворот происходит в сфере мышления путем коренной ломки старого метода понимания и объяснения сущности изучаемых процессов и замены его новым, более совершенным. Для того чтобы показать, что *один и тот же* теоретически мыслящий ученый в одной ситуации может придерживаться правильного подхода, а в другой – неправильного, рассмотрим несколько фактов из истории естествознания.

В качестве первого такого факта укажем на революцию в химии во Франции в конце XVIII в. Как известно, английский химик и философ Дж. Пристли – ученый, несомненно, одаренный теоретическим мышлением, чисто эмпирически обнаружил новый газ – будущий кислород. Но Пристли при всей силе своего мышления все же оставался в плену господствовавшего тогда учения о флогистоне. Поэтому с позиции этого учения он объяснил сделанное им открытие и назвал новый газ, полученный им из воздуха, "дефлогистинированным воздухом", т.е. воздухом, освобожденным, будто бы, от флогистона. В Париже из уст самого Пристли А.Л. Лавуазье узнал об этом открытии и вскоре дал ему совершенно иное теоретическое толкование. Это было подготовлено уже предшествующими работами Лавуазье, начиная с исследования "О природе воды". Своим истолкованием эмпирического открытия Пристли Лавуазье буквально перевернул всю химию "с головы на ноги". В центре химии встал теперь кислород. Кстати сказать, здесь имела место та же последовательность событий, что и при открытии нейтрона, но только англичане и французы как бы поменялись местами: в XVIII в. эмпирическое наблюдение сделал английский ученый, а его теоретическое объяснение дал французский химик. В XX в. эмпирическое наблюдение было сделано во Франции (Жолио-Кюри), а теоретическое объяснение было дано в Англии (Чадвик). Но перемена мест в последовательном ряду событий этим не завершилась. Создав свою кислородную теорию химических процессов, Лавуазье абсолютизировал роль кислорода в них. Это касалось и его трактовки химического состава любых кислот вообще, на что указывало и самое название кислорода как элемента, рождающего кислоту. В этом отношении Лавуазье оказался в плену односторонне понятой, им же созданной теории. Уже после его смерти английский химик Г. Дэви выдвинул гипотезу о кислотах, не содержащих кислорода, в качестве каковых выступала хлористоводородная (соляная) кислота. Это свидетельствовало о том, что даже такой революционер в науке, как Лавуазье, обладавший необычайно высоко развитым теоретическим мышлением, спасовал перед проблемой, выходившей за рамки его теории.

В первой половине XIX в. идеи электрохимизма получили детальнейшее развитие, особенно в трудах Фарадея. Однако И.Я. Берцелиус абсолютизировал такой подход к пониманию органических соединений. Вторая рево-

люция в химии, которая совершилась в конце первой половины XIX в., состояла как раз в разрушении "дуалистической" (электрохимической) теории Берцелиуса и в утверждении новой унитарной теории Жерара. Оба химика – и Берцелиус, и Жерар – были теоретически мыслящими учеными, но существенное различие между ними состояло в том, что первый придерживался неправильного подхода к предмету, а второй – правильного (в конкретных условиях того времени). И снова мы наблюдаем такое явление, что, казалось бы, прогрессивный ученый остается все же в плену устаревших теорий и не может способствовать развитию науки. Так, Жерар, исходя из своей теории типов, категорически отвергал возможность отразить с помощью химической формулы реальную конституцию вещества, на чем всегда настаивал Берцелиус. Однако к концу 50-х годов снова возник вопрос об истинной структуре вещества и отражении ее в виде структурной формулы.

Существенный шаг в этом направлении сделали Кекуле, Каупер и А.М. Бутлеров. Кекуле ввел представление о четырехатомном углероде и натолкнул химиков-органиков на мысль о том, что для всех органических веществ надо придумывать формулы в виде открытых цепей, образованных соединенными между собою атомами углерода. Но это оказалось невозможно сделать для бензола, особенность которого состояла в том, что все шесть атомов углерода, входящих в его молекулу (C_6H_6), были совершенно одинаковы в химическом отношении; это никак нельзя было бы объяснить с помощью формулы в виде открытой цепи: атомы углерода, стоящие на концах цепи, всегда отличны от атомов углерода, стоящих внутри нее. Это же касается и атомов водорода, соединенных с атомами углерода. И только тогда, когда Кекуле отказался от им же выработанной схемы открытых цепей и замкнул цепь из шести атомов углерода в кольцо, он нашел решение залачи.

Между тем назревал новый вопрос: постоянна или переменна валентность каждого элемента. На этот раз Кекуле не сумел занять правильной позиции: он настаивал на постоянстве валентности у элементов. Напротив, Кольбе (противник теоретического мышления в химии) и Д.И. Менделеев (блестящий теоретически мыслящий ученый) опровергли основанную на прежней теории строения концепцию постоянной валентности и доказали ее переменность. В дальнейшем идеи Менделеева привели его к представлению о центральном атоме в сложной молекуле, что явилось преддверием создания А. Варнером теории комплексных соединений.

Что касается Д.И. Менделеева, то вся мощь его теоретического мышления обнаружилась при открытии периодического закона. Как указывал он сам, до него сопоставлялись и объединялись в одну группу (или семейство) лишь близкие химические аналоги. Правда, делались робкие попытки сопоставить несходные между собой элементы, без чего, разумеется, нельзя было бы выработать общей системы всех элементов; однако эти попытки не могли привлечь внимания широких кругов химиков, которые твердо придерживались прежнего подхода. Менделеев выработал принципиально новый подход, основанный на учете взаимосвязи всех элементов между собой и преодолевающий прежнюю изоляцию одних их групп (или семейств) от других. И тот же самый Менделеев на рубеже

XIX и XX вв. направил всю силу своего теоретического мышления на то, чтобы отстоять старую идею о неизменных, неделимых атомах и вечных, не превращаемых друг в друга элементах. Здесь мы опять видим отмеченное уже выше явление, когда один и тот же ученый в различных историко-научных ситуациях то способствует прогрессу науки, то тормозит его.

В прямую противоположность ему в самом начале XX в. Э. Резерфорд (в сотрудничестве с Ф. Содди) выдвинул идею о том, что радиоактивность есть спонтанный распад атомов, сопровождающийся превращением одних химических элементов в другие. За этим открытием последовали другие открытия того же Резерфорда и прежде всего открытие атомного ядра (1911). Сам Резерфорд являл собою замечательный образец блестящего экспериментатора и глубоко теоретически мыслящего ученого.

Открытие атомного ядра состояло в том, что Резерфорд правильно объяснил особенность рассеяния некоторых α-частиц, которыми он бомбардировал атомы известных элементов. Из этого открытия он сделал вывод, что статическая модель Дж. Томсона, открывшего электрон в 1897 г., неправильна и на ее место надо поставить динамическую, или планетарную, модель атома. Однако в другом отношении Резерфорд оставался в плену прежней теории электромагнетизма, согласно которой подобная модель атома оказывалась невозможной.

И снова мы видим, как другой ученый, постигший правильный подход к данной конкретной задаче, – Н. Бор – сумел преодолеть принципиально новым подходом к явлениям электромагнетизма ту трудность, перед которой остановился Резерфорд, отнюдь не терявший способности к теоретическому мышлению, а сохранявший ее полностью.

Приведем еще один, казалось бы, поразительный случай: в 1934 г. Э. Ферми с сотрудниками наблюдали, по-видимому, деление атомного ядра урана с последующими вторичными процессами β-распада. Однако, находясь в плену прежней концепции, согласно которой β-распад есть сдвиг на одно место вправо в периодической системе, они предполагали, что получают только трансурановые элементы. Напротив, О. Ган и Ф. Штрасман, опираясь на правильный, не традиционный подход, разгадали сущность явления, которое наблюдали Ферми с сотрудниками.

Сделаем выводы. Во-первых, можно считать установленным, что при анализе научного творчества мы не имеем дела с какими-то устойчивыми характеристиками, поскольку одни ученые, подойдя вплотную к великому открытию, не смогли разгадать сущности нового опытного факта и объяснить его, сделав тем самым открытие, другие же, напротив, сумели теоретически объяснить новый опытный факт, установленный ими самими или другими учеными. На этом основании нельзя говорить о неспособности первых к теоретическому мышлению и считать это причиной, по которой они не сделали данного открытия. И нельзя эту способность приписывать лишь вторым, объясняя, что лишь в силу данной способности они сумели сделать открытие.

Во-вторых, нередко принимаемые в качестве типологии научного творчества характеристики ученых, начиная с оствальдовской (классики и романтики), строятся на неверной основе, как характеристики в целом

отдельных творческих личностей, но не как характеристики отдельных их элементов. Такие элементы могут быть различными у одной и той же творческой личности и коренным образом изменяться в зависимости от конкретной ситуации, в которой протекает тот или иной творческий процесс. В частности, нельзя говорить, как нам кажется, о выделении продуктивно-стимулятивного и креативного типов крупных ученых, но можно и нужно говорить о соответствующих элементах того и другого рода (в различном их соотношении). Иными словами, нет типа ученых, понимаемого в этом смысле слова, но есть аналогичный тип решения конкретных задач с помощью того или иного конкретного подхода.

В-третьих, причина того, что одни теоретически мыслящие ученые делают научное открытие, а другие его не делают, состоит в том, что делающие открытие пользуются правильным методом объяснения данного явления, а не делающие его, хотя и подходят очень близко к нему, — неправильным.

Значение открытия нейтрона для науки и человечества. Остановимся на краткой итоговой характеристике общего значения для науки и всего человечества открытия нейтрона, сделанного полвека назад Джеймсом Чадвиком.

В *экспериментальном* отношении открытие нейтрона имело поистине великое значение: был получен ядерный снаряд небывало мощной "пробивной силы", для которого не могли служить препятствием большие положительные заряды атомного ядра и который мог легко присоединяться к ядрам различных химических элементов, вызывая самые различные ядерные реакции. Вся атомная (ядерная) энергетика, начиная с деления тяжелого ядра урана, возникла только благодаря открытию нейтрона и в результате его открытия. Именно с момента открытия нейтрона ядерная физика стала подлинной наукой.

В *физико-теоретическом* отношении открытие нейтрона и доказательство его несоставного характера как элементарной частицы позволили совершенно по-иному, нежели до тех пор, поставить и решить проблему строения атомных ядер, упрощая ее соответственно объективной простоте самой структуры материи: вместо усложненной протонно-электронной структуры ядра, приводившей ко многим трудностям, раскрылась ясная и четкая его протон-нейтронная структура, как это показали Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберг. При этом не протон, а именно протон и нейтрон, т.е. нуклон, выступили в качестве исходной элементарной "клеточки" в процессе возникновения более сложных ядерных образований, начиная с дейтрона (ядра ${}^{1}_{2}\mathrm{H}$). Вместе с тем именно открытие нейтрона позволило выделить уже как особый класс группу нуклонов, способных принимать два состояния — заряженное (p^{+}) и нейтральное (n^{0}), что открыло путь к истолкованию внутриядерных сил как сил обменного характера. Это же открытие способствовало выяснению механизма таких процессов, как β-распад. Важно и то, что вместе с гипотезой о нейтрино открытие нейтрона прочно ввело в научный обиход представление об электрической нейтральности некоторой группы элементарных частиц.

В *познавательном* отношении открытие нейтрона и сам ход, сам характер этого открытия вновь и вновь наглядно и убедительно свидетельствовали о громадной роли научной гипотезы в качестве организующей и нап-

равляющей силы в развитии науки, причем такой силы, которая в решающий момент способна подсказать верное решение и указать правильный выход из сложной ситуации. Этим еще раз, применительно к современной физике, было доказано, что гипотеза действительно является формой развития естествознания, поскольку его развитие совершается под воздействием теоретического мышления. Можно смело сказать, что именно гипотеза Э. Резерфорда, выдвинутая в 1920 г., привела Чадвика к открытию нейтрона в 1932 г. Вместе с его открытием сама гипотеза уточнилась, очистилась от привнесенных неизбежно в нее первоначальных субъективных моментов – представления о нейтроне как двойной системе протон – электрон.

Открытие нейтрона еще раз подтвердило, что крупное научное открытие состоит не в эмпирической констатации нового факта, а в его правильном теоретическом объяснении.

В *методологическом* отношении открытие нейтрона особенно интересно тем, что оно впервые с такой убедительностью обнаружило и доказало тот факт, что принцип юкстапозиции (соположения) частиц материи не может считаться абсолютным и универсальным, как это было при двух первых физических концепциях (механической и электромагнитной), но что на ядерно-физическом и более глубоких уровнях ему на смену приходит принцип превращения одного в другое. Соответственно этому на смену понятия готового (оформленного) состояния частиц пришло понятие их виртуального (конкретно возможного) состояния, в каком "существуют" протон и электрон (вместе с антинейтрино) "внутри" нейтрона. В этом заключался дальнейший существенный шаг в развитии "новейшей революции в естествознании", разрушавшей последовательно, этап за этапом, отживший тезис о полном качественном тождестве макро- и микрообъектов и о наличии между ними лишь количественных различий (по масштабу).

В *историко-научном* отношении открытие нейтрона позволило замкнуть цикл развития физики, начавшийся с аналитического расчленения двух сторон объекта изучения, взаимоотрицавших одна другую и приведших к возникновению двух противоположных концепций. Относительное завершение этого процесса произошло путем охвата обеих сторон объекта в единой двусторонней концепции, отражающей "единство противоположной" у самого объекта ("отрицание отрицания"). Явившись относительным завершением предшествовавшего хода (цикла) научного развития, открытие нейтрона одновременно послужило исходным пунктом для последующего, еще более бурного и быстрого развития науки, протекавшего как резкий рывок ядерной физики вперед. Тем самым оно выступило как поворотный пункт в развитии всего современного естествознания, прежде всего физики.

В *научно-психологическом* отношении открытие нейтрона дало богатейший материал для осмысления условий и характера процессов научного творчества, его закономерностей, механизма его протекания, наличия соответствующей, необходимой для него "творческой атмосферы", дающей мысли ученого ориентацию. Вся история открытия нейтрона с его удачами (Чадвик) и неудачами (Жолио-Кюри) свидетельствует о том, что в сфере

научной, творческой деятельности нет каких-либо жестких классификаций и категорий, которые могли бы лечь в основу типологии самих ученых, а имеет место скользящая шкала, когда один и тот же ученый может выступать творчески совершенно по-разному в различных конкретных ситуациях. Решающее значение в каждом конкретном случае имеет способность ученого, проявившаяся в данный именно момент, преодолеть ранее сложившуюся традицию (или подход, метод мышления) и увидеть принципиально новое решение. Открытие нейтрона и его история показали особый случай творческой "дополнительности" (и обычной преемственности) в науке между учителем (Резерфордом) и его учеником и последователем (Чадвиком).

Наконец, в *социальном* отношении открытие нейтрона имело небывало громадное значение для судеб всего человечества. Прежде всего это открытие дало ключ к получению атомной (внутриядерной) энергии как мощного энергетического источника для современного общества, что призвано сыграть исключительно важную роль для создания энергетики будущего. Однако, как и все научные открытия такого рода, открытие нейтрона имело и другую сторону: созданную физиками атомную бомбу американская военщина употребила на уничтожение мирных японских городов. С тех пор, готовя ядерную войну, нынешние заправилы США продолжают наращивать смертоносное ядерное оружие, мечтая включить сюда и нейтронную бомбу, как якобы наиболее "гуманное" оружие, поскольку эта бомба призвана убивать "*только*" (!?) людей, сохраняя в целости материальные строения. Следовательно, по своему "гуманному" действию эта бомба сродни таким изуверским военным средствам уничтожения людей, как современное химическое и бактериологическое оружие. В борьбе против этих изуверских замыслов и зловещих планов современных империалистов во главе с американскими следует помнить, что несчастия человечеству несут не сами по себе научные открытия, такие, как открытие нейтрона, а то, в *чьих* руках они оказываются. Отсюда возникает вопрос о моральной ответственности ученых перед человечеством за сделанные ими открытия: все силы народов и передовых ученых всех стран мира должны быть направлены сейчас на то, чтобы отстоять "мирный нейтрон" и все полезное для людей, что он принес, и не дать милитаристам, помешавшимся на жажде крови, использовать его в качестве убийцы человечества.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Часть первая. **Открытие нейтрона и ядерная физика начала 30-х годов** 5

Воспоминания о поисках нейтрона. *Дж. Чадвик* 6

К биографии Чадвика. *Д.Д. Иваненко* 10

Ранняя стадия изучения частиц космического излучения. *Д.В. Скобельцын* 12

Модель атомного ядра и ядерные силы. *Д.Д. Иваненко* 18

Приложение к статье Д.Д. Иваненко. Оригинальные работы 30-х годов Дж. Чадвика, Д.Д. Иваненко, В. Гейзенберга, И.Е. Тамма, Х. Юкавы 53

Восприятие теории мезонов Юкавы европейскими физиками (воспоминания). *Н. Кеммер* 61

Воспоминания об исследованиях искусственной радиоактивности и свойств нейтрона, проводившихся в Римском университете в 1934–1936 гг. *Э. Амальди* 67

Часть вторая. **Деление ядер** 86

Как было открыто деление урана. *В. Герлах* 86

Дополнения к статье В. Герлаха. *Д.Д. Иваненко* 100

Спонтанное деление тяжелых ядер. *К.А. Петржак, Г.Н. Флеров* 105

Часть третья. **Проблемы современной физики ядра и элементарных частиц** . . . 133

Развитие теоретических представлений о строении атомных ядер после открытия нейтрона. *А.С. Давыдов, Г.Ф. Филиппов* 134

Электрический дипольный момент нейтрона и ультрахолодные нейтроны. *В.М. Лобашев* 165

Открытие нейтрона и физика элементарных частиц. *С.С. Герштейн, А.А. Логунов* 181

Нейтрон и ядерная энергетика. *А.М. Петросьянц* 207

Заключение. Открытию нейтрона – полвека. *Б.М. Кедров* 222

50 ЛЕТ СОВРЕМЕННОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Редактор *Е.В. Сатарова.* Художественный редактор *А.Т. Кирьянов.*
Технический редактор *Г.Н. Лядухина.* Корректор *С.В. Малышева.*
Операторы *Н.С. Потемина, Л.Е. Мещерякова.*

ИБ № 1385

Набор выполнен в Энергоатомиздате на Композере ИБМ-82. Подписано в печать 14.07.82. Т-11135. Формат 60×901/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0 + 0,5 вкл. Усл. кр.-отт. 16,5. Уч-изд. л. 21,55. Тираж 4500 экз. Заказ 1026. Цена 3 р. 50 к.

Энергоатомиздат, 113114 Москва М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

129041, Москва, Б.Переяславская ул., д. 46

3р.60к.