

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКМЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

539[.12.01+.18]

**АТОМЫ И АДРОНЫ**  
**(Проблемы классификации)****Б. Г. Конопельченко, Ю. Б. Румер**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение . . . . .	339
2. Унитарная симметрия адронов . . . . .	340
3. Ортоговальная симметрия химических элементов . . . . .	342
4. Заключение . . . . .	344
Цитированная литература . . . . .	345

## 1. ВВЕДЕНИЕ

К середине XIX века было доказано, что окружающая нас материя состоит из химических элементов различного сорта. Первый шаг к созданию теории строения вещества состоял в классификации большого числа элементов. Феноменологическая классификация была разработана Д. И. Менделеевым (1869 г.). При построении периодической системы элементов Менделеев использовал огромную химическую информацию. Микроскопическое объяснение дали Н. Бор и В. Паули после того как в начале XX века была исследована структура атома.

В физике элементарных частиц проблема классификации возникла, когда выяснилось, что материя в природе состоит не только из протонов, нейтронов (ядра атомов) и электронов (оболочки атомов). Начиная с 40-х годов нашего столетия, в результате совершенствования техники эксперимента обнаруживались все новые и новые типы адронов. К 60-м годам их число стало сравнимым с числом химических элементов, известных Менделееву. Однако информация, которую можно было бы надеяться привлечь для создания системы типа менделеевской, была явно недостаточной.

Гелл-Манн и Нееман<sup>1,2</sup> подошли к проблеме классификации адронов совсем с другой стороны, используя методы теории групп. Эти методы, показавшие свою эффективность еще в кристаллографии (Е. С. Федоров), стали интенсивно внедряться в физику с появлением квантовой механики. На первых порах роль теории групп в квантовой механике была лишь подсобной и состояла, по существу, в исследовании свойств симметрии уравнения Шрёдингера. Однако затем методы теории групп стали самостоятельным разделом современной теоретической физики. Эти методы позволяют, не решая дифференциальные уравнения математической физики, получать информацию об описываемых ими системах. Методы теории групп весьма эффективны и тогда, когда дифференциальные уравнения, описывающие исследуемую систему, вообще неизвестны.

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1979.

Использование теории групп для классификации объектов природы, будь то кристаллы (Федоров), адроны (Гелл-Манн — Нееман) или химические элементы, основывается на представлении, что в основе классификации должна лежать та или иная, свойственная этим объектам, группа симметрии.

Первым примером классификации физических объектов, основанной на теории групп, является классификация кристаллических классов, открытая Е. С. Федоровым (1895 г.). На основе изучения пространственных групп им было показано, что существует конечное число типов кристаллических решеток, а именно 230 типов, которые в свою очередь распределяются по тридцати двум классам.

Следует отметить существенную разницу между групповыми классификациями Федорова и Гелл-Манна — Неемана. Классификация Федорова имеет геометрическую природу и связана с трехмерностью нашего пространства, тогда как классификация адронов связана с внутренней симметрией и отражает свойства внутриадронной динамики. Структура динамики адронов начинает, по-видимому, проявляться только сейчас. В 1961 г., когда Гелл-Манн и Нееман предложили унитарную классификацию, о внутреннем устройстве адронов почти ничего не было известно и они в своих построениях не использовали предположений о структуре элементарных частиц.

Излагаемая в данной заметке классификация химических элементов в этом смысле подобна классификации адронов — она игнорирует знание внутренней динамики атомов и исходит из постулированной группы симметрии. Подчеркнем, что ясное понимание групповой классификации химических элементов связано с четким осознанием того факта, что эта классификация аналогична феноменологической классификации Гелл-Манна — Неемана, а не микроскопической классификации атомов по Бору — Паули. В этой небольшой заметке мы стремимся дать краткое и прозрачное изложение основных идей групповой классификации, не вдаваясь в математические дебри, которые можно найти в оригинальных работах <sup>3-6</sup>.

## 2. УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ АДРОНОВ

Наиболее ярким примером классификации, в основе которой лежат групповые методы, является классификация адронов (Гелл-Манн <sup>1</sup>, Нееман <sup>2</sup>). Группа  $SU(3)$  \*), лежащая в основе этой классификации, — это группа линейных преобразований, оставляющих инвариантной эрмитову форму

$$\bar{Z}_1 Z_1 + \bar{Z}_2 Z_2 + \bar{Z}_3 Z_3,$$

где  $Z_1, Z_2, Z_3$  — комплексные величины, черта означает комплексное сопряжение. В рамках группового подхода объекты, подлежащие классификации, объединяются в определенные семейства, — так называемые мультиплеты.

Каждому  $SU(3)$ -мультиплету сопоставляется тензор  $T_{B_1 \dots B_m}^{A_1 \dots A_n}$  ( $A, B = 1, 2, 3$ ) с определенным типом симметрии в трехмерном комплексном пространстве. В этой классификации каждой независимой компоненте тензора  $T_{B_1 \dots B_m}^{A_1 \dots A_n}$  соответствует адрон, и, следовательно, число адронов

\*) Впоследствии выяснилось, что для классификации адронов необходимо использовать более широкую унитарную группу — группу  $SU(4)$  (возможно, даже  $SU(5)$ ). Ясно, однако, что принципы классификации остаются неизменными для любой унитарной группы.

в  $SU(3)$ -мультиплете равно числу независимых компонент соответствующего тензора. Например, тензор  $T_A$  соответствует мультиплету, содержащему три частицы (кварки). Тензор  $T_B^A$  (где  $\sum_{A=1}^3 T_A^A = 0$ ) описывает октет адронов. Наиболее хорошо исследованные адроны составляют октеты мезонов, октет барионов и декаплет барионов, который описывается симметричным по всем индексам тензором  $T^{(ABC)}$  (10 компонент).

Адроны внутри каждого  $SU(3)$ -мультиплета группируются также в мультиплеты, структура которых определяется более узкой группой  $SU(2)$ .

Удобным геометрическим изображением тензоров  $T_{B_1 \dots B_m}^{A_1 \dots A_n}$  (мультиплетов) являются таблицы, в которых каждой клетке соответствует определенная компонента этих тензоров (и, следовательно, определенный адрон).

В качестве примера мы приводим классификацию адронов, образующих октеты и декаплеты (табл. I).

Таблица I

а) Мезоны

$\eta$	548,8	$\omega$	782,6
$K^-$ $\bar{K}^0$	493,7 497,7	$\Lambda^{*-}$ $\bar{K}^{*0}$	832,2 836,3
$K^0$ $K^+$	497,7 493,7	$\Lambda^{*0}$ $K^{*+}$	836,3 832,2
$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	139,6 135 139,6	$\rho^-$ $\rho^0$ $\rho^+$	765,9 770,2 765,9

б) Барионы

$\Lambda$	1115,6	$\Omega^-$	1672,2
$\Xi^-$ $\Xi^0$	1321,3 1314,9	$\Xi^{*-}$ $\Xi^{*0}$	1535,0 1531,8
$N$ $P$	939,6 938,3	$\Sigma^{*-}$ $\Sigma^{*0}$ $\Sigma^{*+}$	1387,5 1382,0 1382,3
$\Sigma^-$ $\Sigma^0$ $\Sigma^+$	1197,4 1192,5 1189,4	$\Delta^-$ $\Delta^0$ $\Delta^+$ $\Delta^{++}$	1232 1232 1232 1232

В табл. I в каждой клетке приведено обозначение адрона (мезона или бариона), а также его масса в МэВ.

Крупнейшим достижением этой классификации является предсказание декаплетной частицы  $\Omega^-$  (1672,2), вскоре обнаруженной в эксперименте.

Разбиение  $SU(3)$ -мультиплетов на изотопические мультиплеты связано с нарушением  $SU(3)$ -симметрии, механизм которого еще не выяснен.

Адроны внутри каждого  $SU(3)$ -мультиплетта похожи друг на друга — они имеют близкие массы и близки по своим свойствам. В пределе, если бы симметрия была точной, адроны внутри  $SU(3)$ -мультиплетов вели бы себя одинаково. Кроме подобия адронов по вертикали обнаруживается также подобие по горизонтали. Оно состоит в том, что адроны, расположенные в одном и том же горизонтальном ряду таблиц одинаковой размерности, имеют одинаковые заряды и гиперзаряды. В таком смысле эти адроны похожи на химические аналоги в таблице Менделеева.

### 3. ОРТОГОНАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Как мы уже отмечали, таблица химических элементов была создана Менделеевым в результате анализа и систематизации огромной химической информации. Классификация адронов, предложенная Гелл-Манном и Неэманом, использовала гораздо менее обширную феноменологическую информацию, но с самого начала основывалась на постулированной симметрии ( $SU(3)$  и т. п.).

Встает вопрос: не управляет ли закономерностями химических элементов какая-нибудь группа, подобно тому, что группа  $SU(3)$  управляет закономерностями адронов.

При таком подходе мы должны отказаться от имеющейся химической и спектроскопической информации, а также от того, чтобы рассматривать атомы как структурные объекты, состоящие из более элементарных частиц (ядра и электроны). В работе<sup>3</sup> было продемонстрировано, что в основу подобной классификации химических элементов может быть положена группа  $SO(4)$ . Группа  $SO(4)$  — это группа преобразований, оставляющих инвариантной квадратичную форму

$$\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 + \xi_4^2.$$

Так же как адроны в  $SU(3)$ -классификации, химические элементы объединяются в группы —  $SO(4)$ -супермультиплеты. Каждый  $SO(4)$ -супермультиплет описывается тензором

$$T_{nl\nu} \quad (n = 1, 2, \dots, \infty; l = 0, 1, \dots, n - 1; \nu = l, l - 1, \dots, -l)$$

в четырехмерном вещественном пространстве, и каждой компоненте этого тензора сопоставляется определенный химический элемент. Отметим, что задание числа  $n$  для тензора  $T_{nl\nu}$  аналогично заданию типа симметрии тензоров  $T_{B_1 \dots B_n}^{A_1 \dots A_n}$  в группе  $SU(3)$ . Наглядным изображением тензоров  $T_{nl\nu}$  является таблица, заполняемая химическими элементами.

Табл. II, основанная на группе  $SO(4)$ , содержит вдвое меньше клеток, чем существует элементов, так что в каждую клетку попадает по два химических элемента, например, водород и гелий, азот и кислород, марганец и железо, медь и цинк. В то время как в двух последних примерах в одну клетку попадали «похожие» химические элементы, в первых двух примерах в одну и ту же клетку попадают совсем не похожие элементы. Более глубокий анализ показывает, что это явление «удвоения» числа классифицируемых объектов по сравнению с имеющимся в таблице числом мест связано с тем, что группа  $SO(4)$  не полностью описывает систему элементов и должна быть расширена до группы  $Spin(4)$ <sup>3</sup> или группы  $SO(2,4)$ <sup>4</sup>, которые полностью описывают закономерности таблицы элементов. Описание группы  $Spin(4)$  или  $SO(2,4)$  требует привлечения изрядного количества математики, что вывело бы нас за пределы небольшой заметки. Поэтому на этом вопросе мы здесь останавливаться не будем и в дальнейшем для простоты будем говорить о группе  $SO(4)$ .



Числами  $n = 1, 2, 3, \dots$  в табл. II обозначены  $SO(4)$ -супермультиплеты, которые расположены вертикально. Каждый супермультиплет состоит из определенного числа (а именно  $n$ )  $SO(3)$ -мультиплетов. Мультиплеты в свою очередь состоят из  $2l + 1$  клеток (с учетом удвоения  $2(2l + 1)$ ), в которых помещаются химические элементы. Таким образом, «адрес» каждого элемента задается тремя числами  $n, l, v$  (где  $v = l, l - 1, \dots, -l$ ). При учете удвоения вместо одной клетки возникает две  $(n, l, v, +)$  и  $(n, l, v, -)$ . В каждой клетке содержатся, кроме обозначаемого элемента, и все его возбужденные состояния, изотопы и т. п. Можно надеяться, что более тонкие классификации, основанные на более сложных группах, позволят отделить изотопы и возбужденные состояния.

Отличие табл. II от таблицы Менделеева состоит в явном учете группы симметрии, управляющей закономерностями системы химических элементов. В то время как в первоначальном варианте таблицы Менделеева на все актиниды и лантаниды приходилось по одной клетке и их выносили за таблицу, в табл. II они полностью заполняют два мультиплета. Элементы, расположенные по одной горизонтали, являются химическими аналогами. В частности, актиниды являются химическими аналогами лантанидов. Это свойство химических элементов аналогично свойству адронов, которое отмечено выше. Подобие элементов внутри мультиплетов наблюдается для лантанидов и актинидов ( $l = 3$ ). Это свойство менее ярко выражено для мультиплетов с  $l = 2$ , а для  $l = 0, 1$  оно исчезает. Для адронов такое сходство имеется внутри каждого мультиплета. Подчеркнем, что когда речь идет о сходстве внутри мультиплетов, для адронов надо иметь в виду энергетические характеристики (масса), а для химических элементов — химические свойства (в частности, валентность или, скорее даже, химическую активность). Если не принимать это во внимание, то может возникнуть ложное представление о том, что в основу предлагаемой классификации химических элементов по  $SO(4)$ - и  $SO(3)$ -мультиплетам положена их близость по массам (хотя в табл. II такая близость по массам и наблюдается). Отметим, что в обоих случаях совокупности допустимых мультиплетов бесконечны. К настоящему времени заполнено лишь небольшое число таких мультиплетов. Свободные клетки (и мультиплеты) соответствуют, по-видимому, очень нестабильным адронам и химическим элементам.

В настоящей заметке мы изложили лишь основные черты групповой классификации химических элементов. Детальный анализ возникающих в рамках такой классификации групп и квантовых чисел, правил размещения химических элементов по изготовленным клеткам и подробное обсуждение физико-химических свойств элементов содержится в работах <sup>3-6</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы видим, что метод классификации, основанный на теории групп, применим к двум различным типам объектов: адронам и химическим элементам. В то время как математический аппарат классификации в обоих случаях одинаков, свойства объектов, подлежащие классификации, существенно различны: для адронов — это физические свойства (масса), для химических элементов — это химические свойства. Аналогия между системами адронов и химических элементов представляется нам глубокой и может быть развита в самых разных направлениях.

Рассмотрим адроны и химические элементы с этой точки зрения. И к тем, и к другим применим групповой метод классификации, соответствующий феноменологическому уровню знаний. Однако лишь в случае

химических элементов мы знаем законы внутренней динамики атомов (квантовая механика). Внутренняя же динамика адронов в настоящее время только начинает проясняться (квантовая хромодинамика). Пример системы химических элементов указывает возможное соотношение между феноменологическим описанием на групповом языке и точным описанием (квантовая механика), помогает понять общие закономерности, не зависящие от конкретной природы объектов. Возможно, в принципе, выяснить, например, какую информацию о внутренней динамике несет группа, с помощью которой эти объекты могут быть классифицированы; каково динамическое происхождение квантовых чисел. Список подобных вопросов легко может быть продолжен.

Опираясь на такое исследование, которое может быть доведено до конца для системы химических элементов, можно попытаться выяснить некоторые общие черты внутренней динамики для другой системы объектов — для адронов.

Мы видим, таким образом, что метод классификации, основанный на группах симметрии, открывает новые возможности в познании свойств физических объектов.

Институт ядерной физики СО АН СССР  
Новосибирск

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Gell-Mann M. Report CTSL-20.— California Inst. of Technology, 1961.
2. Neeman Y.— Nucl. Phys., 1961, v. 26, p. 222.
3. Румер Ю. Б., Фет А. И. ТМФ, 1971, т. 9, с. 203.
4. К о н о п е л ь ч е н к о Б. Г. Препринт ИЯФ СО АН СССР 40—72.— Новосибирск: 1972.
5. Фет А. И. ТМФ, 1975, т. 22, с. 323.
6. В у а к о в V. M., К у л а к о в V. I., R u m e r Y. B., F e t A. I. Group-theoretical Classification of Chemical Elements: Preprints ITEP No. 26—I. Physical Foundations, N 90—II. Description of Applied Groups (1976); N 7—III. Comparison with the properties of Elements (1977).