

10

И Н С Т И Т У Т ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

ПРЕПРИНТ И Я Ф 32 - 73

Б.Г.Конопельченко, Ю.Б.Румер

АТОМЫ И АДРОНЫ (ПРОБЛЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ)

Новосибирск

1973

АТОМЫ И АДРОНЫ (ПРОБЛЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ)

Б.Г.Конопельченко, Ю.Б.Румер

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждаются групповые основы классификации химических элементов, рассматриваемых аналогично адронам, как бесструктурные элементарные частицы.

В начале XX века атомарное строение материи перестало быть научной гипотезой и стало твердо установленным фактом. Окружающая нас материя оказалась построенной из различного сорта атомов (82 сорта - от водорода до урана). Первый шаг к созданию теории строения вещества состоял в классификации атомов. Построение системы химических элементов, начатое Д.И. Менделеевым в 1869 году и завершенное после открытия квантовой механики в 1925 году (в работах Бора и Паули), является первым примером успешной классификации, открывающей новые пути познания природы. При построении системы химических элементов Менделеев использовал огромную информацию о поведении тех или иных атомов в различных химических реакциях. После открытия квантовой механики оказалось возможным дополнительно к химической привлечь обширную спектроскопическую информацию.

Уверенности физиков в том, что вся материя в космосе состоит из протонов и нейтронов (ядра атомов) и электронов (оболочки атомов) был нанесен удар открытием в космических лучах нового типа материи - адронов. Начиная с тридцатых годов в результате совершенствования техники эксперимента, обнаруживались все новые и новые типы адронов. Число различного типа адронов к пятидесятым годам нашего столетия значительно превысило число химических элементов, известных Менделееву. Естественно возникла потребность в классификации адронов. Однако информации, которую можно было бы надеяться привлечь для создания системы типа менделеевской, было явно недостаточно.

Подойти к проблеме классификации адронов пришлось совсем с другой стороны, используя новые математические методы познания природы. Дело в том, что с появлением квантовой механики в физику стали внедряться новые математические методы, связанные с так называемой теорией групп. Методы теории групп позволяют, не решая дифференциальные уравнения математической физики, получать информацию об описываемых ими системах. Роль теории групп в квантовой механике была лишь подобной и состояла по существу в исследовании свойств симметрии уравнения Шредингера. Однако к пятидесятым годам методы теории групп в значительной степени отпочковались от классических и стали самостоятельным методом современной теоретической физики. Основное отличие методов теории групп от классических состоит в том, что они дают не только количественную запись, обнаруженных на опы-

те закономерностей, но и качественную информацию о строении исследуемой системы.

Теория групп исходит из представления, что в основе любой классификации объектов природы, будь-то кристаллы (Федоров), адроны (Гелл-Манн) или атомы химических элементов, лежит та или иная группа.

$$x \quad x \quad x$$

Первым примером классификации, основанной на теории групп, является классификация кристаллических классов, открытая Е.С.Федоровым (1895г.). 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.

Наиболее ярким примером классификации, в основе которой лежат групповые методы, является классификация адронов (Гелл-Манн, 1961). Группа $SU(6)$, лежащая в основе этой классификации, - это группа линейных преобразований, оставляющих инвариантной эрмитову форму

$$\bar{z}_1 z_1 + \bar{z}_2 z_2 + \bar{z}_3 z_3 + \bar{z}_4 z_4 + \bar{z}_5 z_5 + \bar{z}_6 z_6$$

где z_1, \dots, z_6 комплексные величины, \bar{z}_i - комплексно сопряжены z_i .

В теории групп показано, что подлежащие классификации объекты, которые управляются группой $SU(6)$ объединяются в определенные семейства - так называемые супермультиплеты ("улицы").

Каждому $SU(6)$ супермультиплету сопоставляется тензор $T_{B_1 \dots B_m}^{A_1 \dots A_n}$ ($A, B = 1 \dots 6$) с определенным типом симметрии в шестимерном комплексном пространстве. В этой классификации каждой независимой компоненте ("квартире") тензора $T_{B_1 \dots B_m}^{A_1 \dots A_n}$ соответствует адрон и следовательно, число адронов в $SU(6)$

супермультиплете равно числу независимых компонент соответствующего тензора. Например, тензор T_A соответствует супермульти-

плету, содержащему шесть частиц (кварков). Тензор T_{AB}^A (где $\sum_{A=1}^6 T_A^A = 0$) описывает 35- супермультиплет мезонов. Наиболее хорошо исследованные барионы составляют три супермультиплета: 20 - супермультиплет, который описывается антисимметричным во всех индексах тензором $T^{[ABC]}$, 56 - супермультиплет (симметричный во всех индексах тензор $T^{\{ABC\}}$) и 70- супермультиплет (тензор $T^{\{A[B]C\}}$), симметричный в индексах A, B и антисимметричный в индексах B, C).

Адроны внутри каждого $SU(6)$ -супермультиплета ("улицы") группируются также в мультиплеты. "дома"), структура которых определяется более узкой группой $SU(3)$. В первоначальной классификации Гелл-Манна, основанной на группе $SU(3)$, производилась классификация только по отдельным "домам" (мультиплеты), не объединенные в "улицы" (супермультиплеты).

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

В качестве примера мы приводим классификацию адронов, образующих 20, 56 и 70 супермультиплеты.

Таблица 1

В таблице 1 в каждой клетке помещается, вообще говоря, несколько адронов - членов так называемых изотопических мультиплетов. Числа в клетках обозначают среднюю массу адронов в Мэв, ах ($1 \text{ Мэв} = 10^6$ электронвольт), принадлежащих одному изотопическому мультиплету. Числа $\underline{1}$, $\underline{3}$, $\underline{5}$ обозначают спин адронов, находящихся в одном "доме". В формулах под таблицей показано, каким образом из "домов" с определенным числом "квартир" и с определенным спином строятся "улицы". В таблице 1 приведено четыре октета и два декуплета. Справа от таблицы приводятся обозначения частиц, составляющих крайние слева октет и декуплет. В октете содержится два нуклона (N), одна Λ -частица, три Σ -частицы и две Ξ -частицы. Соответственно, в декуплете имеется четыре Δ -частицы, три Σ^* -частицы, две Ξ -частицы и одна Ω - частица.

Крупнейшим достижением этой классификации является предсказание декуплетной частицы Ω_c (1672), вскоре обнаруженной в эксперименте. Пустые места в таблице соответствуют еще неоткрытым частицам, поиск которых, по-видимому, затруднен их сильной радиоактивностью.

Разбиение "улиц" (супермультиплетов) на "дома" (мультиплеты) связано с нарушением $5U/6$ симметрии, механизм которого еще не выяснен. Адроны внутри каждого "дома" похожи друг на друга, в том смысле, что в пределах точной симметрии они ведут себя одинаково. Кроме вертикального подобия адронов имеется также горизонтальное подобие. Оно состоит в том, что адроны, расположенные в одном и том же горизонтальном ряду имеют одинаковые заряды, гиперзаряды и одинаковым образом вступают в реакции (равны соответствующие матричные элементы переходов). В этом смысле эти адроны похожи на химические аналоги в таблице Менделеева.

Термин элементарные частицы, применяемый к адронам, свидетельствует о том, что в физике они появились как бесструктурные объекты. Однако дальнейшие исследования показали, что они гораздо более похожи на составные атомы нежели на элементарные электроны. Гипотеза кварков является одной из попыток отразить структурность адронов. Хотя кварки не наблюдались пока экспериментально, некоторые опыты подтверждают следствия, вытекающие из гипотезы о структурности адронов. В отличие от электронов, которые являются наблюдаемыми объектами, кварки, по-видимому, не соответствуют реальным объектам. Кварки, скорее всего, являются коллективными возбуждениями адронной структуры и не существуют вне адронов. В этом смысле они являются квазичастицами, подобно фононам, магнонам и т.п.

x x x

Как мы уже отмечали, таблица химических элементов была создана Менделеевым в результате анализа и систематизации огромной химической информации. Классификация адронов, предложенная Гелл-Манном, основана на другом подходе, не требующем обширной феноменологической информации.

Встает вопрос: не управляет ли закономерностями периодической системы химических элементов какая-нибудь группа, подобно тому, как группа $SU(6)$ 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).

Всем хорошо известна роль атома водорода в построении таблицы химических элементов. Одним из важных свойств атома водорода является скрытая $SO(4)$ симметрия, обнаруженная Б.А.Фоком в 1935 году. Преобразования группы $SO(4)$ составляют инвариантной квадратичную форму

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

Это четырехмерное пространство Фока никак не связано с четырехмерным пространством Минковского и не следует рассматривать его как некоторое расширение трехмерного пространства путем добавления четвертой координаты до четырехмерного.

Фоковская симметрия шире сферической и отражает свойства кулоновского потенциала. В сложных атомах из-за взаимодействия между электронами $SO(4)$ симметрия нарушается.

Этим не ограничивается роль группы $SO(4)$ в теории атомов. Группа $SO(4)$ лежит в основе классификации /1/ химических элементов, построенной на принципах, аналогичных принципам классификации адронов.

Так же как в $SU(6)$ классификации, химические элементы объединяются в группы — $SO(4)$ супермультиплеты. Каждый $SO(4)$ — супермультиплет описывается тензором

$$T_{nev} \quad (n = 1, 2, \dots; \quad e = 0, 1, \dots, n-1; \quad v = e, e-1, \dots, -e)$$

в четырехмерном вещественном пространстве и каждой компоненте этого тензора сопоставляется определенный химический элемент. Отметим, что заданные числа n для тензоров T_{nev} эквивалентно заданию типа симметрии тензоров

$T_{A_1 \dots A_n}$
 $T_{B_1 \dots B_m}$
 тензоров $T_{ne\nu}$
 ментами.

в группе $SU(6)$. Геометрическим изображением
 является таблица, заполняемая химическими эле-
 ментами.

	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	
	$\begin{matrix} H \\ He \end{matrix}$	$\begin{matrix} Li \\ Be \end{matrix}$	$\begin{matrix} Na \\ Mg \end{matrix}$	$\begin{matrix} K \\ Ca \end{matrix}$	$\begin{matrix} Rb \\ Sr \end{matrix}$	$\begin{matrix} Cs \\ Ba \end{matrix}$	$\begin{matrix} Fr \\ Ra \end{matrix}$	$\begin{matrix} Ia \\ IIa \end{matrix}$ } l=0
∇		$\begin{matrix} B \\ C \\ N \\ O \\ F \\ Ne \end{matrix}$	$\begin{matrix} Al \\ Si \\ P \\ S \\ Cl \\ Ar \end{matrix}$	$\begin{matrix} Ga \\ Ge \\ As \\ Se \\ Br \\ Kr \end{matrix}$	$\begin{matrix} In \\ Sn \\ Sb \\ Te \\ J \\ Xe \end{matrix}$	$\begin{matrix} Tl \\ Pb \\ Bi \\ Po \\ At \\ Rn \end{matrix}$		$\begin{matrix} IIIb \\ IVb \\ Vb \\ VIb \\ VIIb \\ VIIIb \end{matrix}$ } l=1
∇			$\begin{matrix} Sc \\ Ti \\ V \\ Cr \\ Mn \\ Fe \\ Co \\ Ni \\ Cu \\ Zn \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y \\ Zr \\ Nb \\ Mo \\ Tc \\ Ru \\ Rh \\ Pd \\ Ag \\ Cd \end{matrix}$	$\begin{matrix} La \\ Hf \\ Ta \\ W \\ Re \\ Os \\ Ir \\ Pt \\ Au \\ Hg \end{matrix}$	$\begin{matrix} Ac \\ Krc \end{matrix}$		$\begin{matrix} IIIa \\ IVa \\ Va \\ VIa \\ VIIa \\ VIIIa \\ IXa \\ Xa \end{matrix}$ } l=2
∇				$\begin{matrix} Ce \\ Pr \\ Nd \\ Pm \\ Sm \\ Eu \\ Gd \\ Tb \\ Dy \\ Ho \\ Er \\ Tu \\ Yb \\ Lu \end{matrix}$	$\begin{matrix} Th \\ Pa \\ U \\ Np \\ Pu \\ Am \\ Cm \\ Bk \\ Cf \\ Es \\ Fm \\ Mv \\ Lw \end{matrix}$			$\begin{matrix} Ib \\ IIb \end{matrix}$ } l=3

Т а б л и ц а 2

Таблица, 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 попали "похожие" химические элементы, в первых в двух примерах в одну и ту же 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 $Spin/4/1/$ или группы $SO/2,4/1/2/$, которые полностью описывают закономерности таблицы элементов. 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 таблице 2 обозначены $SO/4/$ супермультиплеты /"улицы"/, которые расположены вертикально. Каждый супермультиплет состоит из определенного числа (а именно n) $SO/3/$ - мультиплетов /"домов". Мультиплеты, в свою очередь, состоят из $2e+1$ клеток ("квартир") (с учетом удвоения $2/2e+1$), в которых помещаются химические элементы. Таким образом, "адрес" каждого элемента задается тремя числами n, e, v (где $v = e, e-1, \dots, 1$). При учете удвоения вместо одной клетки возникает две $(n, e, v; +)$ и $(n, e, v; -)$. В каждой "квартире" содержатся кроме обозначенного элемента и все его возбужденные состояния, изотопы и т.п. Знаки $>$, $<$ слева от таблицы связаны с использованием группы $Spin(4)$, которую мы в этой статье не рассматриваем.

Сужение группы $SO/4/$ в группу $SO/3/$ аналогичное сужению группы $SU/6/$ в группу $SU/3/$ приводит к разбиению "улиц" ($SO/4/$ - супермультиплетов) на отдельные "дома" ($SO/3/$ - мультиплеты).

Отличие таблицы 2 от таблицы Менделеева состоит в явном учете группы симметрии, управляющей закономерностями системы химических элементов. В то же время как в таблице Менделеева на все актиниды и лантаниды приходится по одной клетке и их

выносят за таблицу, то в таблице 2 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 ($\ell = 3$). Это свойство менее ярко выражено для мультиплетов с $\ell = 2$, а для мультиплетов с $\ell = 0, 1$ оно исчезает. В современной теории атома показано, что химическое подобие лантанидов (актинидов) связано с тем, что они имеют одинаковое число электронов на внешних оболочках. Для адронов такое сходство имеется внутри каждого $5u(3)$ мультиплета. В то время как среди адронов подавляющее большинство частиц является радиоактивными, лишь некоторые химические элементы радиоактивны. Такое смещение свойств адронов по отношению к химическим элементам в сторону большего подобия частиц внутри мультиплетов и большей радиоактивности связано, по-видимому, с переходом на другой уровень материи. Рассмотренная аналогия между атомами и адронами может служить источником различных гипотез об устройстве адронов.

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

Л и т е р а т у р а

1. Ю.Б.Румер, А.И.Фет. Журнал "Теоретическая и математическая физика", 9, 203 (1971).
2. Б.Г.Конопельченко. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 40-72, Новосибирск, 1972.

Ответственный за выпуск С.Н.Роднонов
Подписано к печати 16.1У-73г. № МН 08188
Усл. 0,5 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 32

Отпечатано на ро-апринте в ИЯФ СО АН СССР