

ТЕОРИЯ МЕЗОТРОНА И ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ ¹⁾

И. Е. Тамм, Москва

Как известно, предположение о существовании мезотронов, как частиц с массой в несколько сот раз большей массы электрона, было впервые высказано Юкавой еще задолго до их экспериментального обнаружения. К этому предположению Юкава пришел после неудачи многочисленных попыток построения теории ядерных сил, т. е. сил, действующих между тяжелыми частицами (протоны, нейтроны), в которых предполагалось, что эти силы возникают потому, что тяжелые частицы обмениваются легкими частицами (электронами и позитронами). Уже тот факт, что существование мезотронов пришлось постулировать еще до их обнаружения, свидетельствует о необычайно важной роли мезотронов в теории ядерных сил.

Далее, в области космических лучей накопилось большое число фактов, указывающих на существенную роль, которую играют мезотроны в процессах, происходящих при прохождении космических лучей через вещество. Например, столь фундаментальный факт, как наличие на поверхности земли значительной интенсивности космических лучей, не может быть понят без учета роли мезотронов. В сущности, только с открытием мезотронов сделались возможными попытки построения стройной картины прохождения космических лучей в атмосфере. Правда, в настоящий момент построение этой картины еще не закончено, есть еще много неясных и неисследованных вопросов, однако центральная роль мезотронов во всех вопросах физики космических лучей видна уже с полной отчетливостью.

В настоящее время установлено, что масса мезотрона составляет примерно двести электронных масс; заряд мезотрона по абсолютной величине равен элементарному заряду и бывает обоих знаков (положительный и отрицательный мезотроны).

Помимо заряда и массы, третьей основной величиной, характеризующей частицу, является ее спин. До настоящего времени определить спин мезотрона экспериментальным путем еще не удалось.

¹⁾ Доклад на Совещании по атомному ядру, организованном Физико-математическим отделением Академии наук СССР в Москве, 20—26 ноября 1940 г. (см. в этом выпуске стр. 241). Текст печатается по записи доклада, сделанной В. Г. Левичем и просмотренной докладчиком.

В теории Юкавы предполагается, что спин мезотрона равен единице. Это предположение принимается, как некоторая рабочая гипотеза, почти всеми исследователями, хотя прямых подтверждений ее пока нет.

Изучение свойств мезотронов в космических лучах показало, что мезотроны являются неустойчивыми и спонтанно распадаются, повидимому, на электрон и нейтрино (или позитрон и нейтрино). Время распада покоящегося мезотрона составляет примерно $2 \cdot 10^{-6}$ сек., время же распада движущихся мезотронов растет как $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Имеющиеся эксперименты приводят к существенной трудности в вопросе о распаде мезотронов. Именно, в большей части произведенных до настоящего времени измерений не обнаружены в должном количестве электроны распада. Однако, ни один из проведенных опытов не является окончательным, и вопрос о механизме и продуктах распада мезотронов требует дальнейших, более точных исследований.

Несомненно, что вопрос о распаде мезотронов является одним из наиболее важных и актуальных вопросов физики космических лучей.

Из того, что мезотроны оказываются неустойчивыми и спонтанно распадаются, вытекает непосредственно, что они не могут приходить на Землю из мирового пространства, так как при этом все они успевали бы распасться по пути. Поэтому необходимо принять, что они образуются в верхних слоях атмосферы другими частицами или γ -лучами, входящими в состав космического излучения. Непосредственные измерения широтной зависимости проникающей компоненты космических лучей подтверждают предположение об образовании мезотронов в верхних слоях атмосферы.

Вопрос об образовании мезотронов является в настоящее время центральной проблемой физики космических лучей. Механизм генерации мезотронов еще не исследован. Одним из вероятных процессов, приводящих к образованию мезотронов, следует, повидимому, считать процесс типа $p + h\nu \rightleftharpoons n + \mu^+$ или типа $n + h\nu \rightleftharpoons p + \mu^-$, где $h\nu$ — γ -квант, p — протон, n — нейтрон и μ^+ и μ^- — соответственно положительный и отрицательный мезотроны.

Однако, такой механизм приводит к следующей трудности: если определить из известного числа фотонов, протонов и нейтронов в верхних слоях атмосферы и из числа образующихся в них мезотронов эффективный поперечник этого процесса, то с помощью принципа микроскопической обратимости можно найти также и поперечник обратного процесса. Обратный процесс представляет, очевидно, захват мезотронов тяжелыми частицами. При этом оказывается, что полученный эффективный поперечник захвата слишком велик и приводил бы к значительно большему поглощению мезотронов при прохождении через вещество, чем это имеет место в действительности. Поэтому можно считать, что вопрос о механизме генерации мезотронов является еще совершенно открытым и требует дальнейшего изучения.

Следующей важной проблемой физики космических лучей является изучение ионизационных толчков, вызываемых мезотронами, а также состав и энергетический спектр космических лучей на больших глубинах. Особенный интерес представляет вопрос о генерации легких частиц (электронов, позитронов) или фотонов быстрыми мезотронами.

Как показывает теория, вероятность образования легких частиц и фотонов при прохождении мезотронов через вещество существенно зависит от спина мезотрона. Характерной особенностью частиц со спином единица является их способность передавать в одном акте значительную долю своей энергии легким частицам.

Существующие экспериментальные данные как будто бы благоприятствуют предположению о том, что спин мезотрона равен единице. Именно, существует, повидимому, ряд процессов, как, например, ионизационные толчки Гофмана, в которых мезотрон передает огромную энергию легкой частице, образующей затем большой ливень, содержащий несколько сот частиц. Далее, о том же свидетельствует, повидимому, рост процента мягкой компоненты на больших глубинах. Однако, степень точности полученных данных еще очень невелика, и экспериментальное уточнение их чрезвычайно желательно.

В ядерной физике мезотрон играет не меньшую роль, чем в космических лучах. Это связано с тем, что согласно теории ядерных сил, впервые предложенной Юкавой и развитой затем работами Гейтлера, Кеммера, Баба и ряда других, взаимодействие тяжелых частиц в ядре осуществляется с помощью «мезотронного поля», подобно тому, как электрическое (кулоново) взаимодействие частиц осуществляется с помощью «поля фотонов».

Согласно теории Юкавы, протон может превращаться в нейтрон, испуская положительный или поглощая отрицательный мезотрон, а нейтрон может превращаться в протон с помощью обратного процесса.

Взаимодействие тяжелых частиц друг с другом, по Юкаве, связано с рядом последовательных превращений протона в нейтрон и обратно: протон, испуская положительный мезотрон, превращается в нейтрон. Испущенный мезотрон поглощается нейтроном, который превращается в протон и т. д. При испускании отрицательных мезотронов превращения идут в обратном порядке.

Так как с переносом мезотронов от одной ядерной частицы к другой связан также и перенос энергии, то такой обмен мезотронами приводит к энергетическому взаимодействию между тяжелыми частицами.

Процесс этот формально совершенно аналогичен процессу обмена фотонами, приводящему к кулонову взаимодействию между заряженными легкими частицами.

Как показывают теоретические расчеты, потенциальная энергия такого взаимодействия в самом общем случае имеет вид

$$U \sim \frac{e^{-\frac{r}{\lambda_0}}}{r^n},$$

где r — расстояние между частицами, n — целая степень, а λ_0 — комптоновская длина волны частицы, переносящей взаимодействие

$$\lambda_0 = \frac{\hbar}{m_0 c},$$

где m_0 — ее покоящаяся масса.

В частности, для взаимодействия двух электрических зарядов, осуществляемого обменом фотонами, $m_0 = 0$, $\lambda_0 = \infty$ и $n = 1$, так что получается закон Кулона

$$U \sim \frac{1}{r}.$$

Для взаимодействия двух магнитных диполей, также осуществляемого фотонами, $m = 0$, $\lambda_0 = \infty$, но $n = 3$ и т. д.

В случае тяжелых частиц энергия взаимодействия очень быстро убывает с расстоянием. Действие ядерных сил простирается на расстояния порядка размеров ядра r_0 , т. е. 10^{-13} см.

Чтобы взаимодействие обрывалось на расстоянии порядка r_0 , необходимо, очевидно, чтобы λ_0 была порядка r_0 . При этом для массы частицы, переносящей взаимодействие, получается значение

$$\mu \sim 200m,$$

где m — масса электрона.

Такая оценка массы мезотрона находится в хорошем согласии с опытом.

В теории Юкавы радиоактивный β -распад связывается с распадом мезотронов. β -распад протекает по следующей схеме: тяжелая частица, например, протон, испускает отрицательный мезотрон, превращаясь при этом в нейтрон, тогда как испущенный мезотрон распадается на электрон и нейтрино.

Поскольку все ядра при β -распаде изменяют спин на целое число, спин мезотрона должен быть целым.

Далее, чтобы объяснить экспериментально установленную зависимость ядерных сил протон-нейтрон от спинов обеих частиц, необходимо допустить, что спин мезотрона отличен от нуля. Поскольку спин целый, естественно допустить, что он равен единице (предположение, что спин равен 2, повело бы к существенным осложнениям).

Теория Юкавы, усовершенствованная другими авторами, дает весьма ценные качественные результаты и правильно рисует качественный ход ядерных процессов. Однако, уже сейчас ясно, что в количественном отношении она ни в какой мере не согласуется с опытом. Уже сейчас эта теория приводит к ряду трудностей, заставляющих ставить вопрос о полном пересмотре ее. В качестве примера подобного рода трудностей И. Е. Тамм привел следующие.

Теория не может объяснить существование сил притяжения протон — протон, реальность которых была доказана экспериментально. Для объяснения сил протон — протон приходится постулировать существование нового вида частиц — нейтральных мезотронов — обстоятельство, представляющее существенный недостаток теории.

Далее, взаимодействие ядерных частиц, осуществленное обменом мезотронов со спином единица, аналогично взаимодействию магнитных диполей. Поэтому показатель степени n в выражении для потенциальной энергии ядерных частиц равен трем, так что

$$U \sim e \frac{\frac{r}{\lambda_\mu}}{r^3},$$

где λ_μ — комптоновская длина волны мезотрона.

Однако, такой закон для потенциальной энергии не может быть справедлив вплоть до $r=0$. Можно показать, что возрастание потенциальной энергии пропорционально $\frac{1}{r^3}$ при $r \rightarrow 0$ привело бы к падению тяжелых частиц друг на друга. Поэтому необходимо допустить, что при малых расстояниях, при r , меньших некоторого критического расстояния $r_{кр}$, современная теория более несправедлива и что при $r < r_{кр}$ рост потенциальной энергии прекращается.

Величина $r_{кр}$ должна быть введена в теорию как некоторая постоянная. Кроме того, в закон взаимодействия мезотрона с тяжелыми частицами входят еще четыре произвольных постоянных. Значения этих пяти постоянных могут быть выбраны так, чтобы теория давала наилучшее объяснение известных опытных фактов. Однако и этой широты произвола оказывается недостаточно для непротиворечивого объяснения всех наблюдаемых явлений. Поэтому производятся многочисленные попытки «подправки» теории. Самый характер этих «подправок» указывает на чрезвычайно неблагоприятное положение в теории. Например, Бете предлагает объяснять ядерные силы с помощью одних лишь нейтральных мезотронов, не имеющих ничего общего с заряженными мезотронами, наблюдающимися в космических лучах. При этом, в частности, остается совершенно непонятным существование магнитного момента нейтрона. Гейтлер предлагает постулировать существование протонов с различными зарядами $+2$, $+1$, -1 и различными спинами: $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{6}{2}$ и т. п. Меллер и Розенфельд предлагают допустить существование двух сортов мезотронов с различными уравнениями движения и различными периодами распада и т. д.

Но даже с помощью таких произвольных и далеко идущих предположений удастся качественно объяснить лишь ограниченный круг фактов, относящихся к космическим лучам и ядерным силам.

Все эти трудности, стоящие перед теорией мезотрона, имеют своим источником специфические свойства частиц со спином 1. В связи с этим И. Е. Таммом были исследованы особенности поведения частицы со спином, равным единице. Для этого было проведено точное решение уравнений движения частицы со спином 1 (уравнение Прока) в кулоново поле, т. е. решена задача, аналогичная задаче об атоме водорода для электрона.

Это исследование привело к совершенно неожиданному результату: оказалось, что частица со спином 1 движется в кулоновом

поле с потенциалом $\frac{1}{r}$ так, как частица со спином $1/2$ или 0 двигалась бы в поле с потенциалом $\frac{1}{r^3}$. Именно, в кулоновом поле $\frac{e^2}{r}$ у частицы со спином 1, наряду со стационарными состояниями обычного типа, существуют также «аномальные» решения уравнений движения, соответствующие либо «падению» частиц на заряд, создающий кулоново поле, либо излучение частиц этим зарядом.

Причина, приводящая к такому различию в поведении частиц со спином 1 и $1/2$ в кулоновом поле, состоит в следующем.

В теории Дирака при нерелятивистских скоростях электрон движется как частица с зарядом и собственным («спиновым») магнитным моментом. Однако, при больших скоростях электрон в теории Дирака ведет себя как точечный заряд без всякого собственного магнитного момента.

В отличие от электрона частица со спином 1 и в релятивистской области движется как частица, обладающая собственным магнитным моментом. В этом смысле ее можно уподобить истинному магнитному диполю.

Согласно известному соотношению теории относительности частица с магнитным моментом $\mathbf{m}$ приобретает при движении также и определенный электрический момент $\mathbf{p}$, равный

$$\mathbf{p} = -\frac{[\mathbf{v} \cdot \mathbf{m}]}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где $\mathbf{v}$ — скорость частицы.

При больших скоростях частицы, близких к скорости света, ее электрический момент быстро растет, и она притягивается кулоновым полем к центру вплоть до падения своего на протон (или выталкивается полем, в зависимости от знака магнитного момента и направления скорости $\mathbf{v}$). Так как падение мезотрона на протон физически абсурдно, то отсюда следует, что для заряженной частицы со спином 1 закон Кулона должен терять смысл при малых расстояниях. Этой специфической особенностью частицы со спином 1 Ландау и Тамм воспользовались для того, чтобы предложить совершенно новую теорию ядерных сил.

Л. Ландау обратил внимание на то, что если закон Кулона справедлив вплоть до очень малых значений r , то энергия связи мезотрона на протоне может быть весьма велика.

Тогда протон и отрицательный мезотрон могут образовывать квазиводородный атом, с огромной энергией связи.

Если закон Кулона обрывается при достаточно малых значениях радиуса, энергия связи E может достигнуть величины порядка μc^2 , где μ — масса мезотрона.

В этом случае масса квазиводородного атома будет равна

$$M_n \cong M_p + \mu - \frac{E}{c^2} = M_p,$$

где M_p — масса протона, т. е. примерно равна массе протона.

Согласно теории, предложенной Ландау и Таммом, такой квази-водородный атом отождествляется с нейтроном. Таким образом, нейтрон рассматривается как сложное образование, которое можно изобразить схемой

$$p + \mu^- \rightarrow n + E (100 \text{ MeV}).$$

При этом, в отличие от прежней теории ядерных сил, в теории Ландау и Тамма не постулируется существование каких-либо специальных сил взаимодействия между протоном и мезотроном. Единственным предположением теории является то, что спин мезотрона равен единице, а единственным неизвестным параметром является то критическое значение радиуса, на котором «обрезается» закон Кулона.

На первый взгляд новая гипотеза противоречит приближенной равноправности нейтронов и протонов, проявляющейся, например, в приближенной независимости сил взаимодействия между ядерными частицами от заряда этих частиц. Однако, это противоречие устраняется, если учесть релятивистские эффекты — образование мезотронных пар и их аннигиляцию, а также так называемую поляризацию вакуума. Так, например, захват отрицательного мезотрона протоном ведет к образованию нейтрона и выделению энергии $E = \mu c^2$ (100 MeV). Возможен, однако, также и захват положительного мезотрона нейтроном, в результате которого этот мезотрон аннигилируется с имевшимся в нейтроне отрицательным мезотроном. В результате останется протон и выделится энергия, равная разности между энергией аннигилировавших мезотронов $2\mu c^2$ и энергией связи отрицательного мезотрона в нейтроне $E = \mu c^2$. Таким образом, выделяющаяся в этом процессе энергия также равна μc^2 :

$$n + \mu^+ \rightarrow p + E (100 \text{ MeV}).$$

Таким образом, в энергетическом отношении процессы образования p из n и μ^+ и образования n из p и μ^- равноправны. Есть основания ожидать, что последовательное применение релятивистской теории приведет также к равноправию нейтронов и протонов и в других отношениях, например, в отношении сил взаимодействия между ними.

Согласно новой гипотезе для объяснения ядерных сил нет необходимости постулировать существование специфических ядерных сил. Силы эти являются своеобразным проявлением обычных электромагнитных сил, специфические же их особенности объясняются своеобразием законов движения мезотронов. Мезотроны также обуславливают сцепление протонов в атомном ядре, как электроны обуславливают сцепление атомов в молекуле. Вообще можно установить некоторую аналогию между ядерными силами и обычными химическими силами.

Например, силы притяжения между нейтроном и протоном аналогичны химическим силам в системе атом водорода-протон, а силы нейтрон-нейтрон — подобны силам, связывающим два атома водорода в молекулу.

В теории Ландау и Тамма отпадает необходимость предположений о новом законе взаимодействия, фигурирующем во всех прежних теориях ядерных сил. По существу, единственное произвольное предположение, которое делается в новой теории, это предположение о том, что спин мезотрона равен единице.

При современном состоянии теории трудно еще говорить о количественной ее проверке. Произведенные авторами оценки дают весьма удовлетворительные результаты для ряда различных величин, как, например, для магнитных моментов тяжелых частиц. Однако, для построения законченной теории, которую можно было бы непосредственно сравнивать с экспериментальными данными, необходимо преодолеть еще ряд весьма значительных трудностей, частью чисто расчетных, частью же связанных с тем, что в общей релятивистской теории частиц с целым спином до сих пор еще остается не рассмотренным ряд вопросов общего принципиального характера (например, вопрос о релятивистском взаимодействии тождественных заряженных частиц с целым спином).
