

#### 4. Ядерные силы и их свойства.

*Силы, действующие между нуклонами в ядре, называются ядерными.*

а. Из самых общих соображений можно получить некоторые сведения об этих силах. Устойчивость ядер, выделение энергии при образовании ядра из нуклонов свидетельствуют о том, что ядерные силы вплоть до некоторого расстояния между нуклонами являются силами *притяжения*. Ядерное притяжение гораздо сильнее электростатического отталкивания протонов. Одновременное действие ядерных сил притяжения и электростатических сил отталкивания обуславливает большую энергию связи ядра и приводит к тому, что между нуклонами в ядре действуют силы притяжения.

Ядерные силы *не могут иметь электрического происхождения*. Действительно, в этом случае невозможно представить себе устойчивое ядро, состоящее из протона и нейтрона. Между тем такое ядро существует у тяжелого водорода — дейтерия  ${}^2_1\text{D}$ . Это ядро — дейтрон — устойчивая система с энергией связи около 2,2 МэВ.

Далее, легко убедиться путем простой подстановки массы протона и его электрического заряда в закон Кулона и закон всемирного тяготения, что гравитационное притяжение протонов в  $10^{36}$  раз меньше их электростатического отталкивания. Поэтому гравитационные силы в ядрах не играют практически никакой роли, несмотря на малые расстояния между нуклонами в ядре.

Остается оценить еще магнитное взаимодействие протонов, движущихся в ядре. Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов меньше их электростатического взаимодействия в  $(v/c^2)$  раз, где  $v$  — скорость каждого заряда относительно выбранной системы отсчета,  $c$  — скорость света в вакууме. Для протонов  $v < c$  и их магнитное взаимодействие меньше электростатического. Однако кроме такого магнитного взаимодействия протонов, у всех нуклонов, как протонов, так и нейтронов, имеются собственные магнитные моменты. Расчеты показали, что энергия магнитного взаимодействия протона и нейтрона составляет около  $10^5$  эВ, что гораздо меньше энергии связи в дейтроне.

Таким образом, ядерные силы *являются особыми силами*, по природе своей отличными от всех известных до них сил. Экспериментально ядерные силы изучаются с помощью рассеяния нуклонов на нуклонах: протонов на протонах, протонов на нейтронах и нейтронов на нейтронах.

б. Ядро занимает некоторый конечный объем пространства и нуклоны в нем располагаются на некоторых конечных расстояниях друг от друга. Это значит, что, начиная с некоторого расстояния между нуклонами, сила притяжения между ними заменяется силой отталкивания.

В ядерной физике вводится особая единица длины:

$$1 \text{ ферми} = 10^{-15} \text{ м} = 10^{-13} \text{ см},$$

подобно тому как в атомной физике расстояния принято измерять в единицах первого боровского радиуса в атоме водорода.

В результате экспериментов и основанных на них расчетов получен ряд важных сведений о ядерных силах.

в. Ядерные силы — силы *короткодействующие*.

При расстоянии между нуклонами всего в 4,2 фермы ядерные силы уже пренебрежимо малы. Длину 2,2 ферма принято называть *радиусом действия ядерных сил*.

г. Ядерные силы являются *зарядово независимыми*: ядерное взаимодействие двух нуклонов совершенно не зависит от того, обладают или нет электрическим зарядом оба нуклона или один из них. Ядерные силы взаимодействия нейтрона с нейтроном такие же, как и нейтрона с протоном и протона с протоном при одинаковых условиях. В смысле ядерного взаимодействия протон и нейтрон являются одинаковыми частицами. Вывод о зарядовой независимости ядерных сил был сделан на основании тщательного изучения рассеяния протонов на дейтронах и рассеяния нейтронов на протонах.

В зарядовой независимости ядерных сил можно убедиться, проанализировав разницу в энергии связи двух простейших так называемых *зеркальных ядер*.

Ядро В называется зеркальным по отношению к ядру А, если число протонов в В равно числу нейтронов в А, а число нейтронов в В равно числу протонов в А.

Другими словами, для получения зеркального ядра нужно протоны заменить нейтронами, а нейтроны — протонами.

Рассмотрим простейшие зеркальные ядра: ядро «сверхтяжелого» изотопа водорода трития  ${}^3_1\text{H}$  (или  ${}^3_1\text{T}$ ) и ядро легкого изотопа гелия  ${}^3_2\text{He}$ . Первое содержит один протон и два нейтрона, а второе — два протона и один нейтрон.

Энергии связи этих ядер равны соответственно 8,49 Мэв и 7,72 Мэв. В обоих ядрах по три нуклона, но связаны они в тритии сильнее, чем в гелии. Если признать зарядовую независимость ядерных сил, то разницу в энергиях связи, равную 0,77 Мэв, следует отнести за счет силы кулоновского отталкивания двух протонов в гелии, поскольку в тритии имеется только один протон. Взаимное отталкивание протонов, очевидно, уменьшает энергию их связи, а значит и всего ядра гелия. Если принять, что 0,77 Мэв — это потенциальная энергия кулоновского отталкивания протонов  $U$ , то по формуле электростатики  $U = \frac{kq_1q_2}{r}$  можно найти расстояние между протонами, при котором их кулоновская энергия равна данному значению. Оно получается равным 1,9 ферма, т. е. того же порядка, что и «радиус действия» ядерных сил.

д. Ядерные силы *не являются центральными силами*. Они зависят не только от расстояния между частицами, как это имеет место в случае кулоновской и гравитационной сил. Ядерные силы зависят, кроме расстояния между нуклонами, еще и от ориентации их спинов — параллельны они или антипараллельны.

е. Для ядерных сил характерно *насыщение*

Насыщение проявляется в том, что нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами ядра, а лишь с некоторыми ближайшими соседями, причем не со всеми, даже если они и находятся в радиусе действия ядерных сил.

Насыщение ядерных сил вытекает из характера зависимости энергии связи ядер от массового числа А.

Подобно тому как насыщение сил химической, валентной связи приводит к образованию устойчивых групп атомов — молекул, так и насыщение ядерных сил обуславливает чрезвычайно высокую устойчивость определенных групп нуклонов.

Практически полное насыщение ядерных сил достигается у  $\alpha$ -частицы, представляющей собой устойчивое образование из двух протонов и двух нейтронов. Насыщенность ядерных сил может быть увязана с короткодействующим характером этих сил, если предположить, что за пределами радиуса действия ядерных сил притяжения между нуклонами действуют силы отталкивания, препятствующие тому, чтобы в область действия сил притяжения попало слишком много нуклонов.

*Короткодействие* ядерных сил удалось объяснить на основе предположения об обменном характере этих сил.

Идея о том, что взаимодействие между двумя частицами может осуществляться благодаря обмену третьей частицей, была впервые высказана в 1934 г. И. Е. Таммом и Д. Д. Иваненко.

В современной теории физических полей, в квантовой теории поля, доказывается, что поле квантуется, подобно тому как квантуются важнейшие характеристики микрочастиц, например их энергии. Обменное взаимодействие возникает в результате того, что взаимодействующие частицы обмениваются квантами соответствующего поля.

Так, электромагнитное взаимодействие трактуется как обмен квантами электромагнитного поля — фотонами, тяготение — как обмен квантами гравитационного поля — гравитонами. Гравитоны пока что не обнаружены, однако в настоящее время усиленно ведутся работы в этом направлении. Основная

трудность экспериментального обнаружения гравитонов состоит в малой интенсивности гравитационных волн, испускаемых их возможными источниками.

В полевой картине взаимодействия нужно считать, что взаимодействие ядерных частиц — нуклонов — также осуществляется через посредство особого ядерного поля, путем обмена квантами этого поля. Сравнительно долго выяснялось, что представляют собой кванты ядерного поля. Вначале считали, что ими должны быть электроны. Об этом, казалось бы, свидетельствовало испускание электронов при  $\beta$  - распаде. Хотя электронов в ядрах нет (§ 44.4), они, однако, могут возникать при некоторых процессах, происходящих внутри ядер, и могут быть, как полагали, передатчиками взаимодействий между нуклонами. И. Е. Тамм теоретически доказал, что электроны не могут быть квантами ядерного поля. Это противоречило бы опытным фактам — малому радиусу действия ядерных сил и большой энергии связи ядер.

Кванты ядерного поля были обоснованы теоретически в 1935 г. Х. Юкавой. Ими оказались частицы с массой покоя примерно в 200 раз большей, чем у электрона. Такие частицы называются мезонами, так как их масса покоя является промежуточной между массами электрона и нуклона (от греческого *mesos* — средний, промежуточный).

Мезоны Юкавы вскоре были обнаружены и экспериментально, они стали называться  $\pi$ -мезонами, или пионами, поскольку были обнаружены и мезоны с другой массой.

Понять идею мезона Юкавы, а также грубо оценить массу этого мезона можно на основе следующих рассуждений.

**Взаимодействие двух нуклонов можно наглядно представить себе следующим образом.**

Около одного нуклона возникает (рождается) мезон, который движется к другому нуклону и поглощается им. Время  $\Delta t$  распространения мезона от одного нуклона до другого представляет собой время их взаимодействия. В течение этого промежутка времени энергии взаимодействующих нуклонов изменяются: энергия нуклона, отдающего мезон, уменьшается, энергия нуклона, принимающего мезон, увеличивается. Можно сказать, что в течение промежутка времени  $\Delta t$  существует **неопределенность в энергии** каждого из взаимодействующих нуклонов — невозможно точно сказать, когда мезон покинул один нуклон и когда его принял другой нуклон.

Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга неопределенность энергии  $\Delta \varepsilon$  связана со временем ее существования соотношением  $\Delta \varepsilon \Delta t > h$ . . Поскольку неопределенность энергии связана с потерей или приобретением мезона, она не может быть меньше энергии мезона.

Положим для простоты, что  $\Delta \varepsilon$  равна энергии покоя мезона:  $\Delta \varepsilon = m_\pi c^2$ .

$m_\pi$  — масса покоя  $\pi$ -мезона.

Следовательно,  $\Delta t \approx h / \Delta \varepsilon \approx h / m_\pi c^2$ . Будем считать, что мезоны в ядре являются релятивистскими частицами, т. е. движутся со скоростями  $v$ , близкими к скорости света в вакууме  $c$ . Пусть для простоты  $v = c$ . Поскольку с помощью мезона осуществляется взаимодействие нуклонов, расстояние  $R_n$ , которое пройдет мезон, равно радиусу действия ядерных сил; положим его равным  $R_n = 1,5$  ферма. Следовательно,

$$R_n = v \cdot \Delta t = c \cdot \Delta t \approx c \frac{h}{m_\pi c^2} = \frac{h}{m_\pi c}, \quad (44.10)$$

откуда  $m_\pi = \frac{h}{R_n c}$ .

Из этого соотношения, подставив в него числовые данные, можем вычислить массу мезона Юкавы. Получим  $250 m_e$ , где  $m_e$  — масса покоя электрона. Согласно же современным данным масса покоя пиона равна 264 или 273 электронным массам, в зависимости от типа пиона, от того, электрически нейтрален он или заряжен.

Грубые расчеты, как видим, дали вполне удовлетворительный результат. Соотношение (44.10) определяет радиус действия сил, передача которых осуществляется посредством частиц с определенной массой покоя. Из формулы (44.10) видно, что этот радиус равен комптоновской длине волны частицы с соответствующей массой.

Если в качестве квантов поля рассмотреть фотоны, то, поскольку для них масса равна нулю, получим, что  $R_f = \infty$ . Это значит, что радиус действия электромагнитных сил бесконечно велик: фотоны, передавая взаимодействие, могут проходить сколь угодно большие расстояния. Это соответствует тому известному положению, что электромагнитные силы (электрические и магнитные) медленно уменьшаются при увеличении расстояния между взаимодействующими зарядами или токами, обращаясь в нуль в бесконечности, являющейся границей сферы действия этих сил.

## 5. Модели ядра.

Попытки построения теории ядра наталкиваются на две серьезные трудности:

- 1) недостаточность знаний о силах, действующих между нуклонами,
- 2) чрезвычайную громоздкость квантовой задачи многих тел (ядро с массовым числом  $A$  представляет собой систему из  $A$  тел).

Эти трудности вынуждают идти по пути создания ядерных моделей, позволяющих описывать с помощью сравнительно простых математических средств определенную совокупность свойств ядра. Ни одна из подобных моделей не может дать исчерпывающего описания ядра. Поэтому приходится пользоваться несколькими моделями, каждая из которых описывает свою совокупность свойств ядра и свой круг явлений. В каждой модели содержатся произвольные параметры, значения которых подбираются так, чтобы получить согласие с экспериментом.

Различные модели подобны фотографиям одной и той же картины с разных позиций. Каждая из них дает представление лишь о некоторых свойствах атомных ядер.

Мы рассмотрим две наиболее известные модели ядра — капельную и оболочечную.

**Капельная модель.** Эта модель была предложена Я. И. Френкелем в 1939 г. и развита затем Н. Бором и другими учеными. Френкель обратил внимание на сходство атомного ядра с капелькой жидкости, заключающееся в том, что в обоих случаях силы, действующие между составными частицами - молекулами в жидкости и нуклонами в ядре, - являются короткодействующими.

Кроме того, практически одинаковая плотность вещества в разных ядрах свидетельствует о крайне малой сжимаемости ядерного вещества. Столь же малой сжимаемостью обладают и жидкости. Указанное сходство дало основание уподобить ядро заряженной капельке жидкости.

Аналогия между ядром и жидкой каплей проявляется в том, что в обоих случаях наблюдается определенная подвижность составляющих каплю молекул и входящих в ядро нуклонов.

Нужно, однако, еще раз подчеркнуть, что ядро-каплю нужно считать заряженной и подчиняющейся законам квантовой механики. Этим ядро существенно отличается от капли жидкости

Капельная модель позволила вывести полуэмпирическую формулу для энергии связи частиц в ядре. Кроме того, эта модель помогла объяснить многие другие явления, в частности процесс деления тяжелых ядер.

## Оболочечная модель.

Оболочечная модель ядра была развита Марией Гепперт-Майер и другими учеными. В этой модели нуклоны считаются движущимися независимо друг от друга в усредненном центрально-симметричном поле. В соответствии с этим имеются дискретные энергетические уровни (подобные уровням атома), заполняемые нуклонами с учетом принципа Паули (напомним, что спин нуклонов равен  $1/2$ ). Эти уровни группируются в **оболочки**, в каждой из которой может находиться определенное число нуклонов. Полностью заполненная оболочка образует особо устойчивое образование.

В соответствии с опытом особо устойчивыми оказываются ядра, у которых число протонов, либо число нейтронов (либо оба эти числа) равно

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Эти числа получили название **магических**. Ядра, у которых число протонов  $Z$  или число нейтронов  $N$  является магическим (т. е. особо устойчивые ядра), также называются **магическими**. Ядра, у которых магическими являются и  $Z$ , и  $N$ , называются **дважды магическими**.

Дважды магических ядер известно всего пять

${}^2_2\text{He}$  ( $Z=2, N=2$ ),  ${}^8_8\text{O}$  ( $Z=8, N=8$ ),

${}^{40}_{20}\text{Ca}$  ( $Z=20, N=20$ ),  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$  ( $Z=20, N=28$ ),

${}^{208}_{82}\text{Pb}$  ( $Z=82, N=126$ ).

Эти ядра особенно устойчивы. В частности, особая устойчивость ядра гелия  ${}^2_2\text{He}$  проявляется в том, что это единственная составная частица, испускаемая тяжелыми ядрами при радиоактивном распаде (она называется  $\alpha$ -частицей).