

P3-2014-77

Б. В. Васильев

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ НЕЙТРОН ЭЛЕМЕНТАРНОЙ
ЧАСТИЦЕЙ?

Васильев Б. В.

P3-2014-77

Является ли нейтрон элементарной частицей?

Вопрос о том, является ли нейтрон элементарной частицей, рассматривался в первые годы после его открытия. Экспериментальных данных, которые могли бы помочь решить эту проблему, в то время не было. Существующая в настоящее время экспериментальная информация о свойствах нейтрона говорит о том, что он неэлементарен и является составной частицей.

Допустив, что нейтрон является составной частицей, мы можем вычислить магнитный момент нейтрона и энергию его распада.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Vasiliev B. V.

P3-2014-77

Is the Neutron an Elementary Particle?

The question is whether or not the neutron an elementary particle was considered in the first years after its discovery. There was not any experimental data which could help to solve this problem at the time. At the moment it is assumed that the neutron is an elementary particle and that it is composed of quarks. However, this approach does not allow one to calculate the specific properties of the neutron. The current experimental information on the properties of the neutron indicates that it is not an elementary particle.

If we assume that the neutron is a composite particle, then we can calculate the magnetic moment of the neutron and the energy of its decay.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

Основные физические свойства протона и нейтрона тщательно изучены. Известны их массы, заряды, спины и др. Особый интерес представляют их магнитные моменты, которые измерены с очень высокой точностью.

В единицах ядерного магнетона они соответственно равны:

$$\begin{aligned}\xi_p &= 2,792847337, \\ \xi_n &= -1,91304272.\end{aligned}\tag{1}$$

2. МОДЕЛЬ НЕЙТРОНА

В первое время после открытия нейтрона в физике обсуждался вопрос о том, следует ли его считать элементарной частицей. Экспериментальных данных, которые могли бы помочь решить этот вопрос, не было, и вскоре сложилось мнение, что нейтрон подобно протону — элементарная частица. Однако тот факт, что нейтрон нестабилен и распадается на протон и электрон (и антинейтрино), дает основание относить его к неэлементарным составным частицам.

Можно ли в настоящее время на базе экспериментально изученных свойств нейтрона сделать заключение о его элементарности или, наоборот, неэлементарности?

Рассмотрим составную частицу, в которой вокруг протона со скоростью $v \rightarrow c$ вращается частица массой m_e с зарядом e^- . Эта частица отличается от свободного электрона, в частности, тем, что при релятивистском движении внутри нейтрона у нее нет магнитного момента, характерного для свободного электрона.

Для простоты будем называть эту частицу «электроном».

Между положительно заряженным протоном и отрицательно заряженным «электроном» должна существовать сила кулоновского притяжения

$$\mathbf{F}_{ee} = \frac{e^2}{R_0^2} \frac{\mathbf{R}}{R},\tag{2}$$

обуславливающая энергию кулоновского взаимодействия

$$\mathcal{E}_{ee} = -\frac{e^2}{R_0}. \quad (3)$$

Здесь R_0 — радиус орбиты вращающейся частицы.

Генерируемое орбитальным движением магнитное поле создаст силу, противодействующую кулоновской и стремящуюся разорвать орбиту.

По закону Био–Савара элемент витка dl , несущий ток J , создаст на расстоянии R магнитное поле

$$d\mathbf{H} = \frac{J}{cR^3}[\mathbf{dl}, \mathbf{R}] \rightarrow \frac{e}{2\pi R^4}[\mathbf{dl}, \mathbf{R}]. \quad (4)$$

Так как величина силы, действующей на элемент витка dl , равна

$$d\mathbf{F}_m = \frac{e}{c}[\mathbf{v}, d\mathbf{H}] \rightarrow e^2 \frac{v}{c} \frac{dl}{2\pi R^3} \frac{\mathbf{R}}{R}, \quad (5)$$

весь виток будет разрываться силой

$$F_m = -\frac{v}{c} \frac{e^2}{R_0^2} \frac{\mathbf{R}}{R}, \quad (6)$$

действие которой при $v \rightarrow c$ уравновесит кулоновское притяжение.

Интегрируя (5), получаем, что элемент витка dl приобретет энергию

$$d\mathcal{E}_m = \frac{v}{2c} \frac{e^2}{2\pi R^2} dl. \quad (7)$$

Потому энергия, разрывающая кольцо при $v \rightarrow c$, будет стремиться к

$$\mathcal{E}_m \rightarrow \frac{e^2}{2R_0}, \quad (8)$$

что вместе с кулоновской энергией (3) обусловит возможность устойчивого состояния токового кольца.

В результате компенсации кулоновской и магнитной сил нескомпенсированной останется сила Лоренца, возникающая за счет взаимодействия заряда движущейся частицы и магнитного момента протона μ_p .

Движущийся в магнитном поле H'_y наблюдатель «видит» в своей системе электрическое поле ([1], §24, (24.2))

$$E_z = \beta \frac{H'_y}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (9)$$

где $\beta = v/c$. Этому полю соответствует сила Лоренца

$$F_L = -eE_z = -e\beta \frac{H'_y}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (10)$$

Если вращение осуществляется в плоскости «экватора» протона, то магнитное поле

$$H'_y = \frac{\mu_p}{R_0^3}. \quad (11)$$

В устойчивом состоянии сила Лоренца будет уравновешена центробежной силой

$$F_c = \frac{m_e v^2}{R_0 \sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (12)$$

Это позволяет определить равновесный радиус токового кольца, образованного «электроном» (при $v \rightarrow c$),

$$R_0 = a_C \sqrt{\alpha \frac{m_e \xi_p}{M_p 2}} \approx 9,1 \cdot 10^{-14} \text{ см}. \quad (13)$$

Здесь $a_C = \hbar/m_e c$ — радиус Комптона; $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры; $\xi_p \approx 2,79$ — аномальный момент протона; m_e и M_p — массы покоя электрона и протона.

2.1. Спин токового кольца. Момент импульса вращения (спин) токового кольца

$$S_0 = [\mathbf{p}_0, \mathbf{R}_0] \quad (14)$$

создается обобщенным импульсом «электрона»

$$p_0 = \frac{m_e c \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{e}{c} A \quad (15)$$

и зависит от магнитного момента протона, так как

$$A = \frac{[\boldsymbol{\mu}_p, \mathbf{R}_0]}{\sqrt{1 - \beta^2} R_0^3}. \quad (16)$$

С учетом (13) получаем

$$S_0 = 0. \quad (17)$$

2.2. Учет эффекта прецессии орбиты. Вращение «электрона» характеризуется двумя интегралами движения. При таком вращении должны сохраняться энергия вращающейся частицы W и ее момент вращения K . Если $\sqrt{1 - \beta^2} \ll 1$, то можно записать

$$W = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{e \mu_p}{r^2 \sqrt{1 - \beta^2}} = \text{const} \quad (18)$$

и

$$K = \frac{m r^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \frac{d\Theta}{dt} = \hbar, \quad (19)$$

где учитывается, что

$$v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\Theta}{dt}\right)^2. \quad (20)$$

Исключив из (18), (19) β и t , имеем

$$\left(\frac{dr}{d\Theta}\right)^2 + r^2 = \left[\frac{Wr^2}{a_C(m_e c^2 - \frac{e\mu_p}{r^2})} \right]^2. \quad (21)$$

Введя переменную

$$u = \frac{1}{r} \quad (22)$$

и взяв производную $\frac{d}{d\Theta}$, получим

$$\left(\frac{d^2 u}{d\Theta^2}\right) + u(1 - \vartheta) = 0. \quad (23)$$

Здесь учтено, что производная $\frac{1}{2\pi} \frac{d\Theta}{dt} = \Omega = \frac{c}{R}$ есть угловая частота вращения частицы, и обозначено $\vartheta = \frac{1}{2\pi}$.

Решение уравнения

$$\left(\frac{d^2 u}{d\Theta^2}\right) + u = 0 \quad (24)$$

есть эллипс:

$$u = \text{const} (1 + \varepsilon \cos \Theta). \quad (25)$$

Уравнение (23) описывает «почти» эллиптическую траекторию, которая прецессирует вокруг протона: за один оборот «электрона» орбита поворачивается на угол $\pi \vartheta$.

Таким образом, на вращение частицы по эллипсу с частотой Ω накладывается прецессия самого эллипса с частотой ω :

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{\pi \vartheta}{2\pi} = \frac{1}{4\pi}. \quad (26)$$

Чтобы учесть влияние эффекта прецессии орбиты, вместо (13) введем эффективный радиус R^* . В связи с тем, что этот радиус определяется только отношением мировых констант, его можно вычислить с очень высокой точностью:

$$R^* = \frac{R_0}{1 - \frac{\omega}{\Omega}} = \frac{c}{\Omega \left(1 - \frac{\omega}{\Omega}\right)} = \frac{a_C}{\left(1 - \frac{1}{4\pi}\right)} \sqrt{\alpha \frac{m_e}{M_p} \frac{\xi_p}{2}} \approx 9,88429 \cdot 10^{-14} \text{ см.} \quad (27)$$

3. МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ НЕЙТРОНА

Ток J , текущий по кольцу радиуса R_0 , создаст магнитный момент

$$\mu_0 = \frac{eR^*}{2}. \quad (28)$$

В единицах ядерного магнетона Бора ($\mu_N = e\hbar/2cM_n$, здесь M_n — масса нейтрона) получаем магнитный момент кольца:

$$\xi_0 = \frac{\mu_0}{\mu_N} = \frac{M_n}{1 - \frac{1}{4\pi}} \sqrt{\frac{\alpha\xi_p}{2m_eM_p}} \approx -4,70637. \quad (29)$$

Результирующий магнитный момент нейтрона будет равен сумме магнитного момента протона и магнитного момента кольца:

$$\xi_n = \xi_p + \xi_0 = 2,79285 - 4,70637 = -1,91352, \quad (30)$$

что хорошо согласуется с измеренным значением магнитного момента нейтрона (см. (1)):

$$\frac{\xi_n(\text{calc})}{\xi_n(\text{meas})} = \frac{1,91352}{1,91304} \approx 1,00025. \quad (31)$$

4. ЭНЕРГИЯ РАСПАДА НЕЙТРОНА

Полную энергию токового кольца составляют четыре слагаемых:

1) кинетическая энергия «электрона»

$$\mathcal{E}_{\text{kin}} = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad (32)$$

2) потенциальная энергия связи магнитного поля протона с магнитным полем кольца

$$\mathcal{E}_{\text{pot}} = -\mu_p H_{00}, \quad (33)$$

здесь H_{00} — напряженность магнитного поля в центре токового кольца;

3) кулоновская энергия кольца (см. (3))

$$\mathcal{E}_{ee} = -\frac{e^2}{R_0}; \quad (34)$$

4) магнитная энергия кольца (8)

$$\mathcal{E}_m = \frac{e^2}{2R_0}. \quad (35)$$

С учетом релятивизма напряженность магнитного поля в центре токового кольца

$$H_{00} = \frac{e}{R_0^2} \quad (36)$$

и энергия связи магнитных полей протона и кольца преобразуется к виду

$$\mathcal{E}_{\text{pot}} = -\frac{e\mu_p}{R_0^2\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (37)$$

Приняв во внимание (13), нетрудно убедиться, что первые два вклада компенсируют друг друга:

$$\mathcal{E}_{\text{pot}} + \mathcal{E}_{\text{kin}} = 0. \quad (38)$$

Нескомпенсированной остается энергия связи кольца, равная сумме его кулоновской и магнитной энергий:

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_{ee} + \mathcal{E}_m = -\frac{e^2}{2R_0} \rightarrow 797 \text{ кэВ}. \quad (39)$$

При распаде нейтрона эта энергия связи должна перейти в кинетическую энергию вылетающего электрона (и антинейтрино), что вполне удовлетворительно согласуется с экспериментально определенной границей спектра распадных электронов, равной 782 кэВ.

Такое согласие оценок с данными измерений говорит о том, что нейтрон не является элементарной частицей. Его следует рассматривать как некий релятивистский аналог боровского атома водорода с тем различием, что в боровском атоме нерелятивистский электрон удерживается на оболочке кулоновскими силами, а в нейтроне релятивистский электрон удерживается за счет магнитного взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. §24.

Получено 18 сентября 2014 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 13.11.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 235 экз. Заказ № 58386.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/