

# ВАКУУМ В СОВРЕМЕННОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

А. П. МАРТЫНЕНКО

Самарский государственный университет

## VACUUM IN MODERN QUANTUM THEORY

A. P. MARTYNENKO

*In quantum vacuum, it is probable to detect a non-zero energy during an arbitrary short time interval. Energy of the vacuum can manifest itself in either spontaneous creation/annihilation of particles and related antiparticles, or in the emergence/disappearance of electric or chromoelectric field. This article describes the fundamental role played by the concept of vacuum in the quantum theory.*

*В квантовом вакууме для любого короткого интервала времени существует вероятность обнаружить отличную от нуля энергию. Энергия вакуума может проявить себя в спонтанном рождении или уничтожении частиц и их античастиц. Статья посвящена изложению той фундаментальной роли, которую играет понятие вакуума в квантовой теории.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

В классической физике используется понятие о пустом пространстве, то есть о некоторой пространственной области, в которой отсутствуют частицы и поле. Такое пустое пространство можно считать синонимом вакуума классической физики. Вакуум в квантовой теории определяется как наименьшее энергетическое состояние, в котором отсутствуют все реальные частицы. При этом оказывается, что это состояние не есть состояние без поля. Небытие как отсутствие и частиц и поля невозможно. В вакууме происходят физические процессы с участием уже не реальных, а короткоживущих (виртуальных) квантов поля. В вакууме равны нулю только средние значения физических величин: напряженностей полей, числа электронов и т.д. Сами же эти величины непрерывно флуктуируют (колеблются) около этих средних значений. Причиной флуктуаций является квантово-механическое соотношение неопределенностей, согласно которому неопределенность в значении энергии тем больше, чем меньше время ее измерения [1]:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1)$$

Поскольку энергия поля непосредственно определяет его напряженность, принцип неопределенности ведет к тому, что в какой-то области пространства напряженность поля на очень короткое время может стать отличной от своего фиксированного классического значения. Такие мигания поля и называют квантовыми флуктуациями. Величина флуктуаций тем больше, чем меньше ее пространственные размеры и время существования. Наличие квантовых флуктуаций в вакууме приводит к тому, что вакуум больше не является пустым пространством, каким он был в классической теории. Например, в квантовой электродинамике вакуум мигает появляющимися полями, кипит рождающимися на короткое время электрон-позитронными парами. Такие поля и частицы принято называть виртуальными. Свойства квантового вакуума в результате радикально отличаются от свойств пустого пространства [2].

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВАКУУМА

Рассмотрим электромагнитное поле в пространстве без зарядов. Энергия электромагнитного поля (ЭМП), заключенного в этом пространстве,

$$W = \frac{1}{8\pi} \int_V (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) dV, \quad (2)$$

где напряженности ЭМП  $\vec{E}, \vec{H}$  можно выразить через векторный потенциал  $\vec{A}$ :

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad \vec{H} = \text{rot } \vec{A}. \quad (3)$$

Раскладывая векторный потенциал по плоским волнам

$$\vec{A} = \sum_k \left( \vec{A}_k(t) e^{i\vec{k}t} + \vec{A}_k^*(t) e^{-i\vec{k}t} \right) \quad (4)$$

(суммирование производится по волновому вектору  $\vec{k}$ ,  $V=1$ ), для энергии ЭМП  $W$  получаем следующее выражение [3]:

$$W = \sum_k \left( \frac{|\vec{A}_k|^2}{8\pi c^2} + \frac{\vec{k}^2 |\vec{A}_k|^2}{8\pi} \right). \quad (5)$$

Таким образом, полная энергия ЭМП представима как сумма энергий гармонических осцилляторов. Величина  $\vec{A}_k$  играет здесь роль координаты,  $\vec{A}_k$  — скорости,  $1/(4\pi c^2)$  — массы гармонического осциллятора. Частота осциллятора  $\omega_k = \sqrt{\beta/m} = ck$  ( $\beta = k^2/(4\pi)$ ). Первое слагаемое в (5) представляет собой кинетическую энергию электромагнитного поля, а второе — потенциальную.

Итак, электромагнитное поле в пространстве без зарядов можно рассматривать как совокупность независимых гармонических осцилляторов со всеми возможными значениями волнового вектора  $\vec{k}$ . Применим теперь законы квантовой механики к рассматриваемой системе. В квантовой механике осциллятор может находиться только в состояниях с дискретными значениями энергии:

$$W = \sum_k \left( n_k + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_k, \quad (6)$$

где  $n_k$  — число квантов электромагнитного поля (фотонов) с волновым вектором  $\vec{k}$ . Основное (вакуумное)

состояние электромагнитного поля характеризуется отсутствием реальных фотонов  $n_k = 0$ . При этом энергия электромагнитного поля в вакуумном состоянии оказывается бесконечно большой величиной

$$W_0 = \frac{\hbar}{2} \sum_k \omega_k. \quad (7)$$

В квантовой теории поля все наблюдаемые энергии отсчитываются от энергии вакуума  $W_0$ , что на практике сводится к вычитанию  $W_0$  из всех рассматриваемых величин. В частности, для вакуума электромагнитного поля наблюдаемая энергия равна 0. Средние значения электрического и магнитного полей в вакуумном состоянии равны 0, но средние значения от квадратов этих величин отличны от нуля, что приводит к наблюдаемым на эксперименте следствиям. Это означает, что электромагнитное поле в вакууме колеблется. Эти колебания и называют нулевыми колебаниями электромагнитного поля.

Все сказанное свидетельствует в пользу вывода квантовой теории о том, что вакуум следует понимать как поле в одном из его состояний, то есть как некоторую материальную систему. В вакуумном состоянии ЭМП представляет собой море виртуальных пар частиц, рождающихся с энергией  $\Delta E$  и живущих согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга (1) в течение времени  $\Delta t$ .

В квантовой электродинамике при изучении свойств вакуума в качестве лакмусовой бумажки обычно используют зависимость от расстояния электрического потенциала, создаваемого неподвижным зарядом  $Q$ . В пустом пространстве потенциал описывается хорошо известным законом Кулона. Квантовый вакуум обладает слабыми диэлектрическими свойствами и в небольшой степени изменяет этот закон. Количественно это изменение определяется постоянной тонкой структуры  $\alpha = e^2/(\hbar c) \approx 1/137,036$ . Изменение кулоновского потенциала происходит за счет того, что фотон, испущенный пробным зарядом, может превратиться в виртуальную электрон-позитронную пару, которая образует эффективный диполь, производящий эффект экранировки. Этот процесс включает два элементарных акта взаимодействия, и потому его вклад содержит малый множитель  $\alpha$ . Таким образом, исходный заряд оказывается окруженным морем виртуальных диполей (так, как показано на рис. 1), что приводит к зависимости заряда  $Q$  и создаваемого им потенциала от  $r$ .

Поправки к закону Кулона, обусловленные поляризацией вакуума электрон-позитронными парами, имеют довольно простой вид в предельных случаях ма-

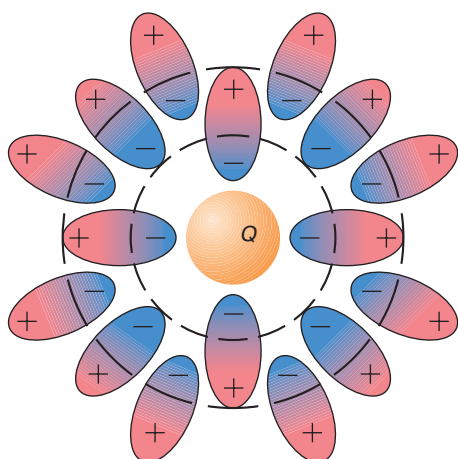


Рис. 1. Экранировка исходного заряда  $Q$  поляризованными вакуумными диполями

ных ( $r \ll r_e = \hbar/(mc)$  – комптоновская длина волны электрона) и больших ( $r \gg r_e$ ) расстояний [4]:

$$\varphi(r) - \frac{Q}{r} \approx \frac{Q\alpha}{r} \ln \frac{r_e}{r}, \quad r \ll r_e, \quad (8)$$

$$\varphi(r) - \frac{Q}{r} \approx \frac{Q\alpha}{r} \exp\left(-\frac{2r}{r_e}\right), \quad r \gg r_e. \quad (9)$$

Для вывода этих выражений нужно уметь пользоваться аппаратом квантовой теории поля, но их физические основания весьма прозрачны. Мы видим, что на больших расстояниях (по сравнению с  $\hbar/(m_e c)$ ) от заряда потенциал отличается от кулоновского экспоненциально малым слагаемым, на близких же расстояниях искажения кулоновского поля точечного заряда логарифмически малы:  $\alpha \ln(r_e/r) \ll 1$ . Важно отметить, что сам факт возникновения зависимости (8) и (9) имеет чисто квантовую природу. Если мысленно измерить заряд внутри маленькой сферы, окружающей пробный заряд, то окажется, что он увеличивается при уменьшении радиуса сферы. Такой заряд называется эффективным зарядом для данного расстояния.

### ЛЭМБОВСКИЙ СДВИГ УРОВНЕЙ

Половинки, содержащиеся в формуле (6), приводят к другому интересному явлению – изменению энергетической структуры атомов [3]. Рассмотрим простейший атом – атом водорода. При движении электрона в атоме он взаимодействует не только с ядром (протоном), но также и с нулевыми колебаниями свободного электромагнитного поля, то есть с электромагнитным вакуумом. Это взаимодействие приводит к тому, что электрон в атоме начинает дрожать на своей орбите. В результате он как бы размывается в пространстве и

вследствие этого меняется его взаимодействие с ядром. Притяжение к ядру ослабевает, и уровни энергии повышаются. Это явление называется лэмбовским смещением. Оценим величину смещения, используя классический закон движения электрона в вакуумном поле, определяемом напряженностями  $\vec{E}_{\text{vac}}$  и  $\vec{H}_{\text{vac}}$ . Так как мы считаем скорость электрона малой (нерелятивистской), то действием магнитного поля можно пренебречь, а потому уравнение движения электрона имеет вид

$$m\delta\ddot{r} = e\vec{E}_{\text{vac}}, \quad (10)$$

где  $\delta\vec{r}$  – отклонение электрона от равновесной орбиты в атоме.

Разложим напряженность вакуумного поля по плоским волнам

$$\vec{E}_{\text{vac}} = \sum_k \vec{E}_k \cos \omega_k t, \quad (11)$$

где  $\omega_k = kc$ . Интегрируя уравнения движения (10), получаем

$$\delta\vec{r} = -\frac{e}{m} \sum_k \frac{\vec{E}_k \cos \omega_k t}{\omega_k^2}. \quad (12)$$

Среднее значение смещения  $\delta\vec{r}$  равно 0, а средний квадрат смещения будет отличен от нуля:

$$(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}} = \frac{e^2}{2m^2} \sum_k \frac{\vec{E}_k^2}{\omega_k^4}. \quad (13)$$

Найдем амплитудные значения плоских волн, используя формулу энергии нулевых колебаний (7):

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_V \vec{E}_{\text{vac}}^2 dV = \sum_k \frac{1}{2} \hbar \omega_k. \quad (14)$$

Разложение (11) в формуле (14) приводит к соотношению

$$\vec{E}_k^2 = \frac{4\pi\hbar\omega_k}{V}, \quad (15)$$

а средний квадрат амплитуды дрожания электрона на орбите оказывается

$$(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}} = \frac{2\pi e^2 \hbar}{V m^2} \sum_k \frac{1}{\omega_k^3}. \quad (16)$$

Заменим здесь суммирование по волновым векторам на интегрирование по частотам вакуумных фотонов

$$\sum_{\vec{k}} \rightarrow 2V \int \frac{d\vec{k}}{(2\pi)^3}.$$

Множитель 2 отвечает двум возможным поляризациям фотона. В результате для  $(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}}$  получаем следующий интеграл:

$$(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} \alpha \left( \frac{\hbar}{mc} \right)^2 \int \frac{d\omega}{\omega}. \quad (17)$$

Каковы пределы интегрирования в этом выражении? Так как движение электрона имеет нерелятивистский характер, то импульс, получаемый от вакуумного фотона,  $\hbar k < mc$ . Верхний предел интегрирования  $\omega_{\text{max}} = mc^2/\hbar$ . Нижний предел интегрирования  $\omega_{\text{min}} = E_n/\hbar = (Ze^2)^2 m / (2n^2 \hbar^3)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  – главное квантовое число. Таким образом окончательно имеем

$$(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} \alpha \left( \frac{\hbar}{mc} \right)^2 \ln \frac{2n^2}{(Z\alpha)^2}. \quad (18)$$

Размеры области, по которой размазан электрон, определяются величиной  $r_{\text{vac}} = [(\delta\vec{r}^2)_{\text{cp}}]^{1/2} = \sqrt{\alpha} \hbar / (mc)$ . Вследствие этой размазанности электрона его взаимодействие с ядром вместо обычного выражения  $V(r) = e\phi(r)$  примет теперь вид

$$\begin{aligned} V + \delta V_{\text{vac}} &= e\phi(\vec{r} + \delta\vec{r}) = \\ &= e \left[ 1 + (\delta\vec{r} \nabla) + \frac{1}{2} (\delta\vec{r} \nabla)^2 + \dots \right] \phi(\vec{r}), \end{aligned} \quad (19)$$

где выполнено разложение потенциала, создаваемого ядром, по малому параметру  $\delta\vec{r}$ ,  $\nabla$  – векторный дифференциальный оператор. Усредняя (19) по дрожанию электрона и учитывая уравнение Пуассона  $\Delta\phi(\vec{r}) = -4\pi\rho(\vec{r})$  ( $\rho(\vec{r})$  – плотность заряда ядра, которое находится в начале координат:  $\int \rho(\vec{r}) dV = Z|e|$  – заряд ядра,  $Z=1$  в случае атома водорода), получим дополнительную энергию взаимодействия электрона с ядром за счет вакуумных колебаний:

$$\delta V_{\text{vac}} = -\frac{4}{3} e \alpha \left( \frac{\hbar}{mc} \right)^2 \rho(\vec{r}) \ln \frac{2n^2}{(Z\alpha)^2}. \quad (20)$$

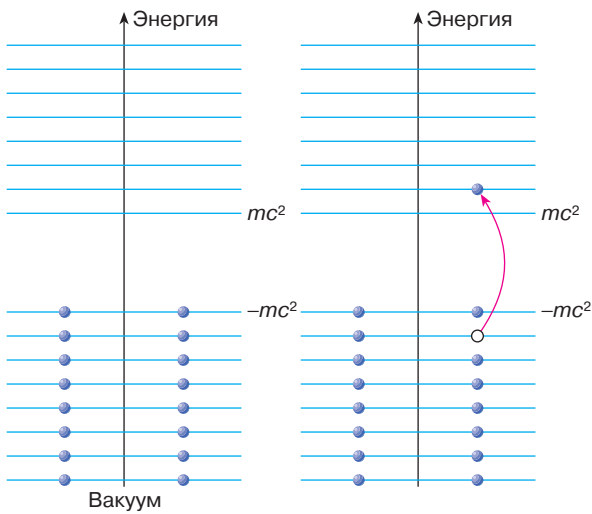
Учитывая также, что движение электрона в атоме водорода описывается волновой функцией  $\psi(\vec{r})$ , сдвиг уровней энергии

$$\delta E_{\text{vac}} = \langle \delta V_{\text{vac}} \rangle = \frac{4}{3\pi} \frac{mc^2}{n^3} \alpha (Z\alpha)^4 \ln \frac{2n^2}{(Z\alpha)^2}, \quad (21)$$

где  $|\psi(0)|^2 = m^3 (Z\alpha)^3 / (\pi n^3)$ , а угловые скобки в (21) означают усреднение по движению электрона  $\psi_n(\vec{r})$ . Численное значение  $\delta E_{\text{vac}}$  при  $n = 2$  составляет величину  $\sim 1000$  МГц. Рассмотрим два энергетических уровня электрона в атоме водорода с  $n = 2$ :  $2S_{1/2}$  и  $2P_{1/2}$  ( $S, P$  обозначают орбитальный момент  $l = 0, 1$ , индекс  $1/2$  – значение полного момента количества движения электрона в атоме  $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$  ( $\vec{s}$  – спиновый момент,  $\vec{l}$  – орбитальный момент количества движения). Как в теории Бора, так и в релятивистской теории Дирака электрон, находясь в этих двух состояниях, имеет одинаковую энергию. Учет вакуумного взаимодействия приводит к сдвигу уровня  $2S_{1/2}$  вверх по отношению к  $2P_{1/2}$ . Такое положение этих уровней и было экспериментально обнаружено в опытах У. Лэмба и Р. Резерфорда в 1947 году и получило название лэмбовского сдвига.

## ВАКУУМ ДИРАКА

Краеугольным камнем современной физики является то, что фундаментальные законы имеют одну и ту же форму во всех системах отсчета, которые движутся относительно друг друга с постоянной скоростью (лоренцевых системах отсчета). Говорят, что фундаментальные законы природы являются лоренц-инвариантными. Преобразование Лоренца связывает координаты в двух таких системах. Квантовое уравнение Шрёдингера, которому удовлетворяет волновая функция  $\psi(\vec{r})$ , описывающая движение электрона в атоме, не является лоренц-инвариантным, поскольку время  $t$  и пространственные координаты входят в него неравноправно. В 1928 году английский физик П.А.М. Дирак предложил свое квантовое уравнение для описания движения электрона и его взаимодействия с энергией электромагнитного поля, удовлетворяющее теории относительности [2]. Плотность вероятности, определяемая волновой функцией Дирака, была положительно определена. Уравнение Дирака приводило еще к одному важному физическому выводу: это уравнение допускало решения не только с положительной, но и с отрицательной энергией. Например, для свободного электрона (электромагнитное поле отсутствует) соотношение между энергией и импульсом неоднозначно:  $E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$  ( $\vec{p}$  – импульс электрона). Это означает, что энергия свободного электрона  $E$  может быть либо больше  $mc^2$  (верхний континуум:  $mc^2 \leq E < \infty$ ), либо меньше  $-mc^2$  (нижний континуум:  $-\infty < E \leq -mc^2$ ), как показано на схеме энергетических уровней рис. 2.



**Рис. 2.** Схема энергетических уровней свободного электрона. В дираковской картине вакуума все уровни отрицательной энергии заполнены

В классической физике энергия электрона должна меняться непрерывно, поэтому частица не может перейти из верхнего континуума в нижний, преодолев щель шириной  $2mc^2$ . В квантовой же теории изменения энергии носят скачкообразный характер, поэтому отбросить решения с отрицательной энергией невозможно. На первый взгляд это выглядит катастрофой, поскольку оказывается возможным переход ко все более и более низким отрицательным энергиям. Электроны с положительной энергией должны были бы излучать фотоны. Решая проблему состояний с отрицательной энергией, Дирак ввел запрет на переходы из континуума состояний с положительной энергией в континуум состояний с отрицательной энергией, постулировав, что все уровни отрицательной энергии полностью заполнены электронами. Тогда в силу принципа Паули, согласно которому в одном квантово-механическом состоянии не может находиться более одного электрона, переходы электрона в состояния с отрицательной энергией станут невозможными. Состояния с отрицательной энергией, полностью заполненные электронами, образуют физически ненаблюдаемый фон, который называют дираковским морем или дираковским вакуумом. Бесконечная плотность отрицательного заряда и бесконечная плотность отрицательной энергии, согласно теории Дирака, должны быть приняты за новое начало отсчета соответствующих величин.

В то время как само дираковское море ненаблюдаемо, изменения в нем можно обнаружить на опыте. Предположим, что какому-то электрону нижнего континуума мы сообщаем с помощью электромагнитного поля достаточную энергию для перехода в верхний

континуум. В результате такого процесса возникают электрон с положительной энергией (реальный электрон) и “дырка” в дираковском море (см. рис. 2). Тогда дираковское море с недостающим электроном (“дыркой”) будет иметь относительно выбранного начала отсчета заряд  $+e$ , импульс  $-\vec{p}$  и положительную энергию

$E = \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$ . Такая “дырка” будет подобна обычной частице с такими же характеристиками. Эта частица называется позитроном ( $e^+$ ) и представляет собой античастицу по отношению к электрону. Таким образом, в теории Дирака появилась возможность рождения ( $e^+e^-$ )-пар с помощью электромагнитного поля. Теория Дирака предсказывала существование новой частицы – позитрона, и вскоре позитрон был обнаружен в космических лучах. При столкновении позитрона с электроном происходит аннигиляция обеих частиц – они исчезнут, а взамен появятся фотоны. Предсказание процессов рождения пар, аннигиляции электронов и позитронов заложило основу новой концепции: взаимодействие, сводимое по первоначальному смыслу к изменению траектории, обрело смысл рождения и гибели частиц.

### РОЖДЕНИЕ $e^+$ КУЛОНОВСКИМ ПОЛЕМ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

В силу соотношения неопределенностей (1) возможно кратковременное нарушение закона сохранения энергии и из вакуума может появиться виртуальная ( $e^+e^-$ )-пара, которая просуществует в течение  $\tau \approx \hbar/\Delta E \approx \hbar/(mc^2)$ . За это время пара разойдется на расстояние не больше чем  $\delta r = c\tau = \hbar/(mc)$ , то есть на расстояние порядка комптоновской длины волны  $\lambda = \hbar/(mc) \sim 10^{-11}$  см. Это так называемый квантовый радиус электрона, характеризующий область возможной пространственной локализации электрона в квантовой теории. Если теперь внешнее электрическое поле способно произвести над электроном работу  $\sim mc^2$  на расстоянии  $\delta r$ , то рождение пары из вакуума становится реальным процессом [4]. Для этого поле должно быть порядка критического

$$e_0 E_{cr} \frac{\hbar}{mc} = mc^2, \quad E_{cr} = \frac{m^2 c^3}{e_0 \hbar} \sim 3 \cdot 10^{16} \text{ В/см.} \quad (22)$$

В этих условиях вакуум становится неустойчивым и из него могут рождаться электрон-позитронные пары. Сверхсильные электрические поля существуют вблизи атомного ядра. Как показывают простые оценки, при достижении зарядом ядра значения  $137|e|$  кулоновское поле в пределах первой боровской орбиты превосходит критическое значение (22). Поэтому для сверхтяжелых ядер вакуумные квантовые эффекты должны быть существенны. Для электрона, находящегося в кулоновском

поле точечного ядра с зарядом  $Ze$ , уравнение Дирака имеет точное решение, и дискретный энергетический спектр электрона определяется формулой Зоммерфельда. Для основного уровня с  $n = 1$  и  $j = 1/2$  эта формула имеет вид

$$E_{1,1/2} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2}. \quad (23)$$

С ростом заряда ядра  $Z$  энергия (23) уменьшается до 0 ( $Z \sim 137$ ), а при больших  $Z$  становится чисто мнимой. Для нахождения уровней энергии при  $Z \geq 137$  на самом деле необходимо учитывать размеры ядра. В поле ядра конечного радиуса с ростом  $Z$  энергия уровня  $(n, j) = (1, 1/2)$  уменьшается, но в отличие от случая точечного ядра, достигнув значения 0, продолжает уменьшаться и становится отрицательной. Для некоторого заряда  $Z$ , который называется критическим ( $Z = Z_{cr}$ ), она достигает значения  $-m$  (границы нижнего континуума). Для основного уровня  $1S_{1/2}$  сферических ядер, не окруженных электронными оболочками, теоретические расчеты дают значение  $Z_{cr} = 169$ . Если  $Z > Z_{cr}$ , то уровень энергии основного состояния погружается в нижний континуум. Что же при этом произойдет?

Пусть основной уровень атома  $1S_{1/2}$  ( $K$ -оболочка) не заполнен электронами – ядро голое, и при  $Z = Z_{cr}$  этот уровень достигает границы нижнего континуума. Все уровни дираковского моря уже заполнены электронами, и теперь к ним присоединился еще один – незаполненный. Такой уровень в дираковском море, как мы уже говорили, – это две “дырки”, два позитрона (на уровне  $1S_{1/2}$  могут располагаться два электрона с противоположно направленными спинами). Вначале эти “дырки” находятся вблизи ядра, затем их место занимают электроны из дираковского моря, а “дырки” попадают на их место и постепенно выталкиваются кулоновским полем на бесконечность. Происходит рождение двух позитронов. Новое дираковское море содержит лишний уровень, и заряд моря равен  $(-2e)$ , причем этот заряд локализован вблизи ядра. Закон сохранения заряда при этом, как видим, не нарушается. Чтобы экспериментально наблюдать рождение  $e^+$  в кулоновском поле ядра, необходимы ядра с зарядом  $Z \approx 170$ , что выходит за пределы области известных в настоящее время стабильных ядер. Подобные ядра можно создать лишь на короткое время в процессе

соударения двух ядер с зарядами  $Z_1$  и  $Z_2$ :  $Z_1 + Z_2 > Z_{cr}$ , например двух ядер урана  $^{238}\text{U}$ . В зависимости от относительной ориентации двух ядер урана столкновение может приводить к частичному взаимному проникновению ядер друг в друга с образованием составного ядра на время  $10^{-22}$ – $10^{-21}$  с. Суммарный заряд такого ядра  $Z_U = Z_1 + Z_2 = 184 > Z_{cr}$ , и на короткое время уровень  $1S_{1/2}$  оказывается погруженным в отрицательный континуум. В результате возникает процесс спонтанного рождения  $e^+$ , который впервые наблюдали на ускорителе тяжелых ионов в Дармштадте (ФРГ) в 1979 году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного следует, что физика квантового вакуума интересна и содержательна. Вакуум можно рассматривать как особое состояние материи, а вакуумные эффекты наблюдаются в эксперименте и играют важнейшую роль в квантовой картине мира. Конечно, круг физических явлений, которые определяются структурой вакуума, значительно шире и не сводится к перечисленным в этой статье фактам. Многие проблемы физики вакуума находятся на стадии интенсивных научных исследований и еще ждут своего решения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Крайнов В.П.* Соотношения неопределенности для энергии и времени // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 5. С. 77–82.
2. *Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988. 239 с.
3. *Мигдал А.Б., Крайнов В.П.* Приближенные методы квантовой механики. М.: Наука, 1966. 152 с.
4. *Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. 723 с.

*Рецензент статьи В.П. Крайнов*

\* \* \*

Алексей Петрович Мартыненко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета. Область научных интересов – квантовая теория поля, физика элементарных частиц и полей. Автор более 60 научных статей и пяти учебных пособий.