

Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 5, стр. 338 – 341

5 сентября 1974 г.

ОСОБЕННОСТИ РАСПАДА ВАКУУМА И ЗАМЕЧАНИЯ О ТАХИОНАХ

Я.Б.Зельдович

В настоящее время активно обсуждаются теории, в которых вакуум не стабилен и возможен спонтанный локальный переход вакуума в другое состояние [1 – 4].

Сильный аргумент против нестабильности вакуума дает космология, а конкретно – теория горячей Вселенной. Вблизи сингулярности при экстремальной температуре и плотности мало вероятно, чтобы уцелело метастабильное состояние. В этих условиях должен действовать принцип "Все, что может произойти, уже произошло".

Однако, отвлечемся от космологических соображений. Задача о спонтанном распаде вакуума представляет общий интерес и имеет нетривиальные особенности.

Неустойчивость вакуума по отношению к тем или иным процессам должна характеризоваться величиной w – вероятностью того, что вакуум перестанет быть вакуумом, родится тот или иной объект – пузырь со значением скаляра ϕ_1 на фоне постоянного ϕ_2 во всем окружающем объеме или родится набор частиц. Эта величина w должна быть отнесена к единице объема (трехмерного) и единице времени, $w \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$. В системе единиц $\hbar = c = 1$ можно сказать, что w имеет ту же размерность, что и плотность энергии или (поделенная на константу тяготения G) космологическая постоянная – см., например, [5].

В сущности w есть мнимая часть космологической постоянной. Здесь можно провести полную аналогию с квантовыми состояниями системы с конечным числом степеней свободы: основное – стабильное состояние характеризуется энергией; возбужденное состояние, способное распадаться, характеризуется энергией и вероятностью распада, которые объединяются в понятие комплексной энергии.

Нетривиальное отличие распада вакуума от распада частицы или материальной среды связано с релятивистской инвариантностью вакуума. По этой причине, как оказывается, w не может быть конечным, логически замкнутая теория может быть сформулирована лишь с учетом внешних факторов, нарушающих Лоренцианвариантность (т.е. с учетом стенки сосуда или вещества, находящегося в вакууме). Рождающаяся система имеет $P_4 = E = p = 0$ тождественно во всех системах отсчета: однако это не исключает возможность объективного определения ее скорости в данной системе отсчета, не исключает определения системы отсчета, в которой система покоится и не исключает различия рождающихся систем по величине и направлению их скорости. Разумеется, обычное определение $v = P/E$ не годится при $P = E = 0$. Однако, например, рождающийся пузырь с $\phi = \phi_1$, представляет собой сферу радиуса r , внутри которой плотность энергии отрицательна (или во всяком случае меньше, чем снаружи) и тонкий расширяющийся слой, положительная поверхностная энергия которого (с учетом релятивистской скорости) компенсирует отрицательную объемную энергию. Только в одной системе отсчета центр пузыря покоится, расширение его симметрично. В этой системе $E_v = -E_s \neq 0$, $p_v = p_s = 0$ (V – объем, S – поверхность). В любой другой системе $p_v = -p_s \neq 0$, можно определить $v = p_v/E_v = p_s/E_s$, несмотря на то, что $E = E_s + E_v = p = p_s + p_v \neq 0$. Если в вакууме возможно спонтанное рождение объектов, то этот объект может с равным правом иметь любую скорость (меньше единицы, т.е. меньше c) относительно заданной системы координат. По формулам специальной теории относительности интеграл в пространстве скоростей расходится – этот интеграл имеет вид

$$I = 4\pi \int_0^1 \frac{v^2 dv}{(1-v^2)^2}$$

Если вместо скорости $v = d|r|/dt$ ввести $u = dr/d\tau = v/\sqrt{1-v^2}$,

так что $u_4 = \gamma = 1/\sqrt{1-v^2}$, то получим $I = 4\pi \int_0^\infty \frac{u^2 du}{\sqrt{1+u^2}}$,

расходимость остается (для $|u|$ нет предела такого, как $v < 1$). Фундаментальная теория должна дать определенную дифференциальную вероятность рождения объекта, отнесенную к элементу объема в пространстве скоростей вблизи начала координат

$$w_1 = \left. \frac{dw}{d^3u} \right|_{u \ll 1} = \left. \frac{dw}{d^3v} \right|_{v \ll 1}.$$

Полная вероятность рождения объекта с любой скоростью равна $w = w_1 l$ и, следовательно, расходится. Предположение, что w_1 стремится к нулю, но так, что произведение $w_1 l$ конечно, не избавляет от парадоксов: в любой системе координат рождаются объекты, скорость которых равна единице, так как l расходится при $v = 1$. Импульс p и энергия E объекта в целом равны нулю в любой системе, в частности, при $v = 1$. Но каждый объект состоит по меньшей мере из двух частей, с $E_0 > 0$ и $E_0 < 0$ в системе $v = 0$, Энергия каждой части стремится к бесконечности (по модулю) при $v = 1$, что несовместимо с наблюдениями. Расходимость l отражает общеизвестную некомпактность группы Лоренца. Особо отметим, что при интегрировании, очевидно, не входит никакой, зависящий от u формфактор. Детальное рассмотрение рождения пузырей дает экспоненциально малые множители, вследствие наличия энергетического барьера. Приведенное выше замечание о расходимости интеграла означает, что должны рождаться ультрарелятивистские пузыри; близость их скорости к скорости света ограничивается теми факторами, которые нарушают Лоренцинвариантность задачи. Абсолютная величина вероятности может остаться малой за счет малости экспоненты подбарьерного проникновения [6]; предэкспоненциальный множитель в системе $\hbar = c = 1$, порядка $m^4 \approx 10^{66} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$ для m равной массе нуклона.

Значение приведенных соображений для теории тахионов [7] остается спорным. Энергия тахионов E_t не позитивно дефинитна, меняет знак при Лоренц-преобразовании. Поэтому из двух тахионов и двух нормальных частиц можно построить систему с $E = p = 0$, способную родиться в вакууме. Для заряженных тахионов вероятность недопустимо велика, $\alpha^2 m^4 \sim 10^{62} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$ и без интегрирования по скоростям. Однако, автор теории тахионов знал об этой трудности; он отмечает, что если в системе, где $E_t > 0$ тахидон *выходит* из точки рождения 0 , то после перехода в систему, где $E_t < 0$ нужно сказать, что тахидон *входит* в точку 0 . Следовательно, рассматриваемый процесс есть столкновение двух тахионов, а не спонтанное рождение их в вакууме. Первородный грех нарушения причинности тахионами перекрывает другие необычные выводы теории тахионов.

Аргументом против тахионов является невозможность статистического равновесия и других частиц в теории горячей Вселенной.

Если все же интерпретировать рождение двух тахионов и двух обычных частиц как спонтанный процесс, то минимальную вероятность получим для нейтральных тахионов, оставляя лишь гравитационное взаимодействие, $w_1 = G^2 m^6 \sim 10^{-10}$. Интегрирование по скоростям, ограниченное столкновениями с другими частицами (фотонами, $n = 400 \text{ см}^{-3}$ в среднем во Вселенной) даст $w = G^2 m^{14} n^{-2} \sim 10^{70} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$. Следовательно, такой вариант теории нейтральных тахионов неприемлем.

Эти соображения могут оказаться существенными и в некоторых вариантах теории скалярного поля. С другой стороны рождение заряженных частиц в постоянном электрическом поле, как известно, имеет конечную вероятность, хотя и приводит к другим парадоксам [8].

Благодарю Д.А.Киржница и И.С.Шапиро за замечания. Данная статья не была бы написана без моральной поддержки и советов Л.Б.Окуня, которому я глубоко благодарен.

Институт прикладной математики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 июля 1974 г.

Литература

- [1] T.D.Lee, G.C.Wick.. Preprint, Columbia University, No 2271 – 20, 1973.
- [2] T.D.Lee. Preprint, Columbia University, No 2271 – 27, 1974.
- [3] Д.А.Киржниц. Письма в ЖЭТФ, 15, 745, 1972.
- [4] Я.Б.Зельдович, И.Ю.Кобзарев, Л.Б.Окунь. ЖЭТФ, 67, 3, 1974.
- [5] Я.Б.Зельдович. УФН, 95, 209, 1968.
- [6] М.Б.Волошин, И.Ю.Кобзарев, Л.Б.Окунь. ЯФ, 21, 150, 1975.
- [7] S.Baltay, G.Feynberg, N.Yeh. PhR D1, 759, 1970; E.Recamì, R.Mignani. Lett. Nuov. Cim., 9, 479, 1974; La rivista del Nuovo Cim., 4, 209, 1974.
- [8] Ya.B.Zeldovich. In "Magic without magic" 1972; New York, Wheeler's Festschrift, ed Klauder; Я.Б.Зельдович. Письма в ЖЭТФ, 12, 443, 1970.