

частицы, например, пионы, наблюдаемые на опыте, несомненно, составные, состоят из кварков и антикварков. Если создать большую плотность нейтральных пионов, получится «кварковый суп» с положительным давлением.

То скалярное поле, которое нужно космологии, в разных вариантах получается в теории, но существование его (или их — если много полей) не подтверждено опытом, детальные свойства полей не известны.

Итак, второе замечание состоит в том, что инфляционное состояние с положительной плотностью энергии и отрицательным давлением, конечно же, неустойчиво. Это очевидно и с точки зрения механики, это очевидно и с точки зрения термодинамики. При равной плотности энергии вместо упорядоченного скалярного поля можно взять горячую плазму и энтропия гигантски увеличится!

«Слава богу!» — одинаково скажет и верующий, и атеист. Благодаря неустойчивости инфляционного состояния оно с течением времени превращается в горячую плазму, а затем в окружающую нас Вселенную. Температура падает до 3 К, остатком процессов при высокой температуре является вещество — и вот рождается Солнце, Земля, человечество, цивилизация. Детали этого процесса описывать в данной книге было бы неуместно.

### **Плотность энергии вакуума и космологическая постоянная**

Остановимся на последнем из упомянутых выше вопросов, связывающем теорию полей и частиц с астрономией. Это самый трудный и самый коварный вопрос. Само существование этого вопроса остро осознано лишь в последние 10—20 лет. Речь идет о плотности энергии вакуума.

В классической физике вопрос был тривиален: вакуум — это пустота, нет частиц, равны нулю поля — значит, нет и энергии. Однако стоит нам начать последовательно развивать квантовую теорию, как банальные истины летят вверх тормашками.

Начнем с электромагнитного поля. Электрическое и магнитное поля играют роль импульса и координаты, по принципу неопределенности они не могут одновременно обращаться в нуль! Конечно, средние  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$

равны нулю, но ведь плотность энергии выражается через квадраты:  $(\vec{E}^2 + \vec{B}^2)/8\pi$ . На другом языке: можно разложить поля на совокупность отдельных электромагнитных волн.

В линейной теории эти волны независимы друг от друга и каждая из них ведет себя как осциллятор — как частица, которую квадратичный потенциал удерживает в положении равновесия (рис. 38). Движение такой частицы, очевидно, представляет собой колебание с определенной частотой. В классической теории минимум энергии соответствует частице, покоящейся в нижней точке, этот минимум равен нулю.

Но в квантовой теории спектр возможных состояний частицы дается формулой

$$E_n = \hbar\omega \left( n + \frac{1}{2} \right).$$

Нижнее энергетическое состояние соответствует  $n = 0$ ,  $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ . Только такое низшее состояние совместимо с квантовой теорией, с принципом неопределенности.

Полная плотность энергии в единице объема с учетом связи между частотой и волновым вектором  $\mathbf{k}$  ( $\omega = c|\mathbf{k}|$ ) расходится, она бесконечна!  $\varepsilon_0 \sim k_{\max}^4$  где  $k_{\max} = \infty \leftarrow$  максимальное значение волнового вектора.

Может быть, где-то есть ошибка, еще не найденная теоретиками, и «нулевую» энергию, нулевые колебания не надо учитывать? Вряд ли такой ответ сегодня удовлетворит нас. Дело в том, что многие проявления нулевых колебаний подтверждены опытом. Возьмем, например, медную коробочку и заключим в эту коробочку свободные электромагнитные колебания. Низкочастотная часть спектра при этом изменится: вместо бегущих волн с определенным волновым вектором получим серию стоячих волн, зависящих от конкретной формы и размера медного ящичка. А высокочастотные волны практически не изменятся. Таким образом, нулевая энергия совокупности волн в ящичке

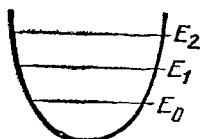


Рис. 38. В потенциальной яме имеется дискретный спектр квантовых состояний.  $E_0$  — энергия нижнего состояния,  $E_1$  и  $E_2$  — энергии соответственно 1 и 2 возбужденных состояний

выражается суммой  $E = \frac{1}{2} \sum E_n$ . Сумма эта также бесконечна, но оказывается, что конечна разность

$$\Delta E = E - \epsilon_0 V,$$

где  $\epsilon_0$  — бесконечная сумма для вакуума без коробочки,  $V$  — объем коробочки.

Вот эта конечная величина  $\Delta E$  зависит определенным образом от размера и формы коробочки. Но если энергия зависит от размеров и формы, значит при изменении размеров и формы стенки производят работу, значит при температуре равной нулю на стенки действуют определенные силы.

Мы можем сказать, что это силы взаимодействия между стенками. Это не изменит сути: вычисления, использующие по ходу дела бесконечную энергию нулевых колебаний, дают ответ, согласующийся с опытом. Значит, просто выбросить нулевые колебания нельзя.

Саму бесконечную плотность энергии можно было игнорировать, рассматривая только *разности* энергий или в разных коробочках, или до и после того или иного процесса в одной и той же коробочке. Таким образом удастся получать разумные, не бесконечные результаты. Рассказанная выше процедура составляет часть так называемой программы *ренормализации*.

Однако беда приходит тогда, когда мы переходим к рассмотрению вопросов тяготения, будь то общая теория относительности или теория тяготения Ньютона. В эту теорию входит не разность  $\Delta E$ , а сама бесконечная плотность энергии.

Здесь возможный выход состоит в том, что энергия вакуума определяется *полной* плотностью энергии всех полей. Действительно, верно, что одна электродинамика (квантованная!) несовместима с теорией тяготения. Но ведь мы живем в мире, где существует не только электродинамика, не только фотоны! Существуют еще и электроны, и позитроны. Напомним, что для описания таких частиц и античастиц пришлось ввести «море Дирака». Это «море» — наличие в вакууме совокупности частиц, заполняющих все состояние с отрицательной энергией (рис. 39). Значит, в плотность энергии вакуума теория Дирака вносит бесконечный отрицательный вклад. Этот отрицательный вклад сохраняется и в более рафинированной зарядово-симметричной теории электронов и позитронов.

Подведем итог. По определению, вакуум есть состояние с наименьшей плотностью энергии\*). Однако в принципе минимум функции вовсе не обязан быть равным нулю (рис. 40). В принципе вполне возможно, что все бесконечные положительные вклады бозонов (таких, как фотоны) компенсируются отрицательными вкладами фермионов (таких, как электроны «моря Дирака»).

Современные, так называемые суперсимметричные, теории частиц строятся так, что число бозонов и число фермионов тождественно равны. Это, в частности, означает компенсацию их вкладов в энергию вакуума. Однако отсюда еще далеко до решения задачи.

Суперсимметрия, несомненно, нарушается при энергиях меньших планковской. Почему же при этом не нарушается точная компенсация вклада бозонов и фермионов? По существу, теория суперсимметрии

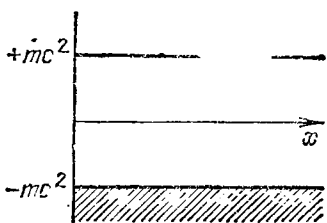


Рис. 39. Рождение пары частица — античастица при их массе  $m$  требует преодоления энергетического порога  $2mc^2$

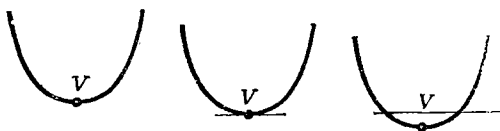


Рис. 40. Вакуум отвечает минимуму потенциальной энергии, но величина этого минимума в принципе не обязана быть равной нулю. Она может быть как больше, так и меньше нуля

говорит лишь о том, что плотность энергии вакуума не равна «планковской»,  $10^{114}$  г/(см·с<sup>2</sup>). Однако теория совсем не исключает возможности плотности энергии порядка, например, ядерной —  $10^{35}$  г/(см·с<sup>2</sup>).

Астрономия — и только астрономия — говорит о том, что плотность энергии вакуума заведомо меньше  $10^{-28}$  г/(см·с<sup>2</sup>)\*\*).

\*) Любое отклонение от минимума (опять же по определению минимума) положительно. Такое отклонение может быть названо частицей в вакууме.

\*\*) При этом в пределах от  $-10^{-29}$  до  $+10^{-28}$  даже знак остается неизвестным.

Физика не способна этого доказать или обосновать. Может быть, это сделают наши молодые читатели? Не сегодня, а после 5—10 лет труда? На научном языке проблема именуется «вопрос о космологической постоянной».

Наконец, последнее предупреждение молодым и немолодым читателям: не конструируйте машин, извлекающих из вакуума энергию. Это безграмотно уже сегодня, независимо от вопроса о вычислении энергии (см. об этом выше (рис. 40) — определение вакуума как состояния с *минимальной* допустимой плотностью энергии). Лучше придумайте, как использовать, да еще, по возможности, управляемым регулируемым способом, всю энергию  $E = Mc^2$  вещества. Это трудно — но по крайней мере не противоречит общим законам природы. При взрыве урана и плутония используется меньше 0,1 %  $Mc^2$ , превращение водорода (в том числе дейтерия и трития) в гелий может дать до 0,6 %  $Mc^2$ . При взрывах звезд и при падении вещества на нейтронные звезды и черные дыры к. п. д. достигает 20—30 %. Дерзайте — и добивайтесь десятков (если не 100 %) процентов  $Mc^2$  в земных условиях!

Таковы идеи, которыми живет и на фоне которых развивается современная физика. Хочется закончить наш рассказ об эволюции этих идей, о сложном процессе их становления какими-то предсказаниями об их будущем развитии. Но, может быть, стоит лучше согласиться с Дж. К. Максвеллом:

«...человеческой мысли несвойственно неизменно устанавливаться в состоянии неизменного уравновешенного покоя, которое мы можем предсказать заранее. Наша мысль скорее подобна дереву, выпускающему побеги, которые тянутся к свету, или же корням дерева, извивающимся среди различных пластов земли, в которые они зарываются. Мы, которые дышим воздухом нашего века и знаем только характеристики современного мышления, — мы не можем предсказать общий тон науки будущего, так же как не можем предвидеть тех открытий, которые принесет это будущее.»