

Вакуум — основная проблема фундаментальной физики

И. РОЗЕНТАЛЬ, А. ЧЕРНИН

ДВЕ С ПОЛОВИНОЙ ТЫСЯЧИ ЛЕТ НАЗАД ГРЕЧЕСКИЕ философы Левкипп и Демокрит выдвинули гипотезу: мир состоит из частиц — атомов и разделяющей их пустоты. В рамках этой гипотезы атомы представлялись как мельчайшие неделимые частицы, а пустота понималась буквально: «ничто». Последующее развитие физики существенно изменило содержание этих понятий, при этом термин «атом» сохранился, а понятие «пустота» совершило длинный и тернистый путь, постепенно превращаясь в очень легкую материю, которую еще в XIX столетии называли эфиром, а сейчас называют вакуумом и считают фундаментом современной физики.

Определение вакуума

Отметим, что понятие абсолютной пустоты вошло в противоречие с экспериментом в средние века, когда начались первые наблюдения световых явлений. Свет взаимодействовал с окружающей средой — интерференция и дифракция, — и это доказало, что не существует абсолютной пустоты. Поэтому были выдвинуты две основные гипотезы: существует особое вещество, названное эфиром, и оно обуславливает наблюдаемые световые эффекты (интерференцию и дифракцию). Первоначально эфир представляли как упругую механическую среду, а распространение световых волн уподобляли распространению звука. Однако эта концепция встретила с большими трудностями, которые особенно проявились в конце XIX столетия, когда Майкельсон экспериментально доказал, что скорость света не зависит от движения источников и приемников света (т.е. от выбора системы отсчета). Эти опыты противоречили гипотезе эфира, определяющего привилегированную систему отсчета, в которой только и справедливы законы оптики. В начале XX столетия была создана теория относительности (Эйнштейн, Пуанкаре, Лоренц), которая отвергла гипотезу существования пустого пространства. Новое состояние было названо вакуумом. Согласно квантовой теории поля, вакуум рассматривается не как простое отсутствие поля, а как одно из возможных состояний поля. Последние события в космологии дают все основания полагать, что во Вселенной доминирует вакуум и плотность его энергии превосходит все «обычные» формы космической материи вместе взятые.

Уравнение состояния вакуума имеет вид

$$p = -\varepsilon,$$

где p — давление, ε — объемная плотность энергии. Заметим, что внешне это уравнение напоминает известное уравнение состояния идеального газа. Например, для нерелятивистского одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} pV, \text{ или } p = \frac{2}{3} \varepsilon,$$

а для газа фотонов

$$p = \frac{\varepsilon}{3}.$$

Однако уравнение состояния вакуума кардинально отличается от этих уравнений наличием в нем знака «минус». Как доказывается в квантовой теории поля, это уравнение состояния уникально, оно единственное, при котором сохраняется основной закон механики — закон инерции. Потери энергии на трение частицы с вакуумной материей будут точно компенсироваться воздействием давления.

Разумеется, эта особенность сохраняется лишь при условии равномерности и прямолинейности движения. Если, например, частица движется по окружности, то вакуум будет изменять характеристики ее движения. Воздействие на частицу оказывают такие «составляющие» вакуума, как «нулевые» (квантовые) колебания электромагнитного поля и рождающиеся на короткое время ($\sim \hbar/(mc^2)$), где \hbar — постоянная Планка, m — масса частицы, c — скорость света) пары частиц (например, электрон плюс позитрон) — такие частицы называют виртуальными. Полная компенсация потерь энергии возможна лишь в том случае, если частица движется прямолинейно и равномерно. Если же частица движется по окружности, то происходит очень небольшой (из-за малости значения $\hbar/(mc^2)$) сдвиг энергии. Именно это наблюдается, например, в атоме водорода. Сдвиг уровней энергии атома водорода (лэмбовский сдвиг) вычислен и измерен до десятого знака, при этом теоретические и экспериментальные значения прекрасно согласуются.

Этот пример (далеко не единственный) свидетельствует о существовании вакуума, взаимодействующего с частицами. И здесь возникает естественный вопрос

(быть может, основной вопрос фундаментальной физики): почему вакуумная материя практически не влияет на макроскопические явления?

Сейчас этот вопрос сделался особенно актуальным в связи с регистрацией новых наблюдательных данных о вспышках сверхновых звезд, находящихся на расстояниях в сотни и тысячи мегапарсек (ранее были доступны расстояния 10–20 мегапарсек). Полученные данные неопровержимо свидетельствуют, что расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется! Из этого неизбежно следует вывод, что во Вселенной доминирует вакуум; по плотности он превосходит все «обычные» формы космической материи вместе взятые. Большая плотность вакуума приводит к ускорению расширения (т.е. к эффекту «антигравитации») именно благодаря приведенному выше необычному уравнению состояния вакуумной материи.

Метагалактика и Вселенная

Попытаемся четко определить понятия, с которыми нам придется встречаться. Прежде всего приведем порядок величин, с которыми мы будем иметь дело:

Название объекта	Размеры, см
Звезда	10^{11}
Галактика	10^{22}
Метагалактика	10^{28}

Размеры Метагалактики – это размеры, в настоящее время максимально доступные для непосредственных измерений. Поэтому, наверное, общепринято называть ее размер R_M размером Вселенной, или Мира. На наш взгляд, весь исторический опыт указывает, что наибольшие доступные размеры определяются техникой (или уровнем цивилизации). Например, еще несколько сот лет назад можно было с уверенностью определить лишь размеры Земли ($\sim 10^9$ см). Следовательно, можно сказать, что величина R_M есть наибольшее измеряемое сейчас расстояние. Вселенная же – существенно больший объект. В настоящее время есть косвенные указания, что размеры Вселенной на много порядков превышают R_M .

Космологическая постоянная

Мы не имеем возможности изложить здесь подробно общую теорию относительности (ОТО). Заметим лишь, что теоретическая основа космологии основана на ОТО. (Наиболее простое изложение ОТО и ее приложений к космологии содержится в статье И.Хрипловича «Общая теория относительности»: журнал «Квант», 1999, № 4. – *Прим. ред.*)

Отметим центральную идею ОТО. Эта теория должна отразить особенности гравитации и, по мысли Эйнштейна, быть основой космологии и специальной теории относительности. Все эти идеи нашли свое воплощение в современной науке, исключая одно важное обстоятельство: до сих пор не построена последовательная квантовая теория гравитации.

Одной из важных особенностей созданной Эйнштей-

ном ОТО является идея существования во Вселенной новой гипотетической материи, которую называют космическим вакуумом. Плотность энергии ϵ_Λ такого вакуума (Λ -члена) равна

$$\epsilon_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G},$$

где Λ – введенная Эйнштейном космологическая постоянная, G – известная гравитационная постоянная.

Космологическая постоянная была введена Эйнштейном, чтобы обеспечить неизменность (постоянство) Вселенной во времени. Однако развитие ОТО (Фридман) и проведенные наблюдения (Хаббл) продемонстрировали переменность Метагалактики. Два объекта в пределах Метагалактики, разделенные расстоянием r , удалялись друг от друга со скоростью

$$v = H(t)r.$$

В нашу эпоху ($t = t_0$) постоянная $H(t_0)$ (названная постоянной Хаббла) равна

$$H(t_0) \sim 10^{-18} \text{ с}^{-1}.$$

В Метагалактике, при $t = t_0$, $|\Lambda| < 10^{-56} \text{ см}^{-2}$. Однако во Вселенной вне Метагалактики величина $|\Lambda|$ может быть очень большой и определять все процессы, в ней происходящие.

Таким образом, построить модель Метагалактики (которая во времена Эйнштейна отождествлялась со Вселенной), согласующуюся с наблюдательными данными и гипотезой о доминировании Λ -члена, оказалось невозможным, и Эйнштейн считал введение его в ОТО самой большой ошибкой в своей научной деятельности. Как оказалось далее, такая отрицательная самооценка также была ошибочной.

Отметим, что космологическая постоянная описывает гравитационные силы притяжения (если $\Lambda < 0$) или отталкивания ($\Lambda > 0$); соответствующие ей силы являются дополнительными к ньютоновским силам притяжения. Введение же Λ -члена означает введение новых сил гравитации.

Влияние вакуума на динамику Метагалактики может установить только опыт. Чтобы упростить изложение экспериментов, проведенных в последнее время и оказавших подлинно революционное влияние на космологию, мы используем нерелятивистское приближение анализа расширения Метагалактики (Милн и Маккри, начало 1930-х годов). Допустим, что Метагалактика имеет шарообразную форму с равномерной плотностью ρ_G . Тогда уравнение движения для частицы на поверхности шара выглядит так:

$$R'' = -\frac{GM}{R^2},$$

где R – радиус шара, а $M = \rho_G (4\pi/3) R^3$ – его полная масса. В первом приближении можно положить, что масса M остается неизменной, и тогда решение этого уравнения имеет вид

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{R} = E,$$

где E – постоянная интегрирования. Последнее уравнение имеет простую интерпретацию – оно отражает закон сохранения энергии для изолированного элемента Метагалактики с единичной массой. Оправданием этого вывода является то, что он приводит к решению, отвечающему основному принципу космологии – закону Хаббла

$$v_{12} = H(t)r_{12},$$

где v_{12} и r_{12} – относительная скорость и расстояние между двумя элементами (1, 2) Метагалактики. Необходимо подчеркнуть, что приведенное выше соотношение справедливо лишь для времени $t \approx t_0$. При временах $t \ll t_0$ Метагалактика имеет меньшие размеры, и при вычислении расстояния r_{12} следует использовать более сложные соотношения.

Вакуум и другие формы космической материи

По наблюдательным данным о сверхновых, о которых мы упоминали, плотность вакуума ρ_v превышает суммарную плотность остальных компонентов космической среды: темного вещества (ρ_d), светящегося вещества звезд и галактик (ρ_p) и излучения (ρ_r).

Обычно плотности компонентов относят к так называемой критической плотности $\rho_c = (3/8)(H^2/G) = 0,6 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Теперь приведем последние экспериментальные данные для этих отношений:

$$\rho_v/\rho_c = 0,7 \pm 01,$$

$$\rho_d/\rho_c = 0,3 \pm 01,$$

$$\rho_p/\rho_c = 0,02 \pm 0,01,$$

$$\rho_r/\rho_c \sim 10^{-4}.$$

Здесь нужно сделать одно замечание, Иногда темную материю, состоящую из неизвестных электронейтральных частиц, включают в Λ -член. Это абсолютно неверно. Темная материя занимает периферическую часть галактик и, следовательно, распределена (в отличие от вакуума) крайне неравномерно, а Λ -член занимает почти равномерно всю Галактику. Реальная материя состоит из известных частиц (протонов, нейтронов, электронов, фотонов и других частиц). Однако упомянутая путаница не совсем безосновательна. Вопрос «из чего» состоит Λ -член, вероятно, основной в физике вакуума и также далек от окончательного решения.

Но одно условие остается – Λ -член (который иногда отождествляют с вакуумом), если и состоит из частиц, то последние должны обладать уникальными свойствами: отсутствием спина (скалярные частицы), стабильностью и электронейтральностью. В противном случае не будет выполняться основное условие $p = -\epsilon$, и вакуум превратится в отвергнутый давно эфир. Оказывается, найти такие частицы среди четырехсот уже обнаруженных на ускорителях частиц совсем не просто. Наиболее подходящим кандидатом в частицы вакуума являются частицы Хиггса, которые еще уверенно не обнаружены непосредственно, но их существование является необходимым условием для форми-

рования теории, объединяющей электромагнитное и слабое взаимодействия. (По самым последним и не очень надежным данным, полученным на ускорителе LEP, масса Хиггс-бозона порядка 150 ГэВ.)

Проблема природы темной материи также весьма интересна, хотя темная материя не так универсальна, как вакуум, и, вероятно, не играет в эволюции Вселенной столь принципиальной роли.

Вакуум является основой еще одного фундаментального вопроса: почему его плотность $\rho_v < 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ столь мала? Оценки, основанные на соображениях размерности, указывают, что значение ρ_v должно быть на много десятков порядков больше. Действительно,

$$\rho_v \approx m \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^{-3},$$

поэтому если даже принять $m = 10^{-24} \text{ г}$ (протон), то приходим к значению $\rho_v \sim 10^{16} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Если же полагать, что масса m определяется фундаментальными постоянными \hbar , G и c , то плотность должна была бы достигнуть уж совсем фантастической величины.

Закключение

Интерпретация различия между этими оценками и реальным значением ρ_v является, пожалуй, наиболее интригующей проблемой фундаментальной физики. По нашему мнению, возможно, что вакуум Вселенной состоит из массивных частиц и что его плотность весьма велика. Однако при образовании Метагалактики происходит фазовый переход, который существенно уменьшает массу вакуумных частиц и трансформирует их энергию в реальные частицы и энергию их движения. Чрезвычайная малость массы вакуумных частиц определяется необходимостью длительного существования Метагалактики для образования сложных форм материи.

