

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