

ПРИЛОЖЕНИЕ

[530.1+531.5] (023)

МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ И ГРАВИТАЦИЯ *)

В физике используются величины, измеряемые в различных единицах. Причина этого — желание экспериментаторов выражать свои результаты в числах не слишком больших или не слишком малых. Сам же масштаб единиц определяется используемой аппаратурой. Шкала масштабов в современной физике очень широка — от элементарных частиц до галактик, а потому единственный набор единиц неудобен. Так, космологи не говорят, например, что плотность числа галактик $\sim 10^{-75}$ на кубический сантиметр, а микрофизики не выражают массу электрона в единицах массы Солнца.

Теоретики, имеющие дело с символами, а не с числами, могут быть более экономными. Единицы теоретиков выражаются через длину (L), массу (M) и время (T). Необходимы ли, однако, все три величины? Два важных достижения нашего века показали, как свести все единицы к одной. Во-первых, это специальная теория относительности, которая вводит фундаментальную скорость c , скорость света, и делает пространство и время более родственными. При выборе $c = 1$ время и пространство в релятивистской теории измеряются в одних единицах. Другую фундаментальную постоянную предоставляет квантовая теория. Это первоначальная постоянная Планка h , деленная на 2π . В единицах $h = h/2\pi$ исчисляется квант действия, что отражает дискретную природу физического мира. В классической физике $\hbar = 0$. В квантовой физике принимают $\hbar = 1$. Последнее условие связывает единицы массы и длины. Таким образом, при условиях $c = 1$, $\hbar = 1$ мы выражаем все физические величины в степенях единицы длины L .

Масштабные преобразования выявляют эффекты изменения единицы длины, которая может быть либо однородной повсюду, либо, в общем случае, произвольно меняться для различных точек пространства и времени. Возникает вопрос: как при масштабных преобразованиях модифицируются физические законы? Если выражение закона сохраняет свою форму при масштабном преобразовании, то говорят, что этот закон масштабно-инвариантен. Масштабно-инварианты, например, электромагнитная теория Максвелла и уравнение Дирака, описывающее распространение нейтрино.

Все ли физические законы масштабно-инвариантны? Ответ зависит от предположения о характере поведения масс элементарных частиц при масштабных преобразованиях. Имеются различные точки зрения.

Согласно одной из них, при масштабных преобразованиях массы должны изменяться. Мы уже убедились, что при $c = 1$ и $\hbar = 1$ единица массы выражается через

*) Составлено Владимиром М. Дубовиком на основе перевода: Scale Invariance and Gravity, Nature (Phys. Sci.) 234 (No. 44), 1 (1971); The Dilaton and Gravity, Phys. Today 25 (1), 24 (1972).

L. Действительно, она пропорциональна L^{-1} , и мы можем ожидать, что при масштабных преобразованиях массы будут изменяться согласно закону L^{-1} . Если это действительно так, то физические законы могут быть сделаны инвариантными относительно масштабных преобразований общего вида. Такая точка зрения предполагает также, что масса не является внутренним свойством частицы, а зависит от свойств пространства и времени. Это восходит к гипотезе Маха, высказанной в конце прошлого века, о том, что свойство инерции частицы возникает благодаря наличию всей остальной Вселенной. В настоящее время сформулирована теория¹, основанная на гипотезе Маха, в которой массы преобразуются как L^{-1} . Эта теория описывает также гравитацию и аналогична общей теории относительности, исключая случай сильных гравитационных полей. Общая теория относительности не инвариантна относительно масштабных преобразований общего вида.

Согласно другой точки зрения, массы — это внутреннее свойство частиц, и они не должны изменяться при масштабных преобразованиях. Это не затрагивает масштабной инвариантности электромагнитной теории или теории нейтрино, так как массы фотона и нейтрино равны нулю. Сильные же и слабые взаимодействия связаны с массивными частицами и нарушают масштабную инвариантность.

Тем не менее примерно десять лет назад² удалось понять, что теория, включающая массивные частицы, может быть сделана масштабно-инвариантной, если ввести новую элементарную частицу — «дилатон», связанную с растяжением. Подобно фотону, это — бозон с нулевой массой покоя, но не имеющий спина. Свойство масштабной инвариантности теряется лишь в том случае, если дилатону приписать массу. Причину отсутствия массы у дилатона и его связь с гравитацией можно понять так. Как известно, общая теория относительности предсказывает существование гравитационных волн, исходя из решений уравнений для гравитационного поля (для метрического тензора), аналогичных запаздывающим потенциалам в электродинамике. Гравитационные волны, таким образом, отождествляются с периодическими изменениями (колебаниями) метрики пространства-времени. Рассмотрим длинноволновую область, т. е. область малых значений импульсов k . Тогда в пределе бесконечно больших длин волн колебания сводятся к растяжениям и сжатиям всего пространства.

При требовании масштабной инвариантности растяжения и сжатия не изменяют энергии системы, поэтому спектр колебаний $\omega(k)$ должен начинаться с нулевой частоты при нулевом импульсе. На языке квазичастиц это эквивалентно тому, что массу дилатона в формуле $\omega(k) = (k^2 + m^2)^{1/2}$ следует положить равной нулю. Свойство масштабной инвариантности теряется лишь в том случае, если дилатону приписать массу. Связанные с этим возможные эффекты разобрал Я. Фуджии. Он указал³, что дилатоны с массой могут проявляться как неньютоновская компонента гравитационной силы. Фуджии предположил, что масса дилатона имеет величину порядка $(G\alpha'^{-2})^{1/2}$, где G — ньютоновская гравитационная постоянная, α' — универсальный наклон траекторий Редже (используется система единиц, в которой $c = \hbar = 1$). Приведенная величина является типичной комбинацией фундаментальных констант гравитационного и сильного взаимодействий. Неньютоновское поведение могло бы сказываться на расстояниях порядка k^{-1} , величина которых около километра или менее. Как указывает Фуджии, до сих пор никакими достоверными экспериментами ньютоновский закон тяготения проверен не был.

Каким образом мы можем обнаружить неньютоновскую компоненту? Наиболее прямым опытом является высокопрецизионный вариант опыта Кавендиша⁴, в котором можно было бы измерять эту компоненту для k^{-1} , соответствующих десяткам метров, или измерение того, как может изменяться закон тяготения при понижении уровня воды в резервуаре. К этим исследованиям могут присоединиться и астрофизики. Они должны тщательно изучить поведение искусственного лунного спутника. Орбиты лунных спутников располагаются намного ближе к Луне, чем орбиты земных спутников к Земле, и могут испытывать возмущение за счет короткодействующих сил. Все такого рода эксперименты, предупреждает Фуджии, будут содержать неизвестные и непознаваемые ошибки. Но все же он полагает, что k^{-1} соответствует значению, попадающему в интервал от десяти метров до 1 км или в область порядка 1 см.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. F. Hoyle, J. V. Narlikar, Proc. Roy. Soc. A282, 491 (1964).
2. Y. Nambu, Phys. Rev. Lett. 4, 380 (1960); J. Goldstone, Nuovo Cimento 19, 154 (1961).
3. Y. Fujii, Nature (Phys. Sci.) 234 (No. 44), 5 (1971).
4. Y. Veins, Phys. Today 24 (4), 35 (1971).