

- результатом погружения могут быть творческие работы, сочинения, доклады, научные статьи и др.;
- на уроке создается ситуация «разделенного успеха» – красивый результат общего труда;
- погружение позволяет при определенных условиях не «проходить» произведение, а проживать или переживать его;
- заканчивается погружение вопросом, что лично каждому дала работа;
- используются сравнения и версионный принцип преподавания;
- балльной системы оценивания нет; успехи каждого ученика сравниваются с его личным продвижением;
- педагогическое погружение может использоваться в любом возрасте, с первого по одиннадцатый классы и, конечно, в ВУЗах.

СЛАБЫЙ ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ В КВАНТОВОЙ ОБЛАСТИ

С. В. Гришкевич

В классической физике утверждается, что никакое внешнее однородное статическое поле не может быть обнаружено в свободно падающем лифте, поскольку наблюдатель, пробные тела и сам лифт приобретают в этом поле одинаковые ускорения. Это утверждение, известное как слабый принцип эквивалентности, есть не что иное, как формулировка наблюдаемого равенства гравитационной и инертной масс. Но здесь речь идет о классических системах. Опыты по закручиванию нити для маятников равной длины, выполненные Этвишем, Дикке – это классические опыты, т. е. опыты, при проведении которых использовались классические пробные тела [1]. Однако нельзя с уверенностью утверждать о справедливости слабого принципа эквивалентности и в том случае, если гравитационное поле действовало на квантовую частицу. На сегодняшний день имеются результаты [2], которые показывают, что простой классический кинематический подход содержит принципиальные трудности при его экстраполяции на квантовую область; для квантовых частиц может наблюдаться нарушение принципа эквивалентности.

В научной литературе часто используется следующее утверждение [3]: если любая из двух величин, A или B , несет квантовую неопределенность, Δ тогда нельзя утверждать о равенстве A и B с точно-

стью $\frac{\Delta}{(A + B)/2}$. Следуя этому утверждению, можно сформулировать квантовое нарушение принципа эквивалентности в виде

$$m_g = (1 + f)m_i, \quad (1)$$

где f исчезает для классического случая и не равно нулю для квантового. Формула (1) записана исходя из общих соображений, а не вычислена с использованием конкретной физической модели. Поэтому можно задаться целью проверить эту формулу, используя определенную физическую систему. Например, можно взять атом водорода в нестационарном состоянии, который свободно падает на фоне классического гравитационного поля. Необходимо проверить, будет ли такая система двигаться по геодезической или в случае нарушения принципа эквивалентности будет наблюдаться отклонение, порядок которого предстоит оценить. Рассмотрим именно этот физический случай и начнем с исследования уравнений движения квантовой системы.

В качестве модели возьмем систему, для которой будут выполняться уравнения Матиссона–Попапетру (одноэлектронный атом во внешнем классическом гравитационном поле). Будем рассматривать движение нашей системы в сопутствующей системе отсчета одиночного наблюдателя. Уравнения Матиссона–Попапетру тогда можно переписать в тетрадных компонентах следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu W_{(\nu)} &= -c e^{(\mu)(\sigma)(\tau)} R_{(4)(\sigma)(\nu)(\mu)} \bar{S}_{(\tau)} + q F_{(\nu)(4)} \\ \frac{d}{d\tau} \bar{S}_{(\alpha)} &= e_{(\alpha)(\sigma)(\nu)} \omega^{(\nu)} \bar{S}^{(\sigma)}, \quad \bar{S}_{(4)} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где μ – масса ядра, $\bar{S}_{(\tau)}$ – классическое значение спина ядра. Необходимо рассчитать тетрадные компоненты усредненного электромагнитного поля $F_{(\nu)(4)}$, создаваемого атомным электроном. Для этого сначала обратим внимание на следующее: ясно, что для случая стационарного состояния нашей квантовой системы нарушения принципа эквивалентности наблюдаться не будет. Но иначе будет обстоять дело, если состояние будет нестационарным; заранее трудно сказать, будет ли отклонение иметь существенный порядок. Поэтому необходимо получить выражения, по которым можно было бы оценить, насколько существенно нарушение принципа эквивалентности. Пусть наша

квантовая система находится в нестационарном состоянии. Тогда для ожидаемых значений 3-скорости и 3-ускорения запишем:

$$\left\langle \begin{matrix} 0^{(\alpha)} \\ x \end{matrix} \right\rangle = \varepsilon_1^\alpha, \quad \left\langle \begin{matrix} 00^{(\alpha)} \\ x \end{matrix} \right\rangle = \varepsilon_2^\alpha \quad (3)$$

где величины ε_1^α и ε_2^α можно оценить, используя соотношения неопределенности Гейзенберга. Вычислив (3), можно записать выражение для усредненного электромагнитного поля $F_{(v)(4)}$ и уравнения движения (2). Но уравнения (2) было бы разумно рассмотреть в приближении слабого поля. Именно этому приближению отвечают наиболее доступные для проведения эксперимента системы, а именно системы, подобные солнечной, т. е. медленно движущиеся тела, связанные слабыми гравитационными силами. Ньютоновское приближение будет достаточно точно описывать задачу в такого рода системах. С учетом всего сказанного можно переписать (2) в лабораторной системе координат, зная, как время t в лабораторных координатах связано с собственным временем τ , измеряемым для атома, свободно падающего со скоростью v :

$$(\mu + m + m_{\text{э.м.}}) \frac{d^2 x^\alpha}{dt^2} = -\frac{m}{c^2} (1 - v^2) \varepsilon_2^\alpha - \frac{\mu + m + m_{\text{э.м.}}}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial x^\alpha} + O\left(\frac{1}{c^2}\right), \quad (4)$$

где $m_{\text{э.м.}}$ – масса электромагнитного поля электрона, ϕ – ньютоновский потенциал. Вследствие симметрии системы целесообразно перейти от декартовых координат к сферическим. Расчет показывает, что единственный ненулевой член в ε_2^α будет член с z компонентой ε_2^z , численное значение для которого будет следующим:

$$\varepsilon_2^z = 33.02 \times 10^{22} \frac{\text{см}}{c^2} \cos 15.37 \times 10^{15} \frac{t}{c}. \quad (5)$$

Для того чтобы оценить порядок отклонения движения атома от движения по геодезической, поступим следующим образом: сначала численно решаем уравнение (4), затем решаем уравнение, которое описывает движение атома по геодезической (уравнение (4), но с правочленным членом ε_2^z , равным нулю); после чего оба решения сравниваются, и результат сравнения даст нам искомую величину. После

проведения этой процедуры получим, что отклонение будет величина порядка 10^{-7} .

Формула (4) не совпадает с (1), которая часто встречается в публикациях. Это дает основания говорить о несправедливости использования (1) для оценки нарушения принципа эквивалентности. Этого результата можно было ожидать, ведь форма соотношения (1) приводится исходя не из конкретной квантовой системы, а из общих соображений. Полученная формула (4), напротив, выведена из конкретной физической модели и дает вполне измеримое число для отклонения движения атома от движения по геодезической. Трудность, с которой можно столкнуться при реализации данной квантовой системы на эксперименте, может заключаться в приготовлении необходимого нестационарного состояния для атома водорода.

Литература

1. Dicke R. H., Roll P. G., Krotkov R. // Ann. Phys. 1976. V 26. P. 442.
2. Viola L., Onofrio R. // Phys. Rev. 1997. D55. P. 455.
3. Adunas G. Z., Rodriguez-Milla E., Ahluwalia D. V. Probing Quantum Aspects of Gravity // Theoretical Physic Group. 2000. ISGBG.
4. Gorbatsievich A. K. On the equation of motion of a one-electron atom in an external gravitational field // Acta Physica Polonica. 1986. № 2. Vol. B 17.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФРАКТАЛЬНЫХ СЛОИСТЫХ СРЕД

С. В. Жуковский

Наряду с общими операторными методами при изучении физики сложных слоистых структур плодотворно аналитическое рассмотрение конкретных геометрических закономерностей структуры (таких, как периодичность или упорядоченность) в сравнении со свойствами распространения волн (спектральные или локализационные закономерности) с целью установления корреляции между ними.

В рамках такого подхода лучше всего изучены два класса многослойников: *периодические*, в спектрах которых обнаружены фотонные запрещенные зоны (ФЗЗ), и *случайные*, обнаруживающие локализацию энергии волны внутри структуры [1]. Значительно менее изучен промежуточный случай *детерминированных неперiodических* структур (ДНС), однако и в этом случае было установлено, что *квазипериодические* среды обладают самоподобными спектрами [2].