

Эффект “дрожания” (Zitterbewegung) не может наблюдаться

Р.Ф. О’Коннел (США)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru)

arXiv:1103.4625v1 [quant-ph] 23 Mar 2011

Zitterbewegung is not an observable

R. F. O’Connell

Department of Physics and Astronomy,
Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803-4001
(Dated: March 25, 2011)

Недавно было заявлено, что эффект “Zitterbewegung” реально наблюдался. Мы, однако, утверждаем, что он не является наблюдаемым, и что авторы эксперимента должны переосмыслить его результаты.

Уравнение Дирака для свободной частицы [1] приводит к тому, что в собственном состоянии импульса и энергии скорость не является просто пропорциональной импульсу, но также содержит второй член, который быстро флуктуирует. В результате координата как функция времени представляет не только обычное прямолинейное равномерное движение, но также содержит дополнительный член, соответствующий очень быстрым осцилляциям (Шрёдингер в 1930 году назвал это “Zitterbewegung”, или “дрожанием”). Недавно было заявлено [2], что это движение теперь было измерено с помощью квантового моделирования одномерного уравнения Дирака с использованием одного замороженного иона (ионной ловушки), ведущего себя как свободная релятивистская квантовая частица. Здесь мы основываем свое возражение на том, что Zitterbewegung не является наблюдаемой величиной. Ключевая причина для появления этого члена состоит в том, что хотя импульс $\vec{p}$ является интегралом движения в уравнении Дирака, скорость $\vec{v}$ таковым не является. Однако, это просто следствие представления матриц Дирака, и можно выбрать иные представления (где $\vec{p} \sim \vec{v}$), которые верны в той же степени, но не содержат подобного странного движения [3].

Решение этой кажущейся проблемы восходит к работе Moller’a [4], который указал, что тело со спином $\vec{S}$ обладает минимальным радиусом, равным $\vec{S}/mc$. Кроме того, в специальной теории относительности следует обобщить $\vec{S}$ до антисимметричного тензора $S_{\alpha\beta} = -S_{\beta\alpha}$, который редуцируется до 3-вектора $\vec{S}$ в системе отсчета покоя частицы. Чтобы это выполнялось, необходимо определить дополнительное условие для спина $v^\alpha S_\alpha = 0$ (соответствующее условию для скорости $\vec{v} = 0$ в системе покоя) или $p^\alpha S_\alpha = 0$ (соответствует условию $\vec{p} = 0$ в системе покоя), или комбинацию этих условий.

По существу, выбор дополнительного условия для спина равносильно выбору нового центра масс для вращающейся частицы таким образом, чтобы начальная координата была дополнена малой величиной $\leq \vec{S}/mc$ (которая составляет $\leq 10^{-11}$ см для элементарных частиц), что автоматически приводит к новому

соотношению для импульса-скорости. Простейший выбор – это $\vec{p} \sim \vec{v}$. Эта концепция детально обсуждалась Barker'ом и автором настоящей статьи в [5] контексте общей теории относительности, о работе, относящейся к спину и орбитальной прецессии гироскопа, где было рассмотрено кажущееся несоответствие с работой Шиффа и где было показано, что все наблюдаемые результаты являются независимыми от выбора координат или, соответственно, выбора дополнительных условий дополнительных условий.

Возвращаясь теперь к релятивистской квантовой механике, простейшая динамика появляется при пропорциональности $\vec{p}$ и $m\vec{v}$. Действительно, автором настоящей статьи и Wigner'ом в [6] было указано, что это возможно для всех локализованных состояний и произвольного спина. Однако в случае частицы Дирака это было подробно показано в работе Foldy и Wouthuysen'a [7].

В частности, авторы последней работы заменили оператор положения на члены, содержащие матрицы спина, а также выполнили соответствующую замену в операторах спина (чтобы обеспечить выполнение коммутационных соотношений). Основным результатом для свободной частицы было получить представление, в котором импульс и скорость пропорциональны между собой, а эффект Zitterbewegung не возникает. Следует подчеркнуть, что преобразование Foldy-Wouthuysen'a рассматривается сейчас как общая часть дискуссии о релятивистской теории электрона.

На самом деле, в хорошо известной книге Bjorken и Drell'a [8] этому посвящена целая глава. В частности, эти авторы утверждают, что "... поучительно представить теорию Дирака в форме, которая показывает различные члены взаимодействия в легко интерпретируемой форме", путем построения унитарного преобразования (авторы Foldy-Wouthuysen), которое, разумеется, не меняет физики. Однако следует отметить, что наблюдаемы лишь уровни энергии, но не математическое ожидание значений оператора положения.

Вывод состоит в том, что эффект Zitterbewegung не является наблюдаемым. То, что авторы [2] выбирают для анализа движение замороженных ионов в терминах одномерного уравнения Дирака, не меняет того факта, что ионы обладают еще и спином, и не опровергает наш главный аргумент, суть которого состоит в использовании преобразования координат. Таким образом, нам кажется, что результаты [2] должны быть переосмыслены. Экспериментаторы могут выбирать частное представление, но эксперименты не могут показывать различия между равноправными, но различными представлениями, используемыми теоретиками, которые все приводят к тем же самым наблюдаемым.

Возвращаясь к интерпретации экспериментальных результатов, авторы [2] утверждают, что для изучения эффекта Zitterbewegung "необходимо измерить

$\langle \hat{x}(t) \rangle$, математическое ожидание оператора положения", и продолжают: "данные были сглажены в соответствии с модельной эвристической функцией", которую они затем использовали для извлечения информации об измеренном эффекте Zitterbewegung. Однако даже для нерелятивистской квантовой частицы без спина

величина $\langle \hat{x}(t) \rangle$ не является наблюдаемой вследствие соотношения неопределенностей между импульсом и координатой. Таким образом, по нашему мнению, авторы измерили просто зависящие от времени флуктуации величины $\langle \hat{x}(t) \rangle$.

Благодарности

Эта работа была частично поддержана Национальным Научным фондом (National Science Foundation), грант № ECCS-0757204.

Ссылки

- [1] J. J. Sakurai, Advanced Quantum Mechanics, (Addison-Wesley, Reading, MA 1967).
- [2] R. Gerritsma, G. Kirchmair, F. Zahringer, E. Solano, R. Blatt and C. F. Roos, Nature 463, 68 (2010).
- [3] R. F. O'Connell, "Rotation and Spin in Physics", in General Relativity and John Archibald Wheeler, (Springer, 2010), p. 325.
- [4] C. Moller, "The Theory of Relativity," 2nd ed. (Oxford University Press, 1972), p. 176.
- [5] B. M. Barker and R. F. O'Connell, Gen. Relativ. Gravit. 5, 539 (1974).
- [6] R. F. O'Connell and E. P. Wigner, Phys. Lett. 61A, 353 (1977).
- [7] L. L. Foldy and S. A. Wouthuysen, Phys. Rev. 78, 29 (1950).
- [8] J. D. Bjorken and S. D. Drell, "Relativistic Quantum Mechanics" (McGraw, New York, 1964).