

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

530.145(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР**

(30 мая 1990 г.)

30 мая 1990 г. в Институте физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. Р. А. Сю н я е в. Исследования зоны центра Галактики, пульсаров и квазипериодических источников в рентгеновском диапазоне. Результаты модуля «Квант» и обсерватории «Гранат».

2. Л. А. Х а л ф и н. Квантовый эффект Зенона.

Краткое содержание одного доклада публикуется ниже.

Л. А. Халфин. Квантовый эффект Зенона.

1. Будет ли уменьшаться вероятность распада нестабильного состояния, если достаточно часто измерять — распадается ли это состояние? Будет ли уменьшаться вероятность перехода из начального состояния под влиянием фиксированного взаимодействия, если достаточно часто измерять, произошел ли этот переход? Квантовая теория утверждает: да, будут,— что с классической точки зрения кажется невозможным и парадоксальным. Эти эффекты изменения закона распада, вероятности перехода (вообще говоря, не только уменьшение, но, возможно, и увеличение) в зависимости от частоты измерения и носят название квантовых эффектов Зенона (КЭЗ). В своей экстремальной форме, при непрерывных измерениях, из квантовой теории следует утверждение, что начальное (нестабильное) состояние «замерзает» и никакой квантовой динамики во времени вообще не происходит (!). Это удивительное предсказание современной квантовой теории носит естественное название квантового парадокса Зенона.

2. КЭЗ в распадах нестабильных состояний (атомов, ядер, элементарных частиц) экспериментально пока не обнаружены. Однако КЭЗ для вероятности переходов между атомными уровнями был экспериментально наблюден в конце 1989 г. группой физиков в США, о чем в качестве сенсации сообщил журнал «Science» [1]. Не входя в подробности эксперимента, опишем только его идею и результаты. Рассмотрим трехуровневую атомную систему. Время жизни уровня 3 очень мало, так что атом, возбужденный из основного состояния (уровень 1) на уровень 3, практически сразу же возвращается на уровень 1, излучая при этом фотоны с частотой ν_{13} . Измеряя число фотонов с частотой ν_{13} из обратного перехода $3 \rightarrow 1$, мы измеряем тем самым число атомов, находящихся на основном уровне 1. Описываемый эксперимент состоит в следующем. Лазером

с частотой фотонов ν_{12} в течение интервала времени T облучают атомы, находившиеся в начальном состоянии 1, переводя их в состояние 2. Одновременно лазером с частотой фотонов ν_{13} через малые интервалы времени $\Delta t \ll T$ облучают те же атомы и, измеряя число фотонов с частотой ν_{13} от обратного перехода $3 \rightarrow 1$, измеряют тем самым число атомов в начальном состоянии 1 в моменты времени $t_n = n\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Экспериментально наблюдаемый эффект (КЭЗ) состоит в том, что чем через меньший интервал времени Δt производят измерение числа атомов в начальном состоянии 1, тем с меньшей вероятностью они в течение интервала времени T переходят в возбужденное состояние 2 (!).

3. Физическая суть КЭЗ связана с одновременным влиянием двух фундаментальных свойств квантовой теории: 1) редукция вектора состояния при измерении; 2) неэкспоненциальность закона распада, т. е. неоднородность во времени вероятности перехода в единицу времени. Поскольку и редукция при измерении, связанная с проблемой квантово-классического соответствия (см. современные результаты [2, 3] и обзор [4], и неэкспоненциальность закона распада (неоднородность во времени) принадлежат к фундаментальным свойствам квантовой теории, то исследование КЭЗ представляет несомненный интерес.

4. Квантовый эффект (и парадокс) Зенона были впервые предсказаны в работах автора конца 50-х и начала 60-х годов [5, 6]. В 1968 г. [7] КЭЗ был доказан в минимально необходимом предположении о конечности первого момента (среднего значения) плотности распределения энергии нестабильного состояния. Через 10 лет эти результаты были повторены в работах Сударшана и Мисры [8], которым и принадлежит название квантовый парадокс Зенона. В дальнейшем, вплоть до последнего времени [9], подобные результаты исследовались во многих работах, из которых укажем только [10, 11], где можно найти и другие ссылки. Предлагались и различные названия самого эффекта («Watchdog effect» [12], «A watched pot never boils» [13]) — в зависимости от некоторых деталей способа наблюдения эффекта.

5. Воспроизведем основной теоретический результат. Рассмотрим задачу Коши квантовой теории:

$$H|\psi(t)\rangle = i \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t}, \quad |\psi_0\rangle = |\psi(t=0)\rangle, \quad \langle \psi_0 | \psi_0 \rangle = 1, \quad (1)$$

$$H = \text{const}(t).$$

Согласно теореме Фока — Крылова [14] амплитуда вероятности распада $p(t) = \langle \psi_0 | \psi(t) \rangle$ допускает представление

$$p(t) = \int_{\text{Spec} H} \omega(E) \exp(-iEt) dE, \quad (2)$$

где $\omega(E)$ — плотность распределения энергии (инвариант движения) нестабильной физической системы. Вероятность распада в единицу времени

$$\Gamma(t) = -\frac{dL(t)}{dt} L^{-1}(t),$$

где $L(t) = |p(t)|^2$. Для чисто экспоненциального закона распада $L(t) = \exp(-\Gamma t)$ имеем $\Gamma(t) = \Gamma = \text{const}(t)$, т. е. однородность во времени и Γ можно вычислить из нестационарной теории возмущений — золотое правило Ферми. В 1957 г., впервые в работах автора [5], а затем в большом количестве последовавших работ (см., например, обзор [15]) было доказано, что закон распада $L(t)$ не может быть строго экспоненциальным, поскольку $\text{Spec} H \geq 0$, и более того, что неэкспоненциальный член в законе распада является аналитической функцией в $\text{Re} t > 0$ и тем

самым он не равен нулю ни в каком интервале времени. Эта принципиальная неоднородность во времени (на современном языке — спонтанное нарушение инвариантности — однородности во времени — физических процессов) уже приводит к КЭЗ. Однако существенный КЭЗ следует из теоремы (Л. А. Халфин, 1968 [7]):

$$\int_{\text{Spec } H} E \omega(E) dE < \infty \Rightarrow \left. \frac{dL(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Из (3) непосредственно следует КЭЗ и парадокс Зенона: при $t=0$ все нестабильные состояния замерзают (стабильны) $\Gamma(t=0)=0$. О возможном приложении этого результата к проблеме распада протона см. [16]. Из (3) следует, что в окрестности $t \approx 0$ справедливо $L(t) \approx 1 - \sigma^2 t^2$, где σ^2 — дисперсия плотности распределения энергии.

6. Наиболее важная задача — оценка области существенной неэкспоненциальности $[0, t_{н.э.}]$. Эта область определяется плотностью распределения энергии $\omega(E)$, т. е. «приготовлением» (историей) начального состояния $|\psi_0\rangle$ и связана с обратной задачей $L(t) \rightarrow p(t) \rightarrow \omega(E)$ квантовой теории распада, которая была исследована в [6, 17]. В работах [18, 19] были получены общие оценки для $t_{н.э.}$, которые, вообще говоря, определяются областью больших энергий E , в частности дисперсией σ^2 , а не полюсными характеристиками распределений энергии, ответственными за экспоненциальный член в законе распада. Из оценок [18, 19] следует, что чем меньше σ^2 , тем, вообще говоря, больше $t_{н.э.}$ Для обычных распределений энергии нестабильных частиц $t_{н.э.}$ достаточно малы. Однако для двухуровневых состояний типа $K^0 - \bar{K}^0$ -мезонов КЭЗ могут быть и не малы [20]. Для многоуровневых систем возможно такое их приготовление, что область КЭЗ становится реальной для наблюдения. При этом замедление распада потом переходит в резкое его усиление — этот эффект назван в [9] «ticking effect».

7. Для наблюдения КЭЗ необходимо как можно больше разрешение измерений во времени. В то же время специальным приготовлением нестабильных состояний, например уменьшением σ^2 , а это зависит от реакции рождения нестабильных состояний, можно облегчить наблюдение КЭЗ. Из сказанного ясно, что наблюдение КЭЗ в рамках обратной задачи позволило бы получить уникальную информацию об истории (приготовлении) нестабильных состояний, которую нельзя в принципе получить из исследования экспоненциального закона распада (см. о возможности метода барионохронологии [21] для проблем космологии).

8. Сегодня выглядят фантастическими способы «замораживания» физических процессов, в частности распадов, с помощью КЭЗ, которые бы открыли не менее фантастические возможные приложения. Однако никаких принципиальных запретов для этого нет и недавнее наблюдение первого КЭЗ [1] подчеркивает, что фантастические возможности, связанные с КЭЗ, могут быть реализованы в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Science. November 1989. V. 246. P. 888.
2. Khalfin L. A., Tsirelson B. S. // Proc. of the Symposium on the Foundations of Modern Physics/Eds. P. Lahti, P. Mittelstaedt.—Singapore a. o.: World Scientific, 1987.— P. 369.
3. Khalfin L. A. // Complexity, Entropy and the Physics of Information/Ed. W. Zurek.— Addison-Wesley, 1990.— (SFI Studies in the Sciences of Complexity. V. IX).
4. Khalfin L. A., Tsirelson B. S. Quantum-classical correspondence in the light of Bell inequalities.— Preprint.— MIT, 1990.
5. Халфин Л. А. // ДАН СССР. 1957. Т. 115. С. 277; ЖЭТФ. 1958. Т. 33. С. 1371; Квантовая теория распада физических систем: Автореферат диссертации ... канд. физ.-мат. наук.— М.: ФИАН СССР, 1960.
6. Халфин Л. А. // ДАН СССР. 1961. Т. 141. С. 599.

7. Халфин Л. А. // Письма ЖЭТФ. 1968. Т. 8. С. 106.
8. Misra B., Sudarshan E. C. G. // J. Math. Phys. 1977. V. 18. P. 756.
9. Schulman L. S., Doering C. R., Gaveu B. Quantum decay in multilevel systems.— Clarkson University preprint.— 1990.
10. Sudbery A. // Ann. of Phys. 1984. V. 157. P. 512.
- [11] Peres A. // At. J. Phys. 1980. V. 48. P. 931.
12. Kraus K. // Found. Phys. 1981. V. 11. P. 547.
13. Parkinson M. T. // Nucl. Phys. Ser. B. 1974. V. 69. P. 399.
14. Крылов Н. С., Фок В. А. // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. С. 93.
15. Fonda L, Ghirardi G. C., Rimini A. // Rep. Prog. Phys. 1978. V. 41. P. 587.
16. Khalfin L. A. // Phys. Lett. Ser. B. 1982. V. 112. P. 283.
17. Халфин Л. А. Исследования по квантовой теории нестабильных частиц.— Авто-реферат диссертации ... докт. физ.-мат. наук.— Дубна: ЛТФ ОИЯИ, 1972.
18. Khalfin L. A. // Intern. Symposium on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei: Abstracts.— Heidelberg, 1986.
19. Khalfin L. A. // Preprint LOMI E-2-83.— Leningrad, 1983.
20. Khalfin L. A. // Intern. Symposium on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei: Abstracts.— Montreal, 1989.
21. Khalfin L. A. Preprint LOMI E-11-83.— Leningrad, 1983.