

Универсальное время туннелирования

Г. Нимц (Германия)

Реферат подготовил М.Х.Шульман (shulman@dol.ru)

arXiv:0901.3968v1 [quant-ph] 26 Jan 2009

Universal Time Tunneling

Günter Nimtz*

*II. Physikalisches Institut, Universität zu Köln
Zùlpicherstrasse 77, 50937 Köln*

* G.Nimtz@uni-koeln.de

(Dated: January 27, 2009)

PACS numbers: PACS numbers. 42.25.Bs, 03.65.Ta, 42.70.Qs, 73.40.Gk, 32.80.Rm

Насколько велико время туннелирования волнового пакета при прохождении им барьера? Квантово-механические вычисления говорят о том, что время внутри барьера равно нулю. В 90-х годах были осуществлены эксперименты такого типа в микроволновом диапазоне. Результат подтвердили предсказания квантовой механики. Время туннелирования электрона тяжело измерить вследствие его очень малой продолжительности и наличия паразитных эффектов из-за возможного доминирования его электрического заряда. Однако совсем недавно было измерено время туннелирования при атомной ионизации. Сегодня доступны и представлены в данной статье экспериментальные данные относительно времен туннелирования фотонов, фононов и электронов. Представляется, что время туннелирования является универсальной характеристикой, независимой от конкретной задачи.

В 1962 году квантово-механическое исследование туннелирования волнового пакета, которое осуществил Hartman, выявило для прозрачных барьеров сверхсветовую скорость и время туннелирования, независимое от длины барьера [1, 17]. Вычисления были подтверждены экспериментами по туннелированию фотонов, см., например, [17, 18, 19, 20]. Haibel и Nimtz предложили эмпирическое соотношение для времени туннелирования, которое и наблюдалось в опытах с некоторыми фотонными барьерами [8]. Это эмпирическое соотношение было теоретически обосновано Esposito как для частиц, так и для чередующихся оптических мод [9]. Он показал, что может быть использовано простое соотношение

$$\tau \approx \frac{1}{\nu} = T$$

В случае туннелирования частицы, описываемой уравнением Шредингера, это время можно представить в виде

$$\tau_A = \frac{\hbar}{\sqrt{E(V_0 - E)}} = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{E}{4\pi^2(V_0 - E)},$$

где E и V_0 – энергия частицы и высота прямоугольного потенциального барьера, причем $E = \hbar \nu$. В случае полного внутреннего отражения на двойной призме это время равно

$$\tau_A = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{n_1 \sin^2 \theta}{\pi \cos \theta \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}},$$

где $n_1 \geq n_2$ – индексы отражения призмы и зазора соответственно, θ – угол падения. Уравнения Шрёдингера и Гельмгольца дают аналогичное соотношение для времени туннелирования. Поправка относительно выражения $1/\nu = T$ составляет, как правило, несколько процентов.

Туннелирующие моды распространяются за нулевое время. Это противоречит часто даваемой интерпретации туннелирования на основе соотношения неопределенностей, где частице требуется энергия, чтобы преодолеть барьер. Однако это может быть связано со сравнительно длительным прохождением барьера в вакууме, гораздо более длительным, чем наблюдаемое время прохождения. Взаимодействие с прямоугольным барьером происходит на фронте барьера и приводит к короткому универсальному времени прохождения предположительно для всех полей, поскольку математическое описание длительности этого времени одно и то же.

Ссылки

- [1] T. Hartman, J. Appl. Physics, 33, 3427-3433 (1962)
- [2] C. K. Carniglia and L. Mandel, Phys. Rev.D, 3, 280 (1971)
- [3] S. Twareque Ali, Phys. Rev.D, 7, 1668 (1973)
- [4] F. Low and P. Mende, Annals of Physics, 210, 380 (1991)
- [5] Z. Wang, C. Xiong, and B. He, Phys. Rev.A, 75, 013813-1 (2007)
- [6] G. Nimtz, Do Evanescent Modes Violate Relativistic Causality? Edited by C. L'ammerzahl and J. Ehlers, The Lecture Notes in Physics, 702, 506 (2006)
- [7] A. Haibel, G. Nimtz, and A. A. Stahlhofen, Phys. Rev. E, 63, 047601 (2001)
- [8] A. Haibel and G. Nimtz, Ann. Phys. (Leipzig) 10, 707 (2001)
- [9] S. Esposito, Phys. Rev. E 64, 026609-1 (2001)
- [10] S. Yang, J. H. Page, Z. Liu, M. L. Cowan, C. T. Chan and P. Sheng, Phys. Rev. Lett. 88, 104301-1 (2002)
- [11] G. Nimtz and A. A. Stahlhofen, Ann. Phys. (Berlin) 17, 374 (2008)
- [12] P. Eckle, A. N. Pfeiffer, C. Cirelli, A. Staudte, R. D'orner, H. G. Muller, M. Büttiker und U.Keller, Science 322, 1525 (2008)
- [13] A. Enders and G. Nimtz, J. Phys.I (France) 2,1693-1698(1992)
- [14] G. Nimtz, Quantum Electronics, 27, 417 (2003)
- [15] A. A. Stahlhofen and G. Nimtz, Europhys. Lett. 76, 189 (2006)
- [16] A. Sommerfeld, Lectures on Theoretical Physics, Optics (Academic Press Inc. US, 1954)
- [17] G. Nimtz, A. Enders, and H. Spieker, J. Phys. (I) (France) 4, 565 (1994)
- [18] A. M. Steinberg, P. G. Kwiat, and R. Y. Chiao, Phys. Rev. Lett. 71, 708-711 (1993)
- [19] A. Enders and G. Nimtz, Phys. Rev. E 48, 632 (1994)
- [20] C. Spielmann, R. Szipocs, A. Stingl, and F. Krausz Phys. Rev. Lett., 73, 2308(1994)