

## Проблема времени в квантовой механике

М. Бауэр (Мексика)

Реферат подготовил М.Х. Шульман ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru), [www.timeorigin21.narod.ru](http://www.timeorigin21.narod.ru))

---

arXiv:1606.02618v1 [quant-ph] 8 Jun 2016

### The problem of time in quantum mechanics

М. Bauer [bauer@fisica.unam.mx](mailto:bauer@fisica.unam.mx)

Instituto de Física  
Universidad Nacional Autónoma de México

June 9, 2016

---

Проблема времени в квантовой механике (КМ) заключается в том, что время в зависящем от времени уравнении Шрёдингера (TDSE) является параметром, а не оператором. Экспериментальное подтверждение уравнения Шрёдингера говорит, что этот параметр соответствует временной координате в лабораторной системе отсчета как в нерелятивистской, так и в релятивистской КМ. Объяснение его присутствия в TDSE привело к анализу времени как возникающего свойства, вытекающего из запутывания микроскопической системы с классическим окружением во внешней замкнутой не зависящей от времени системе, это свойство является очевидным только внутреннего наблюдателя [16, 17].

С другой стороны, самосопряженный “оператор времени” может быть определен в соответствии с дираковской формулировкой релятивистской КМ. Как для всех наблюдаемых, он согласуется в представлении Гейзенберга с зависимостью от времени параметра. Кроме того, в качестве наблюдаемой он, как показано, удовлетворяет соотношению неопределенностей для гамильтониана Дирака, который может быть связан с соотношением для координаты и импульса, в соответствии с оригинальной интерпретацией Бора. Тем не менее, возражение Паули обходится, поскольку, как генератор унитарного преобразования, он фактически формирует смещения в непрерывном спектре импульса и, таким образом, лишь косвенно в спектре энергии. Более того, он поддерживает существование внутреннего свойства, часов де Бройля с периодом  $\tau_0 = h/m_0 c^2$  [18, 19, 20].

Основанный на наблюдаемой “координата”, оператор времени должен демонстрировать поведение типа “Zitterbewegung”<sup>1</sup> относительно его линейной зависимости от  $t$ . Как это происходит с координатой при Zitterbewegung, ее наблюдение выходит за пределы современных технических возможностей. Однако это может быть наблюдаемым в системах, которые воспроизводят дираковский гамильтониан, где “дрожащая координата” уже была продемонстрирована экспериментально [21, 22, 23]. Соответствующий оператор времени может быть сконструирован в каждом случае, а ее свойства – изучены.

Наконец, общая относительность увязывает динамическое поведение с пространством-временем, что надежно подтверждает недавнее детектирование

---

<sup>1</sup> Термин, обозначающий эффект “дрожания электрона” (прим. перев.).

гравитационных волн. Поскольку динамическое время окончательно несовместимо со временем как параметром, это ставится во главу фундаментальной “проблемы времени” в квантовой гравитации [24, 25, 26].

## Ссылки

- [1] W. Pauli, *"The general principles of quantum mechanics"*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, footnote p.63 (1980),
- [2] P.A.M. Dirac, *"The principles of quantum mechanics"* (4th ed.), Oxford, Clarendon Press (1958).
- [3] a) The proof that the commutation relation  $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$  necessarily implies that the corresponding spectra of  $\hat{x}$  and  $\hat{p}$  go from  $-\infty$  to  $+\infty$  continuously is absent from most introductory textbooks. This is pedagogically unfortunate, as the student is induced to consider the infinite continuity of these spectra as an additional assumption unrelated to unitary transformations; b) Pauli's argument is sustained also by the fact that the system stability requires the energy to have a finite minimum.
- [4] J.G. Muga, R. Sala Mayato, I.L. Egusquiza, "Introduction", in J.G. Muga, R. Sala Mayato, I.L. Egusquiza (eds.) *"Time in Quantum Mechanics"*, pp 1-28 Berlin Springer (2002); reprinted as *"Time in Quantum Mechanics, Vol. 1"*, Lect. Notes Phys. 734, Springer-Verlag, Berlin (2008)
- [5] J.G. Muga, A. Ruschhaupt and A. del Campo (eds), *"Time in Quantum Mechanics, Vol. 2"*, Lect. Notes Phys. 789, Springer-Verlag, Berlin (2009).
- [6] M. Bauer and P.A. Mello, "The time-energy uncertainty relation", Ann.Phys. 111, 38-60 (1978)
- [7] P. Busch, "The time-energy uncertainty relation", chapter 3 in J.G. Muga, R. Sala Mayato, I.L. Egusquiza (eds.) *"Time in Quantum Mechanics"*, Berlin Springer (2002); revised version arXiv:quant-ph/0105049v3 (2007)
- [8] J. Briggs, "A derivation of the time-energy uncertainty relation", Journal of Physics: Conference Series 99, 012002 (2008)
- [9] M. Bauer, "A dynamical time operator in Dirac's relativistic quantum mechanics", Int.J.Mod.Phys. A 29, 1450036 (2014)
- [10] B. Thaller, *"The Dirac Equation"*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1992)
- [11] W. Greiner, *"Relativistic Quantum Mechanics - Wave equations"*, (3d ed.) Springer, Berlin Heidelberg New York (2000)
- [12] A. Messiah, *"Quantum Mechanics"*, Vol.I, p. 442, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, and John Wiley&Sons, New York London Sidney, 4th printing (1966)
- [13] T.J. Jordan, *"Linear operators for quantum mechanics"*, John Wiley & Sons, Inc. (1969)
- [14] L. de Broglie, Ph.D. thesis; Ann. Phys., Ser. 10e, t. III (1925). English translation reprinted in Ann.Fond.Louis de Broglie 17, p. 92 (1992)
- [15] W.E. Baylis, "De Broglie waves as an effect of clock desynchronization", Can.J.Phys. 85, pp.1317-1323 (2007)
- [16] J.S. Briggs and Jan M. Rost, "Time dependence in quantum mechanics", Eur.Phys.J.10, (2000); "On the Derivation of the Time-dependent Equation of Schrodinger", Foundations of Physics 31, (2001)
- [17] E. Moreva et al., "Time from quantum entanglement: an experimental illustration", arXiv:1310.4691v1 [quant-ph] (2013); "The time as an emergent property of quantum mechanics, a synthetic description of a first experimental approach", J.Phys.: Conference Series 626, 012019 (2015)

- [18] R. Ferber, "A Missing Link: What is behind de Broglie's "periodic phenomenon"?", *Found.Phys.Lett.* 9, 575-586 (1996)
- [19] S.Y. Lan et al., "A Clock Directly Linking Time to a ParticleMass", *Science* 339, 554-557 (2013)
- [20] P. Catillon *et al.*, "A Search for the de Broglie Particle Internal Clock by means of Electron Channeling", *Found.Phys.* 38, 659-664 (2008)
- [21] J. Cserti and G. David, "Unified description of Zitterbewegung for spintronic, graphene, and superconducting systems", *Phys.Rev. B* 74, 172305 (2006)
- [22] R. Gerritsma *et al.*, "Quantum simulation of the Dirac equation", *Nature* 463, pp.68-71 (2010)
- [23] L.J. LeBlanc *et al.*, "Direct observation of Zitterbewegung in a Bose-Einstein condensate", *New J.Phys.* 15, 073011 (2013)
- [24] E. Anderson, "The problem of time in quantum gravity", *Ann.Phys. (Berlin)* 524, 757-786 (2012) and references therein; also arXiv:1009.2157v3 [gr-qc]
- [25] C.J. Isham, "Canonical Quantum Gravity and the Problem of Time", arXiv:gr-qc/9210011v1, (1992); "Prima Facie Questions in Quantum Gravity", arXiv:gr-qc/9310031v1 (1993)
- [26] J. Butterfield and C.J. Isham, "On the Emergence of Time in Quantum Gravity", arXiv:gr-qc/9901024v1 (1999)
- [27] M. Bauer, "Quantum Gravity and a Time Operator in Relativistic Quantum Mechanics", arXiv:gr-qc/1605.01659 (2016)