**Факультетвычислительной математики и кибернетики**

**Межфакультетский курс**

**Квантовая природа вычислений**

Quantum nature of computations

Лекции: **24 часа**

**Лекторы**: профессор, д.ф-м.н. **Юрий Игоревич Ожигов**,

профессор, д.ф-м.н., чл.-корр. РАН **Владимир Валентинович Воеводин**

**Аннотация**

Курс продолжает читавшийся в прошлом семестре цикл лекций по сложным процессам с точки зрения квантовой физики, но является отдельным, открытым для студентов всех специальностей. Он посвящен конструктивному подходу к естествознанию, основой которого являются вычисления. Этот подход имеет глубокую историю и сейчас воплощен в суперкомпьютерах и иных системах высокопроизводительных вычислений. Будет показана неразрывная связь конструктивизма с квантовой теорией, краткий обзор которой делается на доступном языке. В частности, будет подробно рассказано о грандиозном проекте квантового компьютера, отдельные фрагменты которого в виде квантовой криптографии уже работают на обеспечение информационной безопасности нашей страны. Для слушателей важным будут пути развития квантовых вычислений и их возможности уже в ближайшем будущем; кто-то из них, возможно, и сам примет участие в этом проекте после окончания Университета.

**Программа**

1. История вычислений и конструктивного подхода в математике. Труды Маркова-младшего и Тьюринга.

2. Вычислительные машины: принципы их работы. Элементная база, драйверы, операционная система. История компьютеров и их применений.

3. Современные высокопроизводительные вычисления. Суперкомпьютеры, вычислительные сети, быстродействие и память. Рейтинг суперкомпьютеров. Закон Мура и квантовый предел быстродействия.

4. Вычисления и микромир. Роль квантовой теории в вычислительный практике. Случайность и детерминизм.

5. Закон интерференции на примере света. Взаимодействие света и вещества.

6. Матричная механика: от школьной оптики к фейнмановским диаграммам.

7. Квантовый компьютер как новый этап развития вычислений. Где он уже работает и почему необходимо его развитие. Фейнмановский интерфейс пользователя и его возможности. Понятие квантового алгоритма.

8. Работы по квантовому компьютеру в России. Вклад МГУ в проект квантового компьютера.

9. Квантовая операционная система.

10. Квантовая нелокальность, мгновенное действие на расстоянии и теория относительности. Роль квантового дальнодействия в распределенных вычислениях. Возможна ли сверхсветовая коммуникация?

11. Квантовая телепортация.

12. Наблюдение квантовых состояний. Квантовая метрология и томография. Квантовое принятие решений.

13. Управление сложными квантовыми системами как объектами физики. Границы наших возможностей.

14. Суперкомпьютерное моделирование фрагментов квантового компьютера. Контр-интуитивные эффекты микромира и их использование.

15. Предсказательное моделирование и управление живым на квантовом уровне: возможно ли это и как этого достичь.

16. Квантовая связь. Квантовый канал и его отличие от классического.

17. Принципы и протоколы квантовой криптографии. Квантовая теория информации.

18. Заключительная лекция: темы исследовательских работ для студентов старших курсов и аспирантов.

**Вопросы к зачету:**

1. Что такое конструктивное вещественное число?

2. Что такое алгоритм и вычисление?

3. Что такое вероятностный алгоритм?

4. Что такое алгоритм с оракулом?

5. Какие вычисления распараллеливаются, а какие — нет?

6. Что такое вектор квантового состояния?

7. Написать уравнение Шредингера.

8. Что такое наблюдение?

9. Может ли свет двигаться не по прямой и когда это возможно?

10. Сформулировать закон интерференции.

11. Что такое квантовый компьютер и его назначение.

12. Как квантовое дальнодействие согласуется с общей теорией относительности.

13. Какие технологии используются для создания квантового компьютера.

14. Что такое закон Мура и почему он не работает в настоящее время.

15. Как можно использовать квантовую нелокальность в распределенных вычислениях?

16. Как работает квантовый криптографический протокол BB84.

17. Как сравниваются друг с другом суперкомпьютеры?

18. Привести примеры задач естествознания и техники, решение которых невозможно без применения высокопроизводительных вычислений.

**Список литературы к МФК «Квантовый мир» 2021**

1) Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Квантовая механика, Москва, Физ-мат. литература, 2012 — 224 pp. — ISBN 978-5-9221-0819-5.

2) A.A.Markov - Jn, About the continuiosly of constructive functions, Uspehi mat. nauk, 1954, 9, N 3 (61), pp. 226-229.

3) G.S.Tseitin, Algorithmic operators in the constructive metric spaces, Doklady Academii Nauk USSR (rus), 1959, 128, N 1, pp.49-52.

4) Ozhigov Y.I. Quantum computers speed up classical with probability zero, Chaos, Solitons and Fractals, 1999, 10, 1147-1163.

5) Richard P. Feynman, Simulating Physics with Computers, International Journal of Theoretical Physics, VoL 21, Nos. 6/7, 1982, pp. 467-488.

6) D.Deutsch, (1985), "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer" (PDF). Proceedings of the Royal Society A. 400 (1818): 97–117.

7) R.Feynman, QED: The strange theory of linght and matter, Princeton University Press, 1985.

8) R.Feynman, D.Hibbs, Quantum mechanics and path integrals, 1984,

9) A. Barenco, C. H. Bennett, R. Cleve, D. P. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin, H. Weinfurte r, Elementary gates for quantum computation Phys.Rev. A52 (1995) 3457.

10) A. Kitaev, A. Shen, M.Vialyi, Classical and quantum computations, 1999. 192 pp. ISBN 5-900916-35-9.

11) L. Fedichkin, M. Yanchenko, K. A. Valiev, Novel coherent quantum bit using spatial quantization levels in semiconductor quantum dot, Quantum Computers and Computing 1, 58 (2000).

12) L.Grover, A fast quantum mechanical algorithm for database search, Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), May 1996, pages 212-219. Proceedings, Melville, NY, 2006, vol. 810.

13) Y.Ozhigov, Lower bounds of a quantum search for an extreme point, Proc.Roy.Soc.Lond. A455 (1999) 2165-2172.

14) C.H. Bennett, E. Bernstein, G. Brassard and U.V. Vazirani, ''Strengths and weaknesses of quantum computing'' SIAM J. on Computing, Vol. 26, No. 5, pp. 1510--1523, 1997.

15) C. Zalka: Grover's quantum searching algorithm is optimal. Phys. Rev. A 60 (1999) 2746--2751.

16) В.В.Воеводин, Вл.В.Воеводин, Параллельные вычисления, BXV- Санкт.-Петербург, 2002, — 608 стр. ISBN 5-94157-160-7.

17) Limits to Parallel Computation: P-Completeness Theory, R. Greenlaw, H. J. Hoover, W. L. Ruzzo, Oxford University Press, 1995, pp. 336.

18) Shor P. Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring // Foundations of Computer Science, 1994 Proceedings., 35th Annual Symposium on — IEEE, 1994. — P. 124–134. — ISBN 0-8186-6580-7 — doi:10.1109/SFCS.1994.365700

19) C.Zalka, Simulating quantum systems on a quantum computer, Proceedings of The Royal Society A 454(1969):313-322, January 1998.

20) S.Wiesner, Simulations of Many-Body Quantum Systems by a Quantum Computer, arXiv:quant-ph/9603028.

21) Ozhigov Y.I., Quantum computations, $http://sqi.cs.msu.ru/store/storage/g1xr51z\_ozhigov.pdf$

22) Donald E. Knuth, The Art of Computer Programming (TAOCP), ISBN 0-201-89683-4

23) A.S.Holevo, Some estimats of quantity of information transmitted by quanatum channels, Problemi peredachi informatsii, 1973, vol. 9, N3, pp. 3–11.

24) A.Messiah, Quantum mechanics, Dover publication, 2017, ISSN 0486409244.

25) Y.Ozhigov, L.Fedichkin, Quantum computer with fixed interaction is universal, Pis’ma v ZhETF, vol. 11, pp. 328-330.

26) Y.I.Ozhigov, Quantum computer, Max Press (Rus), 2020, ISBN 978-5-317-06403-7, 174 pp.

27) Knill, E., Laflamme, R., Milburn, G. J. (2001). "A scheme for efficient quantum computation with linear optics". Nature. Nature Publishing Group. 409 (6816): 46–52

28) Gottesman, D., Chuang, I. L. (1999-11-25). "Demonstrating the viability of universal quantum computation using teleportation and single-qubit operations". Nature. 402 (6760): 390–393

29) Bennett, Charles H.; Brassard, Gilles; Crépeau, Claude; Jozsa, Richard; Peres, Asher; Wootters, William K. (1993-03-29). "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels". Physical Review Letters. 70 (13): 1895–1899.

30) Popescu, S., Knill-Laflamme-Milburn Quantum Computation with Bosonic Atoms, PRL 99, 130503 (2007).

31) G. Rempe, H. Walther, and N. Klein. Observation of quantum collapse and revival in a one-atom maser, Phys. Rev. Lett., 1987, Vol. 58, no. 4, p. 353.

32) C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, and D. J. Wineland, Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate, Phys. Rev. Lett. 75, 4714 (1995).

33) Azuma H., Quantum computation with the Jaynes-Cummings model, Prog. Theor. Phys. 126, 369-385 (2011).

34) E.T. Jaynes, F.W. Cummings, Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser, Proc. IEEE 51 (1): 89–109, (1963). doi:10.1109/PROC.1963.1664

35) V. Ladunov, Y. Ozhigov, N. Skovoroda , Computer simulation of quantum effects in Tavis-Cummings model and its applications, SPIE Proceedings, vol. 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016; 102242X (2017) https://doi.org/10.1117/12.2267190

36) Richard P. Feynman, Simulating Physics with Computers, International Journal of Theoretical Physics, VoL 21, Nos. 6/7, 1982, pp. 467-488.

37) H. Breuer and F. Petruccione, The Theory of Open Quantum Systems, Oxford (2002).

38) Y.Ozhigov, About quantum computer software, Quantum Information and Computation, Vol. 20, No. 7\&8 (2020) 570-580.

39) V. P. Maslov, “Rotation of a Neutron in the Coat of Helium-5 as a Classical Particle for a Relatively Large Value of the Hidden Parameter t meas ”, Math. Notes, 103:1 (2018), 67–74.

40) Flavio Del Santo, Nicolas Gisin , Reply to a "Comment on 'Physics without determinism: Alternative interpretations of classical physics' ", Phys. Rev. A 102, 036202 (2020)

41) Flavio Del Santo and Nicolas Gisin, Physics without determinism: Alternative interpretations of classical physics, Phys. Rev. A 100, 062107, 2019, DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.062107

42) Arthur Jabs, A conjecture concerning determinism, reduction, and measurement in quantum mechanics, Quantum Studies: Mathematics and Foundtions, Vol.3 (4) 279-292, 2016.

43) J. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox"; Physics, (1964), 1 (3): 195–200.

44) J. Bell, "On the problem of hidden variables in quantum mechanics"; Reeview of Modern Physics, (1966), 38, N3, стр. 447-452.

45) Aspect, Alain; Dalibard, Jean; Roger, Gérard (December 1982). "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time- Varying Analyzers". Physical Review Letters. 49 (25): 1804–1807.

46) Jian-Wei Pan; D. Bouwmeester; M. Daniell; H. Weinfurter; A. Zeilinger (2000). "Experimental test of quantum nonlocality in three-photon GHZ entanglement". Nature. 403 (6769): 515–519.

47) Daniel M. Greenberger, Michael A. Horne, Anton Zeilinger, Going Beyond Bell's Theorem, in: 'Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe', M. Kafatos (Ed.), Kluwer, Dordrecht, 69-72 (1989).

48) AIP Conference Proceedings, vol. 962, Quantum Theory: Reconsideration of foundations -4, ed. Guillaume Adenier, Andrei Yu. Khrennikov, Pekka Lahti, Vladimir I. Man'ko and Theo M. Nieuwenhuizen, (2007), ISBN: 978-0-7354-0479-3.

49) F.Ablayev, C.Moore, C.Pollett, Quantum and Stochastic Branching Programs of Bounded Width, International Colloquium on Automata, Languages, and Programming , ICALP 2002: Automata, Languages and Programming pp 343-354.

50) Dovesi, R., Civalleri, B., Roetti, C., Saunders, V. R. and Orlando, R. (2005) Ab Initio Quantum Simulation in Solid State Chemistry, in Reviews in Computational Chemistry, Volume 21 (eds K. B. Lipkowitz, R. Larter and T. R. Cundari), John Wiley \& Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi:

10.1002/0471720895.ch1

51) Y.I.Ozhigov, Distributed synthesis of chains with one-way biphotonic