

Теория света как квантового клеточного автомата

А. Бисо и др. (Италия)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1407.6928v1 [quant-ph] 25 Jul 2014

Quantum Cellular Automaton Theory of Light

Alessandro Bisio (alessandro.bisio@unipv.it),
Giacomo Mauro D'Ariano (dariano@unipv.it) and
Paolo Perinotti (paolo.perinotti@unipv.it)

Dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia and
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo IV, via Bassi 6, 27100 Pavia

PACS numbers: 03.67.Ac, 03.67.Lx, 03.65.Pm

Квантовый клеточный автомат (Quantum Cellular Automaton – QCA) – это квантовая версия популярного клеточного автомата фон Неймана [2]. Он описывает конечную эволюцию дискретного набора квантовых систем, каждая из которых взаимодействует с конечным числом соседей в ходе унитарного преобразования на единичном шаге эволюции. Идея квантовой версии клеточного автомата уже содержалась в ранней работе Фейнмана [3], а позднее была использована в качестве объекта исследования в сообществе по квантовой информатике [4-6], в частности, применительно к так называемым Квантовым Блужданиям, описывающим сектор частиц QCA с линейной эволюцией в квантовом поле [7-11].

Заинтересованность в QCA мотивирована их потенциальным применением в некоторых областях, например, в статистической механике систем с решетками и в квантовых вычислениях с микроловушками [12] и оптическими решетками [13]. Более того, Квантовые Блуждания были применены при разработке новых квантовых алгоритмов с компьютерным ускорением [14, 15].

Недавно возникла идея, что QCA могут быть использованы для описания более фундаментальной динамики на планковских масштабах, из чего возникает обычная квантовая теория поля [1, 16, 17], эта идея привлекает все больше внимания [18, 19]. Предложение моделировать физику на планковских масштабах при помощи классического автомата в дискретной среде вначале появилось в работе 'т Хоофта [20], а Квантовые Блуждания рассматривались на предмет моделирования лоренц-ковариантных дифференциальных уравнений в [8-10, 21, 22].

До настоящего времени наибольший интерес был сфокусирован на выводе уравнения Дирака для свободного фермионного поля. Выбор анализа фермионов как элементарных физических систем мотивирован идеей, что количество информации, которое может храниться в конечном объеме, должно быть конечным, что также предполагается и в физике черных дыр [23, 24]. Однако никогда не задавался вопрос, может ли фермионная теория QCA охватить динамику бозонных полей. В данной публикации показывается, как электродинамика свободной области выводится из двух QCA Вейля [1] с фермионными полями. Динамические уравнения, следующие в пределе малого

волнового вектора k , оказываются уравнениями Максвелла. Однако при больших значениях k проявляет себя собственная дискретность планковского масштаба, приводящая к отклонениям от теории Максвелла. Самое важное, что динамика QCA вводит зависящую от k скорость света, т.е. свойство, которое уже рассматривалось в некоторых подходах к квантовой гравитации и которое в принципе могло быть экспериментально обнаружено при астрофизических наблюдениях [25-33].

При нашем подходе фотон оказывается составной частицей, состоящей из пары коррелированных безмассовых фермионов. Этот сценарий очень напоминает нейтринную теорию света де-Бройля [34-38], где предполагалось, что может состоять из пары нейтрино-антинейтрино, связанной некоторым взаимодействием. Дефект этой теории состоит в том, что составная частица не может подчиняться точным коммутационным соотношениям для бозонов [39]. Однако, как было показано в [38], не-бозонные члены вносят пренебрежимый вклад в обычные плотности энергии. В нашем случае составная природа фотона дает ограничение числа фотонов, которое может занимать одну моду. Однако, как показано, эффект насыщения, обусловленный фермионной природой фотона, лежит далеко за пределами современной лазерной технологии.

В разделе II статьи, после напоминания основных понятий QCA, приводится обзор автомата Вейля из [1]. В разделе III строится набор билинейных фермионных операторов, которые, как доказывается в разделе IV, описывают эволюцию в соответствии с уравнениями Максвелла. В разделе V показано, что операторы поляризации, введенные в разделе IV, могут рассматриваться в качестве бозонных операторов в режиме малой плотности энергии. В качестве побочного следствия этого анализа установлен результат, дополняющий доказательство, приведенное в [40], согласно которому степень запутанности оценивается тем, могут ли пары фермионов рассматриваться в качестве независимых фотонов. В разделе VI представлены феноменологические следствия этой теории QCA, наиболее значительным из которых является появление зависимости скорости света от волнового вектора k . В этом же разделе обсуждаются возможные экспериментальные тесты такой зависимости в астрофизической области и сравнивается полученный авторами результат с теми, которые приводятся литературе по квантовой гравитации [25-33].

Таким образом, в настоящей статье выводится полная теоретическая картина свободного поля квантового излучения в планковском масштабе, основанного на идее квантового автомата Вейля, выведенного из основополагающих принципов в [1]. В отличие от предшествующих аргументов, основанных именно на дискретности геометрии, настоящий подход предлагает полностью квантово-теоретическую интерпретацию, которая допускает точные наблюдаемые предсказания, включающие электромагнитное излучение,

Результаты настоящей работы оставляют место для будущих исследований. Главный вопрос – это как преобразования симметрии могут быть представлены в модели. Сценарий, который рассмотрен авторами, ограничен фиксированной системой отсчета, и с целью охватить стандартную теорию следует обсудить, как группа Пуанкаре действует на такую физическую модель. Этот анализ мог бы быть выполнен, следуя [51], где показана совместимость динамической модели квантового клеточного автомата с моделью деформированной относительности [31, 52], которая представляет нелинейное действие группы Пуанкаре.

Ссылки

[1] G. M. D'Ariano and P. Perinotti, arXiv preprint arXiv:1306.1934 (2013).

- [2] J. von Neumann, Theory of self-reproducing automata (University of Illinois Press, Urbana and London, 1966).
- [3] R. Feynman, International journal of theoretical physics 21, 467 (1982).
- [4] B. Schumacher and R. Werner, Arxiv preprint quantph/0405174 (2004).
- [5] P. Arrighi, V. Nesme, and R. Werner, Journal of Computer and System Sciences 77, 372 (2011).
- [6] D. Gross, V. Nesme, H. Vogts, and R. Werner, Communications in Mathematical Physics pp. 1-36 (2012).
- [7] G. Grossing and A. Zeilinger, Complex Systems 2, 197 (1988).
- [8] S. Succi and R. Benzi, Physica D: Nonlinear Phenomena 69, 327 (1993).
- [9] D. Meyer, Journal of Statistical Physics 85, 551 (1996).
- [10] I. Bialynicki-Birula, Physical Review D 49, 6920 (1994).
- [11] A. Ambainis, E. Bach, A. Nayak, A. Vishwanath, and J. Watrous, in Proceedings of the thirty-third annual ACM symposium on Theory of computing (ACM, 2001), pp. 37-49.
- [12] J. I. Cirac and P. Zoller, Nature 404, 579 (2000).
- [13] I. Bloch, Physics World 17, 25 (2004).
- [14] A. M. Childs, R. Cleve, E. Deotto, E. Farhi, S. Gutmann, and D. A. Spielman, in Proceedings of the thirty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing (ACM, 2003), pp. 59-68.
- [15] E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann, arXiv preprint quant-ph/0702144 (2007).
- [16] G. M. D'Ariano, Phys. Lett. A 376 (2011).
- [17] A. Bisio, G. D'Ariano, and A. Tosini, arXiv preprint arXiv:1212.2839 (2012).
- [18] T. C. Farrelly and A. J. Short, Physical Review A 89, 012302 (2014).
- [19] P. Arrighi, M. Forets, and V. Nesme, arXiv preprint arXiv:1307.3524 (2013).
- [20] G. 't Hooft, Nuclear Physics B 342, 471 (1990).
- [21] F. W. Strauch, Phys. Rev. A 73, 054302 (2006).
- [22] J. Yepez, Quantum Information Processing 4, 471 (2006).
- [23] J. D. Bekenstein, Physical Review D 7, 2333 (1973).
- [24] S. W. Hawking, Communications in mathematical physics 43, 199 (1975).
- [25] J. Ellis, N. Mavromatos, and D. V. Nanopoulos, Physics Letters B 293, 37 (1992).
- [26] J. Lukierski, H. Ruegg, and W. J. Zakrzewski, Annals of Physics 243, 90 (1995).
- [27] G. 't Hooft, Class. Quantum Grav. 13, 1023 (1996).
- [28] G. Amelino-Camelia, J. Ellis, N. Mavromatos, D. V. Nanopoulos, and S. Sarkar, Nature 393, 763 (1998).
- [29] G. Amelino-Camelia, Physics Letters B 510, 255 (2001).
- [30] G. Amelino-Camelia and T. Piran, Physical Review D 64, 036005 (2001).
- [31] J. Magueijo and L. Smolin, Phys. Rev. Lett. 88, 190403 (2002).
- [32] W. A. Christiansen, Y. J. Ng, and H. van Dam, Phys. Rev. Lett. 96, 051301 (2006), URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.051301>.
- [33] J. Ellis and N. E. Mavromatos, Astroparticle Physics 43, 50 (2013).
- [34] L. De Broglie, Une nouvelle conception de la lumière, vol. 181 (Hermann & Cie, 1934).
- [35] P. Jordan, Zeitschrift für Physik 93, 464 (1935).
- [36] R. d. L. Kronig, Physica 3, 1120 (1936).
- [37] W. Perkins, Physical Review D 5, 1375 (1972).
- [38] W. Perkins, International Journal of Theoretical Physics 41, 823 (2002).
- [39] M. Pryce, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 165, 247 (1938).
- [40] C. Chudzik, O. Oke, and W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. 104, 070402 (2010), URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.104.070402>.

- [41] Y. de Cornulier, R. Tessera, and A. Valette, *GAFA Geometric And Functional Analysis* 17, 770 (2007), ISSN 1016-443X, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00039-007-0604-0>.
- [42] M. Combescot and C. Tanguy, *EPL (Europhysics Letters)* 55, 390 (2001).
- [43] S. Rombouts, D. Van Neck, K. Peirs, and L. Pollet, *Modern Physics Letters A* 17, 1899 (2002).
- [44] S. Avancini, J. Marinelli, and G. Krein, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 36, 9045 (2003).
- [45] M. Combescot, X. Leyronas, and C. Tanguy, *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems* 31, 17 (2003).
- [46] C. K. Law, *Phys. Rev. A* 71, 034306 (2005), URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.71.034306>.
- [47] A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano, W. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, M. Baring, et al., *Nature* 462, 331 (2009).
- [48] V. Vasileiou, A. Jacholkowska, F. Piron, J. Bolmont, C. Couturier, J. Granot, F. Stecker, J. Cohen-Tanugi, and F. Longo, *Physical Review D* 87, 122001 (2013).
- [49] G. Amelino-Camelia and L. Smolin, *Physical Review D* 80, 084017 (2009).
- [50] M. Dunne, in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim* (Optical Society of America, 2007), pp. 1-2.
- [51] A. Bibeau-Delisle, A. Bisio, G. M. D'Ariano, P. Perinotti, and A. Tosini, *arXiv preprint arXiv:1310.6760* (2013).
- [52] G. Amelino-Camelia, *International Journal of Modern Physics D* 11, 35 (2002).