Понятие квантовой логики: математические и философские аспекты

Антипенко Л.Г., Институт философии РАН
chistrod@yandex.ru

Аннотация: Квантовая логика есть логика квантово-компьютерных вычислений. Её особенность, по сравнению с логикой рекурсивных вычислений, проводимых на классических компьютерах, состоит в том, что она имеет дело с математическим ожиданием. Математическое ожидание представляет собой вероятностное предвидение будущего, будущих событий. Отсюда неотъемлемая связь квантовой логики с временем. Но только это не есть время механически-нивелированное, а, скорее, время экзистенциальное. В области математического творчества специфика экзистенциального времени нашла отражение в дескриптивной теории множеств Н. Н. Лузина.

Ключевые слова: классический компьютер, квантовый компьютер, квантовая логика, экзистенциальное время, математическое творчество

Понятие квантовой логики тождественно понятию логической структуры квантово-компьютерных вычислений. Эта логика представляет собой аналог обычных рекурсивных вычислений, на которых построена вся работа классических компьютеров. Она не имеет ничего общего с теми попытками, которые связаны с методикой коррекции булевой алгебры или с введением каких-то там тривалентно-бивалентных преобразований, как это предлагается, скажем, в статье[1].

Для того чтобы раскрыть содержание данного понятия и показать его философское значение, придётся коснуться вкратце истории формирования идеологии квантово-компьютерных вычислений. В статье «Классическое вычисление, квантовое вычисление и алгоритм факторизации Шора» Ю.И. Манин указывает на источники мотивации по формированию идеологии квантово-компьютерных вычислений. Они, по его мнению, соотносятся с физикой, технологией, гносеологией и математикой. Ситуация выглядит примерно следующим образом.

С точки зрения физики квантовый способ описания действительности более фундаментален, нежели классический. В семидесятых и восьмидесятых годах прошлого столетия было замечено, что из-за принципа суперпозиции моделирование квантовых процессов на классических компьютерах слишком сложно с рекурсивно-вычислительной точки зрения. С другой стороны, хотя переход к квантовому описанию связан с трудностью того рода, что квантовые измерения дают недетерминированные результаты, но эту трудность можно использовать как существенное, в определённом смысле, преимущество квантовой идеологии.

Существуют, указывает Манин, ситуации, когда мы можем отличить квантовую случайность от классической, анализируя вероятностные распределения и используя неравенства типа белловских. «Было бы крайне интересно разработать экспериментальную

---

[1] *Кузнецов Б.Г.* Об основах квантово-релятивистской логики // Логические исследования (Сборник статей). М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. С. 99−113.

установку с целью показать, что некоторые фрагменты центральной нервной системы, отвечающие за обработку информации, могут фактически быть в квантовой суперпозиции классических состояний»[2]. Может быть, наш головной мозг можно отождествить с квантовым компьютером? Этот вопрос, поставленный Маниным, небезоснователен, так как человеческий мозг, способный изобрести квантовый компьютер, не может быть проще (примитивнее) самого компьютера.

С инициативой по разработке квантово-компьютерныъх вычислений, с учётом квантовой логики, выступил в своё время и Р. Фейнман. Его статья «Квантовомеханические компьютеры» была опубликована в издании «International Journal of Theoretical Physics», vol.21, num.6/7, 1982) и перепечатана в переводе на русский язык в сборнике[3]. В статье ставится задача приспособить для квантово-компьютерных вычислений элементарные логические операции, определяемые логическими связками «и», «или», «не», которые в новых условиях получили название *гейтов.* В частности, автор рассматривал такие гейты, как NOT, AND, EXCHANGE. Одна из целей статьи заключается в том, чтобы «предъявить некоторый гамильтониан для системы, которая могла бы служить в качестве компьютера»[4].

Добавим от себя сразу же, что гамильтониан, расчленённый на отдельные гейты, должен был удовлетворять условию унитарности (поддержанию когерентности). Что же касается самой системы, то она представляет собой информационную систему, в которой единицей информации служит не бит, а кубит.

В порядке более подробных разъяснений сошлёмся на статью П. Шора[5]. Основные показатели и требования, предъявляемые к квантовой вычислительной системе, можно свести к следующим пунктам: 1) требование точности; 2) учёт того обстоятельства, что обратимая унитарная эволюция системы в состоянии реализовать, по крайней мере, вычислительный потенциал (идеальной) машины Тьюринга, что и было показано Бенёвым (P. Benioff) в начале 80-х годов прошлого столетия; 3) меры по предотвращению разрушения когерентности квантовой суперпозиции. Следующая цитата из статьи Шора позволит сосредоточить внимание на главном, существенном отличии логики кваантово-компьютерных вычислений от логики рекурсивных вычислений. «Если измерить состояния машины (по отношению к данному (гильбертову. − Л.А.) базису) на любом конкретном шаге вычислений, то вероятность обнаружить систему в базисном состоянии $/S_i>$ будет $/a_i/^2$; однако измерение состояния машины спроектирует её в наблюдаемый базисный вектор $/S_i>$. Поэтому наблюдать состояние машины можно только в конце вычислений»[6]. (В этом высказывании следует устранить одну неточность. В начальной фразе «Если измерить состояния машины…» слово «измерить» следовало бы заменить термином «предвычислить», так как измерение неотъемлемо связано с наблюдением).

Соблюдение унитарности вычислительного процесса конкретно означает сохранение суммы $\sum_i /a_i/^2 = 1$ на каждом шаге вычислительного процесса. А в качестве базисных векторов в квантовом компьютере служат два вектора $/0>$ и $/1>$. Под этой символикой можно подразумевать, скажем, два состояния электрона с двумя противоположными

---

[2] *Манин Ю.А*. Классическое вычисление, квантовое вычисление и алгоритм факторизации Шора // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Том II. Ижевск, 1999. С. 251.

[3] Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Том II. Ижевск, 1999. С. 125−144.

[4] Указ. соч. С. 125.

[5] *Шор П.* Полиномиальные по времени алгоритмы разложения числа на простые сомножители и нахождения дискретного логарифма для квантового компьютера // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Том II Ижевск, 1999. С. 200−247.

[6] Указ. соч. С. 208.

проекциями его спина на заранее выбранное направление. В компьютере с двухкубитовым регистром реализуется, с соответствующими амплитудами вероятности, четыре комбинации: 00, 01, 10, 11. Квантовый компьютер, имеющий мощность, скажем, в одну тысячу кубитов, должен располагать регистром, насчитывающим тысячу находящихся в сцеплении частиц. Так что осуществлять в нём вычисления − значит воздействовать на данный кубитовый ансамбль обратимыми операторами (т.е. операторами с наличием обратимых операций). При использовании, например, логического оператора NOT обращение достигается его повторным действием.

Наша философская оценка логической специфики работы квантового компьютера связана с расшифровкой парадоксального понятия «недетерминированный результат» (Ю.И. Манин). *Недетерминированность* в данном случае следует понимать как отсутствие обусловленности результата *причинно-следственной связью.* Здесь, однако, вскрывается предопределённость другого рода − *предопределённость со стороны цели*, располагаемой в будущем. Напоминаем, что непосредственный результат вычисления квантового компьютера всегда выражается в числовой форме (в виде числа). Но это число даётся вместе *с математическим ожиданием*, с определённой степенью вероятности. Поэтому вполне можно присоединиться к утверждению К.Ф. фон Вайцзеккера о том, что прошедшее интерпретируется в категориях действительно-фактического, а будущее — в категориях возможности. Высказывания о будущих событиях могут быть сделаны только в форме вероятностных суждений[7]. Именно об этом свидетельствует как весь опыт квантовой физики, так и содержание понятия квантовой логики.

Теперь уточним некоторые важные, для общего понимания, детали. Проще всего объяснить работу квантового компьютера, отправляясь от понятия квантового регистра, заполняемого сцепленными электронами. Если квантовая система состоит всего лишь из одного электрона, то она будет представляться в виде суперпозиции из двух базовых векторов $/o>$ и $/1>$ с амплитудами вероятности, скажем, a и b:

$$a/o>+b/1> \qquad (1).$$

Для двух электронов базовыми векторами будут выражения, включающие в себя комбинации 00, 11, 10, 01. В общем, волновое состояние квантового компьютера $/\psi>$ можно представить в виде следующей суммы

$$/\psi>=\sum_{n=0}^{2^l-1} c_n/n>, \qquad (2)$$

где l − число кубитов, с которым работает компьютер, $/n>$ – базисные вектора, по которым раскладывается состояние данного волнового состояния, $/c_n/^2$ − вероятность нахождения системы в базисном состоянии $/n>$. Число кубитов, согласно выше указанным условиям, равно числу электронов в регистре компьютера. Это равенство обусловлено как раз тем, что каждый электрон может находиться в двух состояниях «0» и «1», или $/0>$ и $/1>$. В теории информации альтернатива двух состояний − «0» и «1» приспособлена для подсчёта информации при работе с классическими компьютерами и служит в качестве единицы,

[7] *фон Вайцзеккер К. Ф.*. Физика и философия // Вопросы философии. 1993. №1. С.125.

называемой *битом*. *Кубит* − это тот же бит, но только функционирующий с учётом вероятностей для его альтернатив.

Рассматривая выражение (2), нетрудно понять, что базовый вектор $/n>$ можно использовать для бинарного (двоичного) представления числа с номером *n*. Вычисление на квантовом компьютере и сводится к обработке (преобразованию) таких чисел. Процесс вычисления начинается с того, что все кубиты квантового регистра приводятся в базисные состояния $/0>$. Затем некоторые кубиты, под воздействием определённого физического агента, переводятся из состояния $/0>$ в состояние $/1>$. Так получается начальное, согласно заданной задаче, состояние, которое переводится в конечное состояние посредством применения логических операций, именуемых гейтами. Результат измерения того, что получилось, есть результат процесса, аналогичного процессу редукции волновой функции при решении уравнения Шредингера (с последующим измерением).

Но вот какая тут имеется особенность. Квантовый компьютер может дать с той или иной вероятностью любой ответ, т.е. любое число *n*. Схема вычислений при этом считается правильной, если правильный ответ получается с вероятностью, близкой к единице. Поэтому требуется статистическая поверка. Требуется повторно проделать вычисления несколько раз, чтобы выбрать ответ, который встречается наиболее часто, что позволяет снизить вероятность ошибки до сколь угодно малой величины.

Логика квантово-компьютерных вычислений даёт возможность сделать выводы, приобретающие фундаментальную значимость в области математических и философских исследований. Первые шаги в этом отношении сделаны авторами книги «Физика квантовой информации»[8]. В помещённой в ней статье «Концепция квантовых вычислений» Д. Дойч и А Экерт указывают, что к числу многих ответвлений квантовых вычислений в очевидно далёких областях относится их связь с философией и практикой математических доказательств. Исполнение вычисления, которое приводит к определённому результату, эквивалентно *доказательству* того, что наблюдаемый результат является одним из возможных результатов вычисления. Поскольку мы можем описывать операции квантового компьютера математически, то такое доказательство всегда может быть переведено в доказательство некоторой математической теоремы. Это было, пишут они, и в классическом случае, но в отсутствие интерференционных эффектов всегда можно проследить шаги вычисления, и, таким образом, произвести доказательство, которое удовлетворяет классическому определению: последовательность предложений, каждое из которых есть либо аксиома, либо следует из предыдущих предложений в последовательности в соответствии со стандартными правилами логических умозаключений. «Теперь мы можем оставить это определение. В дальнейшем доказательство должно рассматриваться как процесс − само вычисление, а не его запись − поскольку мы должны понять, что в будущем квантовые компьютеры будут доказывать теоремы методами, которые ни человеческий мозг, ни какой-либо другой арбитр не будет в состоянии проверить шаг за шагом, поскольку если бы «последовательность предложений», соответствующая такому доказательству была бы распечатана, то бумага много раз заполнила бы наблюдаемую вселенную»[9].

В той же статье Р. Джозса делает разъяснения относительно специфики квантовых алгоритмов. Удобно формализовать, отмечает он, описание этих квантовых вычислительных процессов в терминах модели, выстраивающей параллель с формализмом классических вычислений. По сути, в квантовом случае элементы памяти в компьютере − это кубиты, а не биты, а логические операции − это унитарные преобразования, а не булевы операции

[8] Физика квантовой информации. Квантовая криптография, квантовая телепортация, квантовые вычисления. М.: Постмаркет, 2002.

[9] Указ. соч. С. 138.

классического вычисления. Можно утверждать, отмечает Джозса, что модели такого рода достаточно, чтобы описать любой квантовый процесс. Понятно, что от любого компьютера требуется, чтобы он оперировал «конечными средствами», то есть, чтобы он имел возможность использовать некоторый конечный набор базовых унитарных операций. Любая другая операция, которая может понадобиться в алгоритме, должна быть построена (или аппроксимирована с достаточной точностью) из этих базовых строительных блоков соединением их действия на выбранные кубиты. «Можно показать, − заключает это суждение автор, − что достаточно использовать различные маленькие наборы унитарных операций (так называемы «универсальные наборы»), чтобы аппроксимировать любую унитарную операцию над любым числом кубитов с произвольной точностью»[10].

Эту обширную цитату я привёл для того, чтобы показать, что, помимо конкретно представленного алгоритма Шора для разложения числа с номером *n* на простые сомножители, теория квантовых вычислений потенциально располагает большим количеством других квантовых алгоритмов для решения требуемых задач. Но главное в математическом плане впереди.

Рассматривая множество чисел 2^{l-1} в выражении (2), нетрудно понять, что данное множество, функционирующее в квантовом процессе вычисления, принципиально не поддаётся упорядочению, т.е. между его элементами нельзя установить порядок, определить упорядочивающее их соотношение ввиду вероятностного характера этих событий. А это значит, что мы здесь имеем дело с математическим объектом, который подобен континууму, именуемому арифметическим или теоретико-множественным в зависимости от языка, на котором он выражается. Следующая цепь рассуждений должна будет показать, что вывод этот верен. Но сначала напомним о том, что называется континуумом. Континуум в арифметическом смысле представляет собой множество чисел рациональных и иррациональных, которые, в свою очередь подразделяются на числа алгебраические (счётное множество) и трансцендентные (несчётное множество). Счётным множеством называется множество, равномощное множеству чисел натурального ряда, характеризуемого кардинальным числом алеф-ноль. Когда мы покидаем область конечных целых (положительных) чисел и переходим в область чисел трансфинитных, там, согласно учению Г. Кантора о множествах, числа кардинальные и ординальные не совпадают между собой. Так, скажем, числовой порядок натурального ряда чисел характеризуется трансфинитным порядковым числом ω. Все числа, входящие в ряд 1, 2, …, *n*,… образуют то, что называется первым классом чисел. Ко второму классу относятся числа, располагаемые в ряд $\omega+1$, $\omega+2$, $\omega+3$, … Его порядковый тип обозначается трансфинитным ординальным числом Ω.

Кантор показал (доказать это нетрудно), что множество элементов второго числового класса несчётно Его кардинальное число алеф-один больше числа алеф-ноль. Затем он сформулировал гипотезу, согласно которой мощность множества всех подмножеств натурального ряда чисел совпадает с мощностью множества чисел второго класса, символизируемой числом алеф один, т.е. имеет место равенство чисел со знаками *два в степени алеф-ноль* и *алеф–один*. Таким образом, как полагал Кантор, можно было бы упорядочить всё несчётное множество всевозможных чисел (рациональных и иррациональных), составляющих арифметический континуум. Гипотеза эта, однако, себя не оправдала, и после того, как математики доказали, с одной стороны, невозможность её вывода из аксиом теории множеств, а, с другой стороны, её совместимость с теоретико-множественной аксиоматикой, остался без ответа вопрос: чем можно объяснить данную неувязку, какая реальность кроется за ней?

На этот вопрос, как нам представляется, и даёт ответ идеология квантово-компьютерных вычислений. Действительно, когда требуется представить каузально-детерминированную связь между объектами или событиями на математическом языке в наиболее общей форме,

[10] Указ. соч. С. 139.

используют индуктивный способ порождения целых положительных чисел, а установленное в таком порядке множество совпадает с натуральным рядом чисел. Согласно канторовскому учению о множествах, натуральный ряд как целое, напоминаем, характеризуется двумя трансфинитными числами: кардинальным числом (мощностью), обозначаемым знаком алеф-ноль и ординальным числом ω − первым трансфинитным числом второго класса чисел, мощность которого оценивается, как уже было сказано выше, числом алеф-один. Но одно дело − упорядочить все трансфинитные числа второго числового класса, руководствуясь заранее известным способом их порождения (в данном случае речь идёт о трансфинитной индукции), другое дело − навести порядок на множестве всех рациональных и иррациональных чисел, т.е. упорядочить арифметический континуум.

Принципиальный путь к решению данной проблемы наметил в своей дескриптивной теории множеств Н. Н. Лузин[11]. В одной из статей, опубликованной в 1930 году, Лузин, анализируя проблему континуума, вынужден был сделать необычное допущение о существовании в континууме «неприкаянных», «паразитических точек», которые и не позволяют навести в нём порядок. «Вполне определимых иррациональных чисел, − писал он, − имеется лишь счётное множество. Арифметический континуум заведомо содержит неопределимые точки …. Эти точки … являются *паразитическими*…. В этом и заключается единственное естественное объяснение трудностей теории…»[12]. Затем к нему пришло понимание, что паразитические точки, в общем, служат показателем отсутствия пространственно актуализированного, априорного порядка элементов континуума, как бы «застывших» на своих местах. Он понял, что в деле исследования континуума на службу надо поставить *возможность* − возможность выбора того, что мы можем создать и *именовать*. И Лузин принялся развивать установку французского математика Анри Лебега, которая была подана Лебегом в форме следующего вопроса: «Можно ли быть убеждённым в существовании объекта (*ensemble nommés*), не определив его? Определение всегда означает *именование* характерной особенности того, что определяется» (цит. по работе [13]).

Придание имени искомому математическому объекту не означает название его каким-нибудь одним словом, а означает развёрнутое наименование − *дескрипцию*. Поэтому и теория, созданная французскими математиками Эмилем Борелем, Анри Лебегом и некоторыми другими и достигшая своих вершин в исследованиях Лузина, получила название *дескриптивной теории*. Хотя в работах Лузина, кажется, нигде не встречается термины *экзистенциализм*, *экзистенциальный*, но с философской точки зрения эти термины наилучшим образом выражают сущность его математического творчества. В этом можно убедиться хотя бы исходя из тех высказываний, в которых он даёт оценку известной программы обоснования математики, выдвинутой Давидом Гильбертом. (Программу Гильберта обычно характеризуют словами *формализм*, *финитизм*). Относительно самого существа теории Гилберта, писал Лузин в 1933 году, какие-либо суждения ещё затруднительны, ввиду отсутствия полных о ней сведений. Но наиболее деликатным моментом является, без сомнения, вопрос о *petitio pricipii*: избегнуто ли это? «Без сомнения некоторые движения нашей мысли могут быть «формализованы», т.е. отмечены символами. Гильберт говорит о превращении в символы всякой математической мысли. Без сомнения, мы имеем возможность оперировать живой мыслью, непосредственным (не символизированным) рассуждением над этими символами, как бы над некоторыми окаменевшими остатками некогда живой мысли. Нет сомнения, далее, что мы, как это делается в теории инвариантов, можем приходить, принимая во внимание форму и вид этих символов, к определённым заключениям о возможности или невозможности иметь «правильное» сочетание этих символов, оканчивающееся фигурой 1=0. Нет сомнения, что всё это можно проделать без petitio principii. Но когда мы хотим вывести отсюда определённые *заключения об отсутствии противоречия в живой мысли внутри её самой, мы должны*

[11] *Лузин Н. Н.* Собр. соч. Т. 2. Дескриптивная теория множеств. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
[12] Указ. соч. С. 269.
[13] *Грэхэм Л., Кантор Ж..-М.* Имена бесконечности: правдивая история о религиозном мистицизме и математическом творчестве. СПб.: Изд-во Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2011. С. 61.

оживить эти окаменелости, превратить их в процессы живой мысли. Имеется ли гарантия, что на некотором месте ожившего узора мы не встретим конфликта живой мысли с самою собой?»[14].

Вот эта живая мысль, о которой говорит здесь Лузин, в континууме имеет дело с ансамблем возможностей, которые по выбору реализуются в конкретные математические объекты. В ретроспективе мы можем упорядочить посредством каузальных связей отошедшие в прошлое события, но существует грань между прошлым и будущим, за которой стоит возможность и вероятность. Данная грань чётко проступает, когда мы рассматриваем функционирование квантового компьютера. Конечно, на мелкомасштабной временной шкале всегда можно отметить процессы, которые мало меняются с переходом от прошлого к будущему. Но это обстоятельство не отменяет наличие грани между прошлым и будущим, которая на математическом языке описывается как грань между счётным множеством математических объектов и несчётным континуумом. В физическом плане математический континуум можно уподобить физическому вакууму. Если верна космологическая гипотеза, согласно которой наша Вселенная порождена физическим вакуумом, то за её рождением следует видеть ансамбль возможностей, одна из которых воплотилась в образец наблюдаемой нами вселенной.

Литература

Вайцзеккер К. Ф. Физика и философия // Вопросы философии. 1993. №1. С. 115-125.

Грэхэм Л., Кантор Ж.-М. Имена бесконечности: правдивая история о религиозном мистицизме и математическом творчестве. СПб.: Изд-во Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2011. 230 с.

Квантовый компьютер и квантовые вычисления / Под. ред. В.А. Садовничего. Том 2. Ижевск: Ижевская республиканская типография, 1999. 288 с.

Кузнецов Б.Г. Об основах квантово-релятивистской логики // Логические исследования. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. С. 99−113.

Лузин Н. Н. Дескриптивная теория множеств // *Лузин Н. Н.* Собр. сочинений: в 3 т. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 744 с.

Физика квантовой информации. Квантовая криптография, квантовая телепортация, квантовые вычисления / Под ред. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. М.: Постмаркет, 2002. 376 с.

References

Bouwmeester, D., Ekert, A. K., Zeilinger, A. (eds.) *Fizika kvantovoi informatsii. Kvantovaya kriptografiya, kvantovaya teleportatsiya, kvantovye vychisleniya* [Physics of Quantum Information. Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computing]. Moscow: Postmarket Publ., 2002. 376 pp. (In Russian)

Graham, L., Kantor, J.-M. *Imena beskonechnosti: pravdivaya istoriya o religioznom mistitsizme i matematicheskom tvorchestve* [Naming infinity. A True Story of Religious Mysticism and Mathematical Creativity]. Saint-Petersburg: Izd-vo Evropeiskogo universiteta v Sankt-Peterburge Publ., 2011. 230 pp. (In Russian)

[14] *Лузин Н. Н.* Собр. соч. Т. 2. Дескриптивная теория множеств. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 516.

Kuznetsov, B.G. “Ob osnovakh kvantovo-relyativistskoi logiki” [On the Foundations of Quantum-Relativity Logics] // *Logicheskie issledovaniya* [Logical Studies]. Moscow: Izd-vo Akademii nauk SSSR Publ., 1959. P. 99−113. (In Russian)

Luzin, N. N. “Deskriptivnaya teoriya mnozhestv” [Descriptive Set Theory], in N.N. Luzin, *Sobr. sochinenii: v 3 t.* [Complete Works: in 3 Vol.] Vol. 2. Moscow: Izd-vo AN SSSR Publ., 1958. 744 pp. (In Russian)

Sadovnichii, V.A. (ed.) *Kvantovyi komp'yuter i kvantovye vychisleniya* [The Quantum Computer and Quantum Computing], Vol. 2. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya Publ., 1999. 288 pp. (In Russian)

Weizsäcker, C. F. “Fizika i filosofiya” [The Physics and Philosophy], *Voprosy filosofii*, 1993, No. 1. P. 115-125. (In Russian)

The Concept of Quantum Logic: mathematical and philosophical aspects

Antipenko L.G.

Abstract: Quantum logic is the logic of quantum computing. Its feature, as compared with the logic of the recursive computation carried out by classical computers, consists in the fact that it has to do with expected value. The expected value is a probabilistic prediction of the future, of future events. Hence the integral connection of quantum logic with time. But this time is not the mechanically-levelled time, but, rather, existential time. In the field of mathematical creativity specifics of existential time reflected in a descriptive set theory of N. N. Luzin.

Keywords: classical computer, quantum computer, quantum logic, existential time, mathematical creativity