

# Цифровая физика

Е. Б. Рудный, ©, 2023, [blog.rudnyi.ru/ru](http://blog.rudnyi.ru/ru)

Читать онлайн: <http://blog.rudnyi.ru/ru/2023/10/digital-physics.html>

Начало: [Неумолимые законы физики](#)

Рассмотрим утверждение, лежащее в основе современной физики:

(1) Мир подчиняется законам физики, выраженным в виде математических уравнений.

Стремление узнать все до последних деталей приводит к следующему вопросу, возникающему при буквальном прочтении этого предложения. Остается непонятно, каким образом решаются математические уравнения, когда мир переходит из предыдущего состояния в последующее.

Понятно, как физики проводят вычисления для предсказания результатов экспериментов или для описания астрономических наблюдений. Тем не менее, рассмотрение утверждения (1) как свойство мира самого по себе, который существовал до появления людей и физиков, вызывает когнитивный диссонанс.

В этой заметке будут рассмотрены взгляды физиков, который задумались над этим вопросом. Первопроходцем в данном случае можно считать Готфрида Лейбница, который написал на полях в Диалогах:

‘Мир получается, когда Бог вычисляет и размышляет.’

В теологии есть много способов ограничить размышления о вечном, поэтому дальнейшее рассмотрение вопроса получило продолжение лишь во второй половине 20-ого века; в особенности на это повлияло осознание ограниченности возможности вычислений в рамках машины Тьюринга.

С практической точки зрения проблем, конечно, нет, поскольку существующие уравнения физики можно решить с достаточным уровнем точности. Вопрос возникает при рассмотрении картины мира, который должен существовать сам по себе независимо от присутствия человека. На языке теологии метафора ‘Бог-математик’ заменяется на ‘Бог-программист’, а вопрос, играет ли Бог в кости, превращается в следующий:

Решает ли Бог созданные им уравнения физики точно, или же Он ограничивается заданным уровнем точности?

Начну с размышлений Рольфа Ландауэра, автора принципа, что во время протекания вычислений потеря 1 бита информации должна приводить к выделению теплоты. Ландауэр ввел этот принцип для исключения идеализма и платонизма при рассмотрении информации:

‘Информация не является абстрактным объектом, она существует только посредством физической репрезентации.’

‘Информация с необходимостью вписана в физическую среду. Она не является абстрактным объектом.’

Дальнейшие размышления Ландауэра о вопросе, связанном с этой заметкой, крайне показательны, поэтому рассмотрим их подробнее. Вначале Ландауэр связывает математику с физикой:

‘Наша точка зрения о том, что математика является частью физического мира может разрешить многолетнюю загадку. Существует много ссылок к замечанию Вигнера о «непостижимой эффективности математики.» Этот успех при характеристике физического мира действительно является загадкой, если исходить из того, что математика существовала до и существует вне физической вселенной. Вместо этого математика использует физическую вселенную и является частью физики.’

Логика, насколько я понял такая. Можно сказать, что математика связана с информацией, информация связана с физической средой, поэтому математика также должна быть где-то там среди вселенной. В результате физическое фундаментально, а идеализм и платонизм побеждены. Теперь возникает проблема с точностью, поскольку размер вселенной ограничен:

‘Наши общепринятые законы физики связаны с континуальной математикой, которая в свою очередь основана на представлении, что можно достичь любой заданной степени точности при использовании последовательных операций. Однако вряд ли наша реальная вселенная может позволить неограниченную последовательность абсолютно достоверных операций. Размер памяти по всей видимости является ограниченным, поскольку вселенная является ограниченной.’

Обратите внимание, что при разговоре о решении уравнений неявно появились вычисления и метафора компьютера; память явно возникла именно в этом контексте. Следующая цитата конкретизирует метафору компьютера и вселенная как компьютер становится видна более отчетливо:

‘Есть тенденция размышлений о математике как о средстве, которое каким-то образом существовало до и вне физического мира. Математика в свою очередь позволяет выразить законы физики ... В настоящей статье мы подчеркиваем, что обработка информации должна проводиться в реальном физическом мире и что законы физики существуют как инструкции по обработке информации в этом реальном мире. Следовательно, не имеет смысла использовать операции в законах физики, которые невозможно исполнить, по крайней мере в принципе, в нашем реальном физическом мире.’

В этот момент Ландауэр останавливается, он переводит разговор на другое

обстоятельство. Законы физики обратимы по времени и возможно округления при вычислениях помогут с этим справиться:

‘Одна возможность связана с фундаментальным источником необратимости и флуктуаций в реальном мире, мире в котором мы наблюдаем отклонение от поведения в соответствие динамикой Гамильтона. Округления в законах физики являются по существу источником шума. ... Ограниченная точность может быть кроме того, быть источником наблюдаемого классического поведения, которое так заметно окружает нас.’

Без труда можно увидеть в этих размышлениях много подводных камней. Получается, что вселенная каким-то образом решает математические уравнения сама по себе; другими словами, вселенная есть компьютер, который вычисляет заданную программу. Невольно у Ландауэра просматривается метафора Бога-программиста. С другой стороны, вопрос проведения вычислений остается открытым — остается непонятно, каким образом движение физического приводит к решению математических уравнений, задающих это движение. Более того, остается открытым вопрос ограниченной точности. Каким образом осуществляется это ограничение? По логике оно должно быть частью законов физики; в противном случае мы приходим к тому, что Бог играет в кости при проведении вычислений.

Теперь рассмотрим высказывание Ричарда Фейнмана:

‘Меня всегда беспокоило, что, согласно физическим законам, как мы понимаем их сегодня, требуется бесконечное число логических операций в вычислительной машине, чтобы определить, какие процессы происходят в сколь угодно малой области пространства за сколь угодно малый промежуток времени. Как может все это уложиться в крохотном пространстве? Почему необходима бесконечная работа логики для понимания того, что произойдет на крохотном участке пространства-времени? Поэтому я часто высказывал предположение, что в конце концов физика не будет требовать математической формулировки. Ее механизм раскроется перед нами, и законы станут простыми, как шахматная доска, при всей ее видимой сложности.’

Фейнман останавливается на этой мысли и сразу же возвращается к теологической модели законов физики:

‘Подводя итоги, я хочу воспользоваться словами Джинса, который сказал, что «Великий Архитектор, по-видимому, был математиком». ... Физика нельзя перевести ни на какой другой язык. И если вы хотите узнать Природу, оценить ее красоту, то нужно понимать язык, на котором она разговаривает.’

Это не означает, что Фейнман воспринимает сказанное всерьез; по всей

видимости он просто осознает, что исходное утверждение (1) лежит в основе исследовательской программы современной физики. Можно сформулировать эту точку зрения словами Робина Коллингвуда — утверждение (1) является абсолютной предпосылкой современной физики. Поэтому не следует пытаться искать ему обоснование и задумываться над тем, как происходит решение системы математических уравнений в мире самом по себе.

Однако мысль остановить нельзя и существует направление исследований, где вычисления, связанные со вселенной, ограничиваются таковыми в рамках машины Тьюринга. Мы приходим к понятию о мире, напоминающему клеточный автомат. Мир состоит из дискретных состояний, причем каждое состояние принадлежит как минимум к счетному множеству (физики склоняются к конечному множеству). Несчетным множествам в такой физической вселенной места нет. Без всякого сомнения в основе идей цифровой физики лежит теория вычислений и практическая работа физиков с реальными компьютерами.

Пионером цифровой физики является Конрад Цузе (Konrad Zuse, 1910 — 1995). Он был разработчиком серии вычислительных машин, причем модель Z3 (1941 год) относят к первому реально действовавшему программируемому компьютеру. В 1969 году Цузе выпустил книгу *‘Вычислительное пространство’* (Rechnender Raum, Calculating Space) и именно это событие считается рождением цифровой физики.

Другим пионером цифровой физики считается Эдвард Фредкин (Edward Fredkin, 1934 — 2023). Интересно отметить, что Фредкин смог стать профессором Массачусетского технологического института без университетского диплома. Это пример, когда одержимость идеей привела к успеху в академическом мире. Фредкин распространил идею вселенной как своеобразного клеточного автомата на все уровни организации в виде цифровой философии. Ниже цитата из статьи Савушкиной:

‘Изначально термин «цифровая философия» был концептуализирован Э. Фредкиным для обозначения нового философского направления, переосмысливающего метафизическое учение Лейбница в контексте информационной теории, квантовой физики и цифровой физики. Основой цифровой философии как направления западноевропейской мысли стало представление о мышлении как об акте вычисления, а мыслительных действий как процессов обработки и преобразования информации. Цифровая философия изначально была максимально связана с квантовой теорией и кибернетикой, а также с теорией вычислимости А. Тьюринга.’

В настоящее время, пожалуй, наиболее известным представителем цифровой физики является Стивен Вольфрам. Важно отметить, что его работы в области клеточных автоматов доказали возможность возникновения сложных структур

из простых правил клеточных автоматов. Это в свою очередь привело к появлению мысли об отождествлении сложности в природе с возникаемостью (emergence) в ходе вычислений.

В последнее время Вольфрам перешел к рассмотрению возникновения сложных структур в гиперграфах при последовательном применении простого правила преобразования гиперграфа. Эта идея прекрасно изложена в статье молодого дарования *‘«Теория всего» глазами десятиклассника’*:

‘В своей работе я объясняю основу теории всего, поясняя понятия и термины так, чтобы текст был доступен ученику 10 класса.’

Отмечу, что это утверждение соответствует действительности — из этой статьи я смог понять идею Вольфрама о гиперграфах.

Стивен Вольфрам также задумался о вопросе соотношения между вычислением и устройством для вычисления. Этот вопрос хорошо подходит к теме заметки и я изложу основную мысль своими словами. Все начинается с буквального прочтения утверждения (1). Если оно верно, то изменение состояния мира должно сопровождаться решением математических уравнений, то есть, вычислением. Приведенные рассуждения Ландауэра и Фейнмана были связаны именно с таким ходом мысли.

В цифровой физике снимается вопрос с несчетной бесконечностью. Вычисления, связанные с изменением состояния мира, становятся конечными. Тем самым мир не нарушает тезис Чёрча-Тьюринга и вписывается в теорию вычислений. Однако остается вопрос о связи клеточного автомата (или гиперграфа) с физическим миром. Это тот же самый исходный вопрос о связи математики с физикой, но в другой форме. Введение в рассмотрение вычисления вводит динамику, то есть, мы переходим к рассмотрению процесса изменения мира. Одно состояние мира заменяется другим в рамках определенного вычисления.

Ландауэр хотел связать этот процесс с физическим, но в данном случае возникает вопрос о самой возможности обсуждения природы физического в рамках утверждения (1). Представим себе механическую систему в духе мысли Фейнмана, которая соответствует вычислению шага клеточного автомата. Что такая механическая система добавляет к представлению о мире в виде определенного алгоритма? Поведение мира полностью определяется алгоритмом и в конечном итоге для наблюдателю фундаментальной реальностью будет именно вычисляемое состояние мира.

Важно помнить, что мы перешли на обсуждение убеждений о мире самом по себе. В этом воображаемом мире согласно принятым убеждениям все происходит независимо от наблюдателя. Мир просто переходит из одного состояния в другое и все. Этот переход полностью представляется вычислением в рамках определенного алгоритма. Это означает, что в рамках такой системы

убеждений нет возможности выйти за рамки алгоритма и посмотреть, что же служит устройством для исполнения алгоритма. Вольфрам останавливается на таком выходе из этой дилеммы — фундаментальная реальность состоит из алгоритма, который просто исполняется сам по себе, шаг за шагом.

Мир цифровой физики должен включать в себя наблюдателя и Вольфрам также размышляет, каким образом такой мир должен был бы выглядеть глазами наблюдателя. Можно только приветствовать появление таких размышлений, поскольку в конечном итоге следует отличать мир сам по себе от мира наблюдателя. Я, правда, скептически отношусь к таким попыткам, поскольку они не сильно отличаются от желания физикалистов найти человека в мире, функционирующем согласно утверждению (1). С другой стороны, безумству храбрых поем мы песню.

Современный статус исследовательской программы цифровой физики неплохо передает сборник статей с чудным названием '*Вычисляемая вселенная: Понимание и исследование природы как вычисление*', выпущенный в 2013 году. Он разбит на четыре раздела. В первом разбираются теоретические вопросы, связанные с теорией вычислений. Второй раздел посвящен естественным вычислениям в природе. Правда, в нем не было практических работ, только проекты информатиков для осуществления вычислений с использованием нетрадиционных средств. Я скептик по натуре и меня проекты нетрадиционных вычислений информатиков-теоретиков не впечатлили. Интересно отметить, что в нем в том числе предлагался очередной вариант компьютера для гипервычислений (про идею гипервычислений см. [Гипервычисления](#)).

Третий раздел был напрямую связан с названием книги. Однако в нем было только два представителя, которое имели хоть какое-то отношение к физике — Фредкин и Вольфрам. Остальные статьи были написаны информатиками и их отношение к физике неплохо передает заметка про видение теории всего глазами информатика: [Число Пи как теория всего](#). Последний раздел связан с квантовыми вычислениями, но также чисто на теоретическом уровне. Среди известных авторов — Дэвид Дойч и Сет Ллойд; последний видит вселенную в виде квантового компьютера.

Мое впечатление от книги — идея цифровой физики по всей видимости себя исчерпала. Теоретики-информатики продолжают обсуждение этой идеи, но вряд ли это пробудит интерес со стороны физиков.

См. также:

[Бруно Маршаль: Метафизика вычислений](#)

[Законы физики и биология](#)

## Информация

Landauer R. Information is a physical entity. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*. 1999, 263(1-4):63-7.

### [Рольф Ландауэр: Физическая природа информации](#)

Ричард Фейнман, *Характер физических законов*, Лекция 2, *Связь математики с физикой*, 1987.

Richard Feynman, *The character of physical law*, 1965.

М. А. Савушкина, «Цифровая философия»: проблема использования термина в социально-философских исследованиях, *Вестник Челябинского государственного университета*. 2023. № 4(474). С. 59-63.

А. Д. Баролин, «Теория всего» глазами десятиклассника. *Юный ученый*, 2021, (6), 74-79.

Пересказ последних идей Стивена Вольфрама на habr:

### [Вселенная Стивена Вольфрама](#), 6 фев 2022.

*A Computable Universe: Understanding And Exploring Nature As Computation*, 2013.

Самохвалов, Климентий Федорович, *Физический тезис Чёрча*, *Философия науки* 2 (2010): 34-61.

### [Гипервычисления](#)

Hutter, M. *A Complete Theory of Everything (Will Be Subjective)*. *Algorithms* 2010, 3, 329-350.

### [Число Пи как теория всего](#)

## Дополнительная информация

[Физические процессы как вычисления](#): Как найти вычисления среди физических процессов? Ответ понятен, когда человек проводит вычисления, но без человека вопрос остается открытым.

[Алан Тьюринг: Автоматическая вычислительная машина](#): Информация о проекте по разработке компьютера в конце сороковых годов, в котором участвовал Тьюринг. Цитаты из статьи Тьюринга. Память, дискретность, ошибки округления, автоматизация.

[Ершов и Целищев: Алгоритмы и вычислимость в человеческом познании](#): Центральная тема книги — можно ли на основании теоремы Гёделя о неполноте сделать заключение о принципиальной разнице между человеком и роботом. На одной стороне выступают менталисты (да), на другой механицисты

(нет).

А. С. Потапов: Искусственный интеллект и универсальное мышление: Обзор и обсуждение книги. Алгоритм и биология, Алгоритм и физика, Алгоритм и сознание. Связь алгоритма с тем или иным уровнем приводит к противоречиям при рассмотрении других уровней.

Что такое жизнь и что такое мысль с точки зрения математика: О книге Громова *‘Кольцо тайн: вселенная, математика, мысль’*. Название заметки взято из предисловия книги. Обсуждаются цитаты из книги, которые показывают ход мышления автора.

## **Обсуждение**

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/336426.html>