

Пифагорейский аргумент разумного замысла Вселенной и его критика

Статья 2: Пифагорейская стратегия физики

Буров Алексей Владимирович,

*кандидат физико-математических наук,
почетный член Американского физического общества,
лауреат философской премии Института основополагающих исследований, FQXi,
старший научный сотрудник Национальной лаборатории им. Ферми,
Кирк Роуд и Пайн Стрит, Батавия, Иллинойс, 60510, США
observer@pythagoreanuniverse.com*

Цвелик Алексей Михайлович,

*кандидат физико-математических наук,
почетный член Американского физического общества,
лауреат премии Александра фон Гумбольдта,
старший научный сотрудник Брукгейвенской национальной лаборатории,
Аптон, 11973-5000, Нью-Йорк, США
tsvelik@gmail.com*

Аннотация

Со времен Галилея и Ньютона физика строилась как математическая дисциплина, ищущая свои аксиомы, законы природы посредством специально организованных экспериментов. Мотивация именно такого модуса познания природы была рассмотрена в первой статье этого цикла, в которой говорилось о христианском платонизме, *пифагорейской вере* отцов-основателей новоевропейской физики. Предлагаемая статья ставит цель выявить познавательную стратегию физики. Один из центральных вопросов в отношении физики состоит именно в том, каким образом она добывала свои аксиомы. Указания на эксперимент тут недостаточно; из экспериментальных фактов всегда можно сделать бесконечное число выводов. Гипотеза закона не выводится из экспериментов; напротив, она мотивирует и определяет их как наилучшие из возможных проверок именно этой гипотезы. Цель настоящей статьи – продемонстрировать на фактах, что стратегия поиска гипотез физических законов неизменно проистекала из того же источника, что и исходное *credo* матфизики. Эта стратегия основана на вере в математическую элегантность, высокую точность, универсальность

и познаваемость искомым аксиом материи. Поиск гипотез неизменно велся на путях универсальных математических симметрий, эквивалентностей, инвариантностей, соответствий и аналогий, достаточно сложных для обеспечения разнообразия рассматриваемых явлений и одновременно достаточно простых для открытия.

Мы не являемся первыми, кто выставил это пифагорейское понимание физики. Эта идея, как и термин *пифагорейская стратегия*, была четверть века назад предложена и развита американско-израильским философом Марком Штайнером в монографии *The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem*. Предлагаемая статья является свободным размышлением вослед этой блистательной и до сих пор во многом уникальной книге.

Ключевые слова: антропоцентризм, пифагорейская стратегия, пифагорейская вселенная, разумный замысел, физико-теологический аргумент, эффективность математики.

The Pythagorean Argument of the Intelligent Design of the Universe and Its Critique

Part II: Pythagorean Strategy of Physics

Alexey Burov,

PhD, (Physical and Mathematical Sciences)

Fellow of American Physical Society,

Senior scientist of Fermi National Accelerator Laboratory,

Kirk Road and Pine Street, Batavia, IL 60510-5011, USA,

FQXi prize laureate

observer@pythagoreanuniverse.com

Alexey Tsvelik,

PhD, (Physical and Mathematical Sciences)

Senior scientist of Brookhaven National Laboratory,

Upton, 11973-5000, NY, USA,

Fellow of American Physical Society,

Alexander von Humboldt prize laureate

tsvelik@gmail.com

Abstract

Since the time of Galileo and Newton, physics has been engineered as a mathematical discipline, seeking its axioms, laws of nature, by means of specially organized experiments. The motivation of specifically this mode of cognizing nature was explored in the first paper of this series, in which Christian

Platonism and the Pythagorean crede of the founding fathers of modernity's physics were discussed. The present article aims to lay out the cognitive strategy of physics as revealed by reflecting upon its seminal discoveries. One central inquiry concerning physics is how exactly it has mined its axioms. Merely pointing to experimentation is insufficient. Experiments are conceived and executed as verification of an already-formulated hypothesis, without which it would be indeterminate what should be observed and what there is to do with those observations. A hypothesis for a law is not derived from an experiment; on the contrary, it defines the experiment in order to be rigorously scrutinized by it.

The objective of this article is to demonstrate on facts that the strategy for hypothesizing physical laws has invariably emanated from the same wellspring as the originating metaphysical credo. This Pythagorean strategy is founded on the belief in mathematical elegance, high precision, and the universality of the sought-after axioms of matter. The quest for hypotheses went along the pathways of universal mathematical symmetries, equivalencies, invariances, correspondences, and analogies—complex enough to account for a plethora of relevant phenomena, yet simple enough to facilitate scientific discovery.

We are not the first to propound this Pythagorean understanding of physics. This concept, as well as the term 'Pythagorean strategy,' was a quarter-century ago formulated and developed by the American-Israeli philosopher Mark Steiner (1942–2020) in his monograph, "The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem." The present article serves as a free contemplation in the footsteps of that brilliant and still largely unparalleled tome.

Keywords: anthropocentrism, Pythagorean strategy, Pythagorean universe, intelligent design, physico-theological argument, effectiveness of mathematics.

Библиографическое описание для цитирования:

Буров А.В., Цвеллик А.М. Пифагорейский аргумент разумного замысла Вселенной и его критика. Статья 2: Пифагорейская стратегия физики // Идеи и идеалы. – 2023. – Т. 15, № 4, ч. 2. – С. 306–335. – DOI: 10.17212/2075-0862-2023-15.4.2-306-335.

Burov A., Tselik A. The Pythagorean Argument of the Intelligent Design of the Universe and Its Critique. Part II: Pythagorean Strategy of Physics. *Idei i idealy = Ideas and Ideals*, 2023, vol. 15, iss. 4, pt. 2, pp. 306–335. DOI: 10.17212/2075-0862-2023-15.4.2-306-335.

...Perhaps the best way to proceed is to try to guess equations, and disregard physical models or descriptions. For example, ... Dirac obtained his equation for the description of the electron by an almost purely mathematical proposition. A simple physical view by which all the contents of this equation can be seen is still lacking.

...Возможно, лучший путь – это попытаться угадать уравнения, не обращая внимания на физические модели или описания. Например, ... Дирак получил свое уравнение для электрона посредством почти чисто математического рассуждения. Простого физического представления, с помощью которого можно было бы увидеть содержание этого уравнения, до сих пор не существует.

Ричард Фейнман

My topic is anthropocentrism, the teaching that the human race is in some way privileged, central to the scheme of things, and my goal in this book is to show in what way scientists have—quite recently and quite successfully—adopted an anthropocentric point of view in applying mathematics.

Моей темой является антропоцентризм, учение о привилегированном, в некотором роде центральном положении человечества в общей схеме вещей, и моя цель в этой книге – показать, каким образом ученые, с достаточно недавних пор и весьма успешно, приняли антропоцентрическую точку зрения в применении математики.

Марк Штайнер

1. Стратегический аспект пифагорейского аргумента

Происхождение новых идей, в том числе научных, является одной из тайн этого мира. В отличие от загадок, тайны, в силу своей глубины, не допускают полноты раскрытия; обычно они не могут быть даже ясно сформулированы. Они непостижимы потому же, почему и велики – в силу своей принадлежности к основаниям бытия. Наука, искусство, философия, религия в своих глубинах являются модусами движения к основаниям бытия, к таинственному, допуская некоторое, всегда неполное и загадочное выражение его.

Наука ближе всего подходит к тайне там, где она занята своими основами, для физики – открытием законов природы. Первая статья этого цикла [2] была посвящена рассмотрению характера физических законов, которые уже прочно вошли в учебники. В ней рассматривался общий для отцов-основателей физики комплекс религиозно-философских убеждений, вариант христианского платонизма, который мы назвали *пифагорейской верой*. Эта вера определяла как возможность, так и, скажем прямо, святость фундаментальных открытий. Эти две взаимодополняющие линии рассмотрения, объективная и субъективная, совместно приводят к *пифагорейскому аргументу* разумного замысла Вселенной. Аргумент формулируется как абдуктивный гипотетический ответ на вопрос о возможной причине *пифагорейности Вселенной, минимакса сложности ее законов, ее когнитивной самосогласованности* в этом аспекте. Эти введенные нами синонимичные термины подробно обсуждались в первой статье. Здесь мы лишь кратко напомним их смысл: известные в громадном размахе параметров и нередко с немислимо высокой точностью физические законы сочетают достаточную для нашего познания простоту фундаментальных принципов с необычайным богатством построенных на отвечающем им основании природных форм. С одной стороны, законы обеспечивают возможность существования весьма сложных живых разумных существ, *сapienсов*, а с другой стороны, они настолько просты, что в значительной степени доступны открытию sapienсами. Вывод о разумном замысле столь особенной Вселенной предлагается как рациональная гипотеза на основе объективной линии пифагорейской аргументации. Эта линия приводит к идее Создателя как Бога-математика (Дирак) и Великого Архитектора (Фейнман). Субъективная же линия пифагорейского аргумента связана с оценкой пифагорейской веры как оправдавшей выше всех ожиданий, а потому заслуживающей статуса рациональной рабочей гипотезы. Обе стороны пифагорейского аргумента раскрывают космическое значение человека, или, что эквивалентно, антропоцентризм Вселенной. В классификации Канта пифагорейский аргумент является вариантом физико-теологического аргумента разумного замысла.

Обозначенные качества Вселенной самой по себе и веры в эти качества основоположников математической физики мы связываем с именем Пифагора потому, что, как пишет историк физики Китти Фергюсон, «Пифагор стал символом загадочного, но неоспоримого дара: способности человеческих умов соединяться с фундаментальной рациональностью Вселенной» [16, loc 47].

У пифагорейского аргумента есть особый аспект, отчасти технического характера, до сих пор не обсуждавшийся нами. Великие физические открытия состоялись не только потому, что сами законы допускали

такую возможность, но и потому, что нашлись люди, верившие в эту возможность и чувствовавшие святость соответствующих задач. Они состоялись еще и потому, что из того же комплекса убеждений проистекали своего рода намеки на особый способ мышления, оказавшийся исключительно плодотворным.

Описанию вытекавших отсюда движений ума посвящена не слишком обширная литература, что связано отчасти с технической трудностью такой задачи, отчасти с традицией умолчания авторов о предыстории рождения их идей, а отчасти, полагаем, с религиозно-философской значимостью этой темы, ее ролью на поле острых идеологических столкновений. На наш взгляд, наиболее значительным текстом такого рода является книга философа Марка Штайнера «The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem» [24]. Предлагаемая вниманию читателя статья в значительной степени идет по стопам его исследования.

Прежде чем переходить к историческому обзору поисков новых законов, отметим общий характер этих поисков, способ, каким они велись. Охарактеризовать его можно как *игру в математические аналогии*. Достойная проработки гипотеза должна удовлетворять сразу нескольким свойствам. Во-первых, она должна быть основана на некоем едином принципе, или на согласованном единстве универсальных математических принципов. Во-вторых, она должна давать надежду на описание новых фактов, не укладывающихся в ложе старой теории. И в-третьих, в пределе она должна сулить возможность согласия со старой теорией. Изначально все эти условия адресуются не к формально-логическому, а к интуитивно-образному началу мышления, требуя некоторой вольной игры с математическими формами, но потом, когда гипотеза будет найдена, выполнение обещаний должно быть продемонстрировано достаточно строго. Как писал Анри Пуанкаре,

«Закон вытекает из опыта, но он следует из него не непосредственно... чтобы вывести закон из опыта, необходимо обобщать. ... Но каким образом строить эти обобщения? Каждая частная истина, очевидно, может быть широко истолкована бесчисленным множеством способов. Из тысячи путей, открывающихся перед нами, необходимо сделать выбор, по крайней мере предварительный; но кто будет руководить нами в этом выборе? Этим руководителем может быть только аналогия. Но как неопределенно это слово! Человек с примитивным мировоззрением знает только грубые аналогии, действующие на чувства, аналогии в красках и звуках. Он не стал бы думать, например, об установлении связи между светом и лучистой теплотой. Но кто же научил нас познанию истинных, глубоких аналогий, таких, которых не видит

глаз, но которые отгадывает разум? Этому научил нас математический ум, который пренебрегает содержанием, чтобы иметь дело только с чистой формой» [6, с. 220].

Игровое начало, как творческое зерно, унаследовано физикой от математики. Уже комплексные числа пришли в математику игровым образом, как отмечает это видный британский математик Сэр Тимоти Гоуэрс:

«We can directly relate the real numbers to quantities such as time, mass, length, temperature, and so on, ... so it feels as though they have an independent existence that we observe. But we do not run into the complex numbers in that way. Rather, we play what feels like a sort of game—imagine what would happen if -1 did have a square root. But why in that case do we not feel happy just to say that the complex numbers were invented? The reason is that the game is much more interesting than we had any right to expect, and it has had a huge influence even on those parts of mathematics that are about real numbers or even integers. It is as though after our one small act of inventing i , the game took over and we lost control of the consequences» [18, p. 10].

«Мы можем напрямую связать действительные числа с такими величинами, как время, масса, длина, температура и так далее, ... так что кажется, будто числа имеют независимое существование, которое мы наблюдаем. Но мы не сталкиваемся с комплексными числами таким образом. Скорее, мы вступаем здесь в то, что кажется некой игрой: представьте, что было бы, если бы число -1 действительно имело квадратный корень. Но почему же тогда нам не нравится утверждение, что комплексные числа были изобретены? Причина в том, что игра оказывается гораздо интереснее, чем мы могли ожидать, и она оказала огромное влияние даже на те части математики, которые касаются действительных чисел или даже целых чисел¹. Это как будто после нашего единственного акта изобретения i , игра взяла верх, и мы потеряли контроль над последствиями».

Введение в контекст фундаментальной стратегии математической физики слова *игра* порождает ассоциацию с художественными и философскими произведениями, чьей ведущей темой является именно игра, прежде всего с романом Германа Гессе «Игра в бисер» и культурологическим исследованием Йохан Хейзинги «Человек играющий». Похоже, однако, что ни эти выдающиеся авторы, ни другие представители гуманитарной куль-

¹ Комплексные числа играют ведущую роль в квантовой физике.

туры не заметили, что именно эстетически-игровое отношение к математике сделало возможным великий переворот в представлениях о материи, пространстве и времени, который происходил буквально у них на глазах. Две культуры, научно-техническая и гуманитарная, теряли и продолжают терять друг друга [23].

Вера в то, что вольная игра в математические аналогии, аллюзии и аллегории способна привести нас к усмотрению концептуального каркаса Вселенной, абсолютно антропоцентрична. Парадоксальным образом этот очевидный антропоцентризм физики, а с учетом размаха параметров и точности современной физики и антропоцентризм самой Вселенной, практически не является предметом рефлексии в среде ученых-естественников; он либо замалчивается, либо отвергается. Этот доминирующий менталитет представляется достаточно удивительным и достойным осмысления.

Вопрос о том, каким образом человечество находило, корректировало и развивало представления о законах природы, обращен к трем тайнам: тайне законов, тайне математики и тайне происхождения новых идей. Этим обусловлено исключительное значение данной темы, но отсюда же проистекает и особая трудность ее понимания и изложения.

2. Небесная механика

Начало новой физики справедливо связывают с построением модели солнечной системы. К концу XVI века в идейном багаже человечества присутствовал лишь один способ количественного представления движения планет – в виде суперпозиции круговых движений. Птолемеевская (геоцентрическая) и коперниковская (гелиоцентрическая) системы отличались лишь спецификой выбора таких кругов. И та и другая система представляла собой определенный бриколаж: явление описывалось посредством того, что было в интеллектуальном багаже, под рукой, а не тем, что отвечало бы сути дела. Существенно, что последнее не только не было известно, но даже и вопрос о нем не ставился. На современном физическом языке описательный подход такого рода называется подгонкой (fit), радикально отличаясь от понимания в терминах универсального закона. Галилей и Кеплер были, наверное, первыми, кто не только увидел сущностную пустоту подгонок, но и сделал значительный содержательный шаг к законам.

Можно выделить следующие факторы, способствовавшие успеху Кеплера и впоследствии Ньютона.

1. В распоряжении Кеплера оказались уникальные, весьма обширные и самые точные для своего времени таблицы Тихо Браге о положениях планет.

2. Следуя Копернику, Кеплер радикально сменил привычную точку зрения, представляя траектории движения планет не такими, как они видны с Земли, что казалось естественным и соответствующим здравому смыслу, но какими бы их увидел «невозможный» наблюдатель, находящийся на Солнце. Рассматриваемые с этой воображаемой «позиции Бога» орбиты планет предстали не сложными петлями, а чем-то более простым вроде слегка сплюснутых окружностей.

3. Кеплер знал об эллипсах из незадолго до того вернувшейся на Запад книги Аполлония Пергского «Конические сечения». Этот шедевр античной математики содействовал догадке, что орбиты планет являются коническими сечениями, эллипсами. На такую гипотезу несомненно работала математическая интуиция Кеплера, его пифагорейская вера: эллипс есть математически простая кривая, заданная одним принципом, обладающая множеством математически интересных и красиво доказываемых свойств и притом похожая на траектории планет.

4. Работал здесь и еще один фактор, уже сверхчеловеческого порядка: справедливость законов Кеплера была обеспечена весьма особенным фундаментальным законом. Закон всемирного тяготения обладает целым рядом свойств, критически важных для возможности его открытия. Зависимость силы только от расстояния между телами и ее направленность вдоль соединяющей их линии обеспечила плоские орбиты и выполнение Второго закона Кеплера, являющегося следствием сохранения углового момента. Пропорциональность же силы обратному квадрату расстояния обеспечивала сразу два критически важных обстоятельства. Только при таком характере убывания силы с расстоянием орбитами планет оказывались эллипсы, привлекавшие внимание еще античных математиков своими эстетическими свойствами. В любом другом случае орбиты выражались бы неизвестными и много более сложными формулами, что служило бы колоссальным препятствием открытию наподобие кеплеровского. Вдобавок убывание силы с квадратом расстояния открывало возможность эвристической аналогии с освещением поверхности пламенем свечи, сыгравшей роль в открытии закона тяготения.

5. Еще одним фактором сверхчеловеческого порядка являлось то, что в конкретных условиях Солнечной системы задача о движении планет с хорошей точностью сводится к идеализированной проблеме движения материальной точки вокруг неподвижного гравитационного центра. Задача эта решается аналитически. Согласие законов Кеплера и расчетов Ньютона с имевшимися астрономическими данными было обеспечено значительным превосходством массы Солнца над суммарной массой планет, удаленностью планет друг от друга и, как выяснилось лишь в XX веке, малостью релятивистских поправок.

Открытие закона движения небесных тел оказалось возможным лишь в силу стечения всех этих обстоятельств. До Ньютона информационное «схлопывание» длинных таблиц Браге в три угаданных Кеплером закона выглядело лишь как удачное описание видимых движений планет, без какого-либо их общего основания и логической связи.

Ньютон поставил вопрос, следуя Галилею. Если книга природы действительно написана на языке математики, то у натуральной философии должны быть *математические принципы*, вычислимыми следствиями которых являлись бы движения всех тел во Вселенной. В поисках этих принципов Ньютон критически рассмотрел то, что ему было известно от предшественников и современников, и сконструировал математическую систему уравнений. Система состояла из четырех всеобщих законов: трех законов движения и закона тяготения. При этом Ньютон неявным, но существенным образом опирался на принципы математической простоты, законы сохранения и симметрии. Именно эти принципы позволили выбрать ему наиболее простые и симметричные законы движения из всех мыслимых, и постулировать их как универсальные во Вселенной. Постулат универсальности законов, столь важный для космической познаваемости, блестяще оправдал себя в последующем развитии физики.

Затянутый Гуком спор об авторстве в отношении закона всемирного тяготения нерелевантен существу дела не только потому, что до Гука эту гипотезу высказывал Буйо, отталкиваясь от аналогии с освещенностью предмета пламенем свечи и связанной с ней идеи сохранения потока. От кого бы Ньютон впервые ни услышал предположение об обратном квадрате расстояния, важно, что он проделал великую работу, построив небесную механику и математически выведя все законы Кеплера, разработав для того математический анализ и векторное исчисление. Никаких иных гипотез о силе тяготения Ньютон, насколько известно, выдвигать даже не пробовал. На этапе первых догадок предположение об обратном квадрате в законе тяготения получило для него особенный вес, когда он понял, что для круговых орбит отсюда следуют законы Кеплера [4]. Известная ему от Буйо аналогия свечи работала в ту же сторону. В контексте истории пифагорейской стратегии важно, что догадка, основанная на беглом анализе простейших случаев и на математической аналогии, оказалась удачной. Сама же возможность такого угадывания была обязана уже не только гению Ньютона и его великих предшественников, но прежде всего, подчеркнем это еще раз, природе самой по себе.

С течением времени красота ньютоновой механики раскрывала новые, дотоле неведомые грани. Как отмечает Сэр Роджер Пенроуз,

«Much of the undoubted beauty in Newton's framework was revealed only much later, through the magnificent works of such great mathema-

ticians as Euler, Lagrange, Laplace, and Hamilton (as the terms Euler – Lagrange equations, the Laplacian operator, Lagrangians, and Hamiltonians – which are key ingredients of modern physical theory – bear witness)».

«Большая часть несомненной красоты в концепции Ньютона была раскрыта гораздо позже, в великолепных работах таких выдающихся математиков, как Эйлер, Лагранж, Лаплас и Гамильтон (о чем свидетельствуют такие термины, как уравнения Эйлера – Лагранжа, оператор Лапласа, лагранжианы и гамильтонианы – ключевые элементы современной физической теории)» [22, p. 7].

Встречаются утверждения, что математика эффективна лишь при решении легких задач вроде отыскания идеализированных орбит. Мы, так сказать, решаем только то, что можем, а весь огромный мир остается за бортом. Это утверждение верно лишь при весьма поверхностном понимании дела. Заложённая в основании физики идея скрытой математичности мира предполагает веру в достаточную простоту искомым объективных аксиом, фундаментальных законов природы. Эта идея ни в малейшей степени не предполагает простоту решения конкретных физических проблем на базе уже известных законов. Ситуация в этом отношении не отличается от самой математики с ее простыми аксиомами и бесконечностью недоказанных, а то и недоказуемых теорем. Общая задача точного описания движения трех и более тяготеющих тел в этом отношении подобна одной из неразрешимых задач арифметики или геометрии. Однако, если одно из тел значительно легче других, задачу об их движении можно решать хоть и приближенно, но достаточно эффективно [10].

Именно с такого рода проблемами имеют дело те, кто запускает удаленные от Земли космические зонды. Движение этих зондов является управляемым только на начальном и конечном участках траектории, т. е. вблизи Земли и вблизи места назначения. Всё расстояние от Земли до, скажем, Нептуна искусственные летательные аппараты движутся только под действием сил притяжения Солнца и разных планет, причем конструкторы активно пользуются вычислениями этих сил для так называемого гравитационного маневра, минимизирующего энергетические затраты. Несмотря на то что о точных решениях в стандартных функциях здесь речи не идет, задачи космической навигации успешно решаются. Подчеркнем, что ученые решают эти сложнейшие задачи, пользуясь, за редкими исключениями, лишь теми, формально очень простыми, классическими законами динамики, которые открыл Исаак Ньютон. Успех подобных мероприятий наглядно демонстрируется обильными фото- и видеоматериалами, доставленными нам с далеких космических объектов.

3. Теория электромагнитного поля

После небесной механики следующим великим открытием физики была теория электромагнетизма. Понимание того, что внешне несхожие между собой электрические и магнитные явления тесно связаны, стало появляться в первой половине XIX века. К середине века был уже накоплен ряд уравнений для электрического и магнитного полей, угаданных на основе интуиций простоты, линейности, вращательной инвариантности, аналогии с освещенностью свечой. Майкл Фарадей, введший в науку понятие физического поля и открывший одну из двух динамических связей электрического и магнитного полей, подчеркивал религиозный аспект научного познания:

«The beauty of electricity or of any other force is not that the power is mysterious, and unexpected, touching every sense at unawares in turn, but that it is under *law*, and that the taught intellect can even now govern it largely. The human mind is placed above, and not beneath it, and it is in such a point of view that the mental education afforded by science is rendered super-eminent in dignity, in practical application and utility; for by enabling the mind to apply the natural power through law, it conveys the gifts of God to man».

«Красота электричества или любой другой силы заключается не в том, что эта сила таинственна и неожиданна, а в том, что она подчинена закону и что изучивший ее интеллект может уже сегодня в значительной степени управлять ею. Человеческий разум находится над, а не под природным законом, и именно с этой точки зрения образование, даваемое наукой, приобретает высшее достоинство, практическое применение и пользу, ибо, позволяя разуму применять природные силы через знание закона, оно передает человеку дары Божии» [15].

Сложившиеся разрозненные соотношения для электрического и магнитного полей собрал воедино соотечественник Фарадея Джеймс Клерк Максвелл. Он переписал их на новом математическом языке векторного анализа, сформулированном ирландским математиком и механиком Уильямом Роуэном Гамильтоном. Будучи записана в этой форме, получившаяся система уравнений ясно продемонстрировала свою неполноту: она годилась лишь для замкнутых токов и стационарных плотностей заряда. Каким законам удовлетворяют поля, создаваемые переменными зарядами и незамкнутыми токами, было совершенно неизвестно.

В поисках гипотез для этой неизвестной общей ситуации Максвелл обратился к теоретическим спекуляциям. Рассматривая имевшуюся систему уравнений, он заметил, что ограничение на замкнутость токов снимается

при добавлении к току производной по времени от электрического поля, названной им «током смещения» [8]. После такой модификации уравнения допускали бы произвольное движение порождающих поля зарядов и токов. Заметим, что предложенный Максвеллом способ снятия ограничения на токи был одним из многих возможных; выделяла его лишь наибольшая элегантность. После такой, никакой эмпирией не оправданной модификации уравнений получалось, что электрическое и магнитное поля, изменяясь во времени, порождают друг друга по принципу «тяги-толкай». Согласно такой теории поля могли существовать и перемещаться по пространству сами по себе, в отрыве от каких-либо источников. Максвелл предположил, что свет и является такой электромагнитной волной.

Христианский мистик Максвелл верил в то, что познание законов природы, замысла Творца о Вселенной приближает к Нему человека, а потому желанно и Всевышнему. А раз так, то следует ожидать, что законы должны быть открываемы, достаточно просты и интуитивно притягательны.

«...The human mind cannot rest satisfied with the mere phenomena which it contemplates, but is constrained to seek for the principles embodied in the phenomena, and that these elementary principles compel us to admit that the laws of matter and the laws of mind are derived from the same source, the source of all wisdom and truth».

«...Человеческий разум не может удовлетвориться простыми явлениями, которые он созерцает, но побуждаем искать принципы, воплощенные в этих явлениях, и эти базовые принципы заставляют нас признать, что законы материи и законы разума происходят из одного и того же источника, источника всей мудрости и истины» [21], –

так говорил двадцатипятилетний Клерк Максвелл, вступая в профессорскую должность в Университете Абердина. Выраженное здесь понимание глубокого религиозного значения науки сопровождало великого ученого всю жизнь. После его смерти друзья нашли в его бумагах молитву по мотивам его любимого восьмого псалма:

«When we consider the heavens the work of thy fingers, the moon and the stars which thou has ordained, teach us to know that thou art mindful of us showing us the wisdom of your laws... that looking higher than the heavens may we see Jesus».

«Когда мы рассматриваем небеса – дело рук твоих, Луну и звезды, что ты поставил, научи нас ведать, что ты помнишь о нас, открывая нам

мудрость законов твоих... чтобы, взирая выше небес, могли мы увидеть Иисуса» [25, р. 400].

Не подтвержденная никакими экспериментами новация Максвелла встретила в целом довольно прохладное отношение настроенных скептически к подобным спекуляциям коллег. Лишь через два с лишним десятилетия после ее публикации нашелся физик, взявшийся проверить теорию экспериментально, – Генрих Герц, который и убедился в правоте «маэстро Максвелла». Как стало выясняться после опытов Герца, чисто умозрительная теория Максвелла верно усмотрела единую природу радиоволн, теплового излучения, видимого света, ультрафиолета и открытых позднее рентгеновских и гамма-лучей как электромагнитных волн разной длины. Излишне говорить, что последствия этого открытия для цивилизации невозможно переоценить, но значение максвелловой электродинамики этим не исчерпывается. Подобно механике Ньютона, максвеллова теория поля с течением времени раскрывала скрытую до того свою красоту, выводя к новым элегантным формам своего выражения. Более того, эта теория стала отправной точкой революционных изменений в физических представлениях о пространстве и времени.

4. Специальная теория относительности

Максвелл исходил из очевидности здравого смысла: любые поля требуют какой-то среды, в которой они могли бы распространяться. Не могут же поля распространяться через «ничто», допускать такое казалось абсурдным. Если вспомнить, что еще Бойль и Гюйгенс рассматривали свет как волны гипотетического эфира, то и неудивительно, что тот же эфир был принят Максвеллом и его последователями как среда для распространения электромагнитного поля (света). Из идеи светонесущей среды следовало, что уравнения Максвелла должны быть инвариантны при переходе в движущуюся относительно эфира систему отсчета – должен быть эффект «эфирного ветра». Измерению этого эффекта были посвящены эксперименты Майкельсона – Морли (1887), но никакого эфирного ветра в них не обнаружилось. Отсюда следовало, что либо эффекты такого рода как-то подавлены, либо представление о светонесущем эфире вообще ложно.

Принципиальный рывок вперед был совершен крупнейшим математиком и математическим физиком Анри Пуанкаре, выдвинувшим принцип относительности, гипотезу о том, что уравнения Максвелла одни и те же во всех инерциальных системах отсчета, т. е. инвариантны в этом смысле (1889). Хотя эта гипотеза и поддерживалась результатами Майкельсона – Морли, она шла против того, что казалось логически необходимым, – против представления о выделенной системе отсчета, связанной со средой

распространения света. На этот шаг Пуанкаре решился не столько под давлением необнаружившегося эфирного ветра (принято было считать, что просто он не столь велик и его еще обнаружат), сколько по побуждению математической интуиции, нацеливавшей на поиск инвариантностей.

Математическая интуиция увлекала на поиск универсальных математических симметрий, выражающихся элегантными формами, тогда как здравый смысл, которому следовало большинство физиков, предлагал искать подходящую механическую модель эфира. Великий математик Пуанкаре сделал ставку на математические симметрии, подобно тому как Ньютон принял странное дальное действие по поддержанному математической интуицией закону обратных квадратов. Исходя из сформулированного им принципа относительности, Пуанкаре решил задачу о группе симметрии уравнений Максвелла, которую он назвал «группой Лоренца», щедро отдавая приоритет коллеге, также вовлеченному в математические исследования этого рода [1, 12]. Таким образом, теория, позже названная специальной теорией относительности, была математически выведена из уравнений Максвелла при дополнительной гипотезе эффективного отсутствия светоносной среды – гипотезе, граничившей с абсурдом, но привлекательной математически:

«...Poincaré compared the existing theories to extract common structures and to relativize the attached mechanical picture. In particular, the ether, having been the subject of so many contradictory mechanical constructs, was not to be compared to the usual bodies of mechanics. Poincaré then decided that it should not carry momentum, and that motion through it should not be detectable. Perhaps, he prophesied in 1888, the ether would someday completely disappear from physics. These were unique, daring pronouncements at a time when every physicist believed the ether to exist just as much as the sun and the moon. Another characteristic of Poincaré's criticism was his reliance on general principles. Like Maxwell and Helmholtz, he renounced detailed mechanical pictures of everything in favor of general principles of mechanical origin: the energy principle, the principle of reaction, the relativity principle, and the principle of least action».

«...Пуанкаре сравнил существующие теории, чтобы выделить общие структуры и релятивизировать прилагающуюся механическую картину. В частности, ему было ясно, что эфир, являвшийся предметом многих противоречивых механических моделей, нельзя сравнивать с обычными телами механики. Пуанкаре решил, что эфир не должен обладать импульсом и что движение через него не должно быть наблюдаемо. Возможно, – предсказал он еще в 1888 году, – эфир когда-нибудь

полностью исчезнет из физики. Это были уникальные и смелые заявления в то время, когда каждый физик верил, что эфир существует так же, как Солнце и Луна. Другой особенностью критики Пуанкаре была его опора на общие принципы. Подобно Максвеллу и Гельмгольцу, он отказался от детальных механических картин в пользу общих принципов механического происхождения: принципа энергии, принципа реакции, принципа относительности и принципа наименьшего действия» [12, p. 184].

5. Общая теория относительности

Следующий шаг физической мысли был продолжением этого и был совершен по преимуществу Альбертом Эйнштейном. Если эфира как бы нет, мыслил он, то не только скорость, но и ускорение должно быть лишь относительным, но не абсолютным. А это значит, что адекватная реальности форма законов природы должна быть *ковариантна*, т. е. инвариантна относительно перехода в любую из систем отсчета, необязательно инерциальную. Эйнштейн пошел даже дальше того, предположив ковариантность законов при произвольных достаточно гладких преобразованиях координат пространства-времени.

Второй постулат Эйнштейна вытекал из его мысленного эксперимента внутри падающего в гравитационном поле лифта, где, по предположению, никакими средствами нельзя установить отличие от обычной инерциальной системы без каких-либо полей. Этот принцип (сформулированный еще Ньютоном) постулирует эквивалентность «фиктивных» сил в неинерциальных системах силам тяготения, или, что то же самое, пропорциональность инерционной и гравитационной масс любого тела.

Из первого и второго постулата вытекало, что пространство в общем случае неевклидово, его кривизна порождается гравитационным полем. Действительно, уже из специальной теории относительности следовало, что наблюдатель, находящийся на вращающемся кольце, обнаружит, что отношение длины окружности к диаметру его кольца меньше π . В силу же принципа эквивалентности тот же вывод о неевклидовости должен быть справедлив и при наличии гравитационных полей. Отсюда шел путь к дифференциальной неевклидовой геометрии как языку искомой теории. Эта область математики была разработана в конце XIX – начале XX века Риманом и его последователями Кристоффелем, Риччи, Леви-Чивитой.

Третий постулат Эйнштейна, принцип соответствия, требовал согласия ковариантной теории со специальной теорией относительности для инерциальных систем отсчета, если нет гравитационного поля. Он также требовал согласия с ньютоновской небесной механикой в предельном случае малых скоростей и слабых полей.

Четвертый постулат требовал выполнения принципа наименьшего действия для общей системы частиц и полей. Этим постулатом в полной мере воспользовался Давид Гильберт, получивший ковариантные уравнения параллельно с Эйнштейном и независимо от него (см.: [5, 12], где этот вопрос рассмотрен детально, включая и проблему приоритета).

Наконец, пятый постулат, принцип простоты, требовал из всех возможных ковариантных теорий, удовлетворяющих четырем постулатам, выбрать наиболее простую с точки зрения математической формы закона.

Как ни странно это может прозвучать для видящих науку чисто эмпирическим предприятием, общая теория относительности была выведена лишь из означенных умозрительных постулатов [12, p. 332], без привлечения дополнительных эмпирических данных или фактов, без каких-либо подгонок под количественные наблюдения. На сегодня, однако же, эта теория является одной из самых точных, конкурируя в этом лишь с квантовой электродинамикой. Пр процитируем в этой связи одного из крупнейших математических физиков современности, нобелевского лауреата Роджера Пенроуза, его последнюю книгу о роли моды, веры и фантазии в новой физике Вселенной:

«It should be emphasized that precision of general relativity goes enormously beyond – by an additional factor of about 10^8 (i.e. one hundred million) or more – that which was observationally available to Einstein when he first formulated his gravitational theory. The observed precision in Newton’s gravitational theory could itself be argued to be around one part in 10^7 . Accordingly, the “1 part in 10^{14} ” precision of general relativity was already “out there” in nature, before Einstein formulated his own theory. Yet that additional precision (by a factor of around one hundred million), being unknown to Einstein, can have played no role whatever in his formulating his theory. Thus this new mathematical model of nature was not a man-made construction invented merely in an attempt to find the best theory to fit the facts; the mathematical scheme was, in a clear sense, already there in the works of nature herself. This mathematical simplicity, or elegance, or however one should describe it, is a genuine part of nature’s ways, and it is not simply that our minds are attuned to being impressed by such mathematical beauty».

«Следует подчеркнуть, что точность общей теории относительности значительно превосходит – на дополнительный коэффициент примерно в 10^8 (то есть сто миллионов) или больше – ту, которая была доступна Эйнштейну, когда он впервые сформулировал свою гравитационную теорию. Наблюдаемая точность в гравитационной теории Ньютона могла бы быть охарактеризована примерно как одна часть из 10^7 .

Соответственно, точность «1 часть из 10^{14} » общей теории относительности уже была «там» в природе, прежде чем Эйнштейн сформулировал свою собственную теорию. Однако эта дополнительная точность (на коэффициент около ста миллионов), неизвестная Эйнштейну, не могла сыграть никакой роли в формулировании им своей теории. Таким образом, эта новая математическая модель природы не была человеческим изобретением, созданным лишь в попытке найти лучшую теорию, соответствующую фактам; математическая схема, в ясном смысле, уже существовала в творениях самой природы. Эта математическая простота или элегантность, или как бы ее ни называли, является настоящей частью самой природы, а не просто следствие того, что наши умы настроены впечатляться такой математической красотой» [22, р. 7].

На основе анализа уравнений общей теории относительности петроградский математический физик Александр Фридман в 1922 году пришел к выводу о нестационарности Вселенной, опубликовав эти выводы в одном из немецких журналов. В вышедшей вскоре после этого книге «Мир как пространство и время» (1925) он писал:

«Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев: для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира, начиная с некоторого значения, постоянно возрастает с течением времени; возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто), затем снова из точки доводит свой радиус до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т. д. Невольно вспоминается сказание индусской мифологии о периодах жизни; является возможность также говорить о “сотворении мира из ничего”» [7].

Эйнштейну поначалу показалось, что вычисления Фридмана ошибочны, о чем он написал в тот же немецкий журнал в 1923 году. Однако после разговора с находившимся в Германии Юрием Крутковым Эйнштейн понял, что ошибся он, а не Фридман, и тогда он выслал в журнал опровержение уже на свое опровержение, отметив, что решения Фридмана «проливают новый свет». Тем не менее, несмотря на всю эту историю, Эйнштейн продолжал рассматривать стационарную вселенную как основную гипотезу, следуя, видимо, предрассудкам Спинозистского атемпорализма. Историк физики Макс Джеммер пишет:

«Было высказано предположение, что Эйнштейн совершил эту ошибку, потому что он находился под влиянием Спинозы, который

в своей *Этике* заявил: “Бог неизменен или [что то же самое] все его атрибуты неизменны” и “протяженная вещь [как пространство] и мыслящая вещь являются атрибутами Бога”. В соответствии со Спинозой Эйнштейн интерпретировал термин *пробывать* в стихе “Небеса пребывают от вечности до вечности” в смысле неизменного существования² [20, loc. 722].

В 1930 году, после того как Эдвин Хаббл, реализуя замысел Джорджа Леметра, экспериментально открыл разбегание галактик по закону Фридмана, Эйнштейн полностью отказался от идеи стационарной вселенной. Позже, в 1965 году, это открытие было дополнительно подтверждено Пензиасом и Вильсоном, которые обнаружили микроволновый фон реликтового излучения, предсказанный Гамовым, Альфером и Германом в 1948 году на основе модели Фридмана. Применяя уравнения Эйнштейна к тому разбеганию галактик, что уже весьма надежно зарегистрировано современными телескопами, и решая уравнения назад по времени, получаем вывод о «Большом взрыве», исходной сингулярности, из которой Вселенная родилась примерно 14 млрд лет назад. Был ли этот взрыв «рождением из ничего», или ему нечто предшествовало – вопрос открытый.

Возвращаясь же к эйнштейновскому предрассудку стационарной вселенной, заметим, что это один из тех случаев, когда уравнения как бы бросали вызов своему автору и побеждали его. В борьбе с этим вызовом Эйнштейн еще в 1917 году добавил в уравнения единственное, что они допускали без особого насилия, – давление вакуума. Позже он об этом якобы пожалел, но ирония в том, что это давление было-таки обнаружено в конце 90-х годов, получив название «темной энергии».

Другими предсказаниями общей теории относительности были чисто спекулятивные заключения о черных дырах и гравитационных волнах. Со временем и то и другое полностью подтвердилось.

При всей своей космичности эта удивительная теория о пространстве, времени и гравитации оказалась полезной еще и в сугубо земных делах. Проблема нахождения пути в лесу или в незнакомом городе – одна из самых распространенных и понятных любому человеку. Трудность этой задачи нашла отражение как во множестве сказок и историй, так и в ряде эпических произведений. В частности, представленная в романе «Война и мир» военная философия Льва Толстого основана на идее, что армии неуправляемы, поскольку при попытке исполнить сложный маневр они неизменно теряют дорогу. Возможно, здесь есть преувеличение, но заведомо

² “Deum, sive omnia Dei attributa esse immutabilia,” *Ethics*, col. 2 to proposition 20, p. 1; “rem extensam (et rem cogitantem) Dei attributa esse,” *ibid.*, col. 2 to proposition 14 [20, loc. 883].

имеется и большая доля правды. В наше время, однако, эта задача полностью и с исключительной точностью решена: дорогу вычисляет и указывает GPS, Global Positioning System, посредством связи бытового карманного прибора со спутниковой сетью. Точность, с которой работает GPS, эквивалентна попаданию в туза при выстреле со 100 км, что обеспечивается учетом эффектов общей теории относительности, сформулированной Эйнштейном и Гильбертом без всякой связи с проблемами ориентации на местности.

Более выразительного чуда выведения нового знания из априорных принципов красоты, чем общая теория относительности, история не знала и не знает до сих пор.

6. Квантовая механика

Если попытаться кратчайшим образом описать ту познавательную стратегию, которая привела к великим физическим открытиям XX века, то вряд ли это можно сделать лучше Ричарда Фейнмана:

«It is possible to know when you are right way ahead of checking all the consequences. You can recognize truth by its beauty and simplicity. It is always easy when you have made a guess, and done two or three little calculations to make sure that it is not obviously wrong, to know that it is right We have to find a new view of the world that has to agree with everything that is known, but disagree in its predictions somewhere If you can find any other view of the world which agrees over the entire range where things have already been observed, but disagrees somewhere else, you have made a great discovery».

«В своей правоте можно убедиться задолго до проверки всех следствий. Вы можете опознать истину по ее красоте и простоте. После того как вы сделали догадку и выполнили два-три небольших расчета, проверяя, что догадка не является очевидной ошибкой, всегда легко увидеть, что она верна. ... Нужно найти новый взгляд на мир, который должен быть в согласии со всем, что известно, но где-то отличаться в своих предсказаниях. ... Если вы смогли найти такую точку зрения на мир, которая согласуется со всем, что уже наблюдалось, но не согласуется где-то еще, вы сделали великое открытие» [17, p. 171].

История создания квантовой физики иллюстрирует эту стратегию с меньшей силой, чем история теории относительности. Здесь мы лишь кратко укажем на ряд важнейших шагов такого рода, отсылая за подробностями к специальным монографиям [11, 24, 27]; особо отметим весьма со-

держательный видеокурс по истории квантовой механики Андрея Грозина [3].

Квантовая физика началась с гипотезы Макса Планка о дискретности электромагнитного излучения, с пропорциональной частоте энергией кванта (1900). Эта гипотеза родилась в поиске такого физико-математического принципа, который объяснил бы наблюдавшийся спектр равновесного теплового излучения, излучения черного тела, противоречащий имевшейся «классической» физике. Предположение о дискретности нарушало существовавшие представления лишь в одном пункте, притом именно так, чтобы это нарушение было согласовано со старой теорией: объясняя новое, оно сходило на нет в классическом пределе большого числа квантов. Следующим подтверждением гипотезы световых квантов была построенная Эйнштейном на этой основе теория фотоэффекта, объяснившая основные особенности наблюдений (1905).

Из теории Планка вытекали далеко идущие догадки. Введенный им коэффициент пропорциональности между энергией и частотой кванта излучения имел размерность действия. Это наводило на универсальную гипотезу о квантованности действия любых физических систем, а не только электромагнитного поля. Именно по такому пути пошел Нильс Бор в построении первой успешной модели атома. Обобщая, он предположил, что состояния электрона в атоме могут быть не любыми, но принадлежащими дискретному ряду с целочисленными значениями действия в единицах постоянной Планка. Отсюда он тут же получил главную серию спектра излучения простейшего атома – водорода (1913). Гипотеза Бора удовлетворяла тому самому принципу соответствия, о котором позже ретроспективно писал Фейнман: она переходила в известный классический предел нерелятивистского тормозного излучения для действий, больших по сравнению с планковской константой.

Во второй половине 1925 года был открыт универсальный подход к атомной физике, позже названный «матричной механикой». Инициатором был Вернер Гейзенберг, которому пришла мысль рассматривать двухиндексные величины, амплитуды атомных переходов между двумя состояниями, как главные характеристики атома. Далее он заметил, что правило квантования Бора можно переписать как формулу в терминах таких амплитуд. Этот результат Гейзенберг показал своему научному руководителю Макс-у Борну, который перевел вычисления на неизвестный тогда Гейзенбергу элегантный язык матриц и увидел, что идеи Гейзенберга, кажется, могут быть представлены в шокирующе красивом виде – как единичность коммутатора матриц импульса и координаты, поделенного на постоянную Планка и мнимую единицу. Увлекавшийся альпинизмом Гейзенберг уехал в горы, и Борн поделился этой гипотезой с другим своим студентом, Паскуалем

Йорданом, который и нашел вскоре ее доказательство [3, лекция 9]. Отталкиваясь от этого результата, Борн, Йордан и вернувшийся из отпуска Гейзенберг получили и опубликовали основные формулы матричного подхода к квантовой механике. Вспоминая об этом времени, Гейзенберг писал:

«And now the summit is there in front of me; the whole area of internal relations in atomic theory is unexpectedly and clearly spread out before my eyes. What these internal relations show in all their mathematic abstraction, an incredible degree of simplicity, is a gift that we can only accept with humility. Not even Plato could have believed that it would be so beautiful. In fact these relations cannot have been invented: they have existed since the creation of the world».

«И вот уже вершина подо мною; вся область взаимосвязей атомной теории неожиданно и ясно раскинулась перед моими глазами. То, что эти соотношения показывают во всей своей математической абстракции, эта их фантастическая степень простоты, есть дар, который мы можем лишь смиренно принять. Даже и Платон не поверил бы, что это может оказаться столь красиво. Действительно, эти соотношения нельзя было изобрести: они существовали с сотворения мира» (цитируется по [9, р. 6]).

Математическое соответствие квантовых коммутаторов и классических скобок Пуассона было обнаружено в том же 1925 году Полем Дираком, независимо переоткрывшим ряд ключевых формул Борна и Йордана и сформулировавшим принцип соответствия более глубоко, чем это понималось до тех пор:

«The correspondence between the quantum and classical theories lies not so much in the limiting agreement when $h \rightarrow 0$ [the Plank constant tends to zero], as in the fact that the mathematical operations on the two theories obey in many cases the same laws».

«Соответствие между квантовой и классической теориями заключается не столько в согласии при $h \rightarrow 0$ [постоянной Планка, стремящейся к нулю], сколько в том факте, что математические операции над двумя теориями во многих случаях подчиняются одним и тем же правилам» [13].

Другая догадка, порожденная планковской идеей дискретности излучения, принадлежала Луи де Бройлю (1923). Если электромагнитное поле

демонстрирует одновременно корпускулярные и волновые свойства, спросил он, то не означает ли это универсальности корпускулярно-волнового дуализма? А если так, то всякой частице должна отвечать волна, частота которой связана с энергией планковским отношением, а волновой вектор тем же образом должен быть связан с импульсом в силу Лоренц-инвариантности. Но тогда, заметил Питер Дебай докладывавшему теорию де Бройля Эрвину Шредингеру, эта волна должна удовлетворять какому-то разумному уравнению. В самом конце 1925 года Шредингер нашел это уравнение на том же пифагорейском пути математических жонглирований, аналогий и соответствий [3, лекция 11].

Если войти в чуть большие детали, то стоит сказать, что вначале Шредингер, играя с Лоренц-инвариантными формулами де Бройля, впервые получил релятивистски инвариантное волновое уравнение, ныне известное как уравнение Клейна – Гордона для частиц без спина (спин еще не был открыт). Решая его для атома водорода, Шредингер получил правильный основной спектр, но у него не сходилась тонкая структура, за которую и отвечает спин. Тогда Шредингер решил, что вопрос о тонкой структуре можно отложить на будущее, а пока ограничиться нерелятивистским пределом полученного уравнения. Этот предел и получил его имя. Вскоре была показана эквивалентность волновой и матричной теорий; вероятностный смысл волновой функции был предложен Борном.

После того как нерелятивистское уравнение Шредингера доказало свою эффективность, Дирак в 1927 году задался вопросом о том, как его обобщить на релятивистский случай частиц со спином. Никаких экспериментальных данных у него не было, оставалось полагаться только на игры с математикой. На этом пути Дираку пришла в голову как бы абсурдная идея извлечь квадратный корень из Лоренц-инвариантного оператора д'Аламбера, тем самым получив уравнение первого, а не второго порядка, и не на скаляр, а на двухкомпонентную величину, поскольку спин электрона может принимать два значения. Двигаясь в этом направлении, он увидел, что корень из оператора извлечь можно, но простейшее возможное уравнение получается не на двух-, а на четырехкомпонентную величину. По сути, Дирак переоткрыл неизвестные ему тогда математические объекты, спиноры, введенные в 1913 году французским математиком Эли Картаном.

В силу самой процедуры вывода уравнение Дирака было согласовано с теорией относительности и содержало уравнение Шредингера как предельный случай. Одновременно из этого уравнения следовало нечто совершенно неожиданное, а именно то, что заряженные частицы должны, исходя из соображений симметрии, иметь каких-то неизвестных науке зеркальных двойников, отличающихся только знаком электрического заряда.

Зеркальный двойник электрона, позитрон, был экспериментально обнаружен через четыре года после математических игр Дирака, вслед за этим последовали наблюдения и других античастиц. Так, на кончике пера, руководствуясь абстрактными математическими соображениями симметрии и красоты, был открыт новый вид вещества – антиматерия.

Гейзенберг вспоминал, что квантовая теория была «сразу же найдена убедительной благодаря ее полноте и абстрактной красоте» [19]. Что касается полноты, то ее тут стоит понимать как достаточность для решения широкого класса задач тех универсальных принципов, которые были сформулированы в 1925–1926 годах. Подчеркивание же здесь Гейзенбергом роли красоты показывает, что не ему одному открывалось в рождавшейся теории то чудо, «что должно было существовать с сотворения мира».

7. Квантовая теория поля

Первые успехи квантовой теории были связаны с количественным описанием простейших атомов, прежде всего атома водорода. Взаимодействие между электронами и протонами ядра при этом представлялось как статическое, что и позволило точно решить задачу для водорода аналитическими методами. Квантовая природа электромагнитного поля, связывающего электроны и протоны, при этом игнорировалась. Между тем, согласно уже самым начальным представлениям квантовой теории, поле дискретно и являет собой суперпозицию фотонов, количество которых при взаимодействии не сохраняется. Фотоны могут поглощаться и испускаться, результатом чего является то, что все состояния атома, помимо основного, имеют конечное время жизни. Если принять это во внимание, то даже проблема простейшего атома предстанет проблемой бесконечного числа взаимодействующих тел. Осознание этого факта дало толчок развитию квантовой теории поля, пионерами которой стали Юлиан Швингер, Ричард Фейнман, Син-Итиро Томонага и Фримен Дайсон. Их успех в построении квантовой электродинамики, задачи с переменным и потенциально неограниченным числом частиц был обязан тому, что при всей новизне эту задачу удалось решить достаточно консервативными математическими средствами, методами возмущений, тем самым лишь минимально выходя за границы уже освоенного.

Построение теории внутриядерных взаимодействий столкнулось с новыми вызовами. По аналогии с электромагнетизмом эти взаимодействия хотелось описать в терминах безмассовых (калибровочно инвариантных) полей, что, однако, не вязалось с тем фактом, что действуют они лишь на очень короткой дистанции, а значит, их переносчики взаимодействий массивны. Увязать калибровочную инвариантность с конечной массой удалось с помощью математических принципов, заимство-

ванных из физики конденсированного состояния, из теории сверхпроводимости. Металлы в сверхпроводящем состоянии обладают свойством выталкивать из себя электромагнитное поле, что эквивалентно приобретению фотоном массы. Филип Андерсон связал появление массы фотона со спонтанным нарушением симметрии основного состояния металла, которое и стоит за феноменом сверхпроводимости. Механизм Хиггса обобщил находку Андерсона на все калибровочные поля, постулировав существование особого бозонного поля, конденсация которого и генерирует массу у переносчиков соответствующих взаимодействий. В итоге рожденная в недрах теории фазовых переходов математическая идея спонтанного нарушения симметрии органически вошла в состав Стандартной модели фундаментальных взаимодействий. Здесь проявилась еще одна черта пифагорейской стратегии – свободная игра с уравнениями, отбор гипотез по их математическим качествам безотносительно к той области, откуда они родом. Удивительной чертой самой природы является то, что эта достаточно простодушная стратегия оказалась исключительно успешной.

Принципиальные идеи квантовой теории поля демонстрируют радикальный разрыв с идеями традиционного атомизма, восходящего к Демокриту и Эпикуру. Если для них материя представлялась собранной из вечных частиц, каждая из которых могла существовать отдельно и сама по себе, то в современной физике многообразие материи раскрывается как порождение субстанционального единства, выраженного единством ее атемпоральных законов, а не материальных «атомов». На смену последним пришли элементарные частицы, которые распадаются, соединяются, превращаются друг в друга как проявления пронизывающего Вселенную единого поля.

8. Сумасшедший рационализм физики

Предложенный очерк истории математической физики иллюстрирует особенный характер поиска «аксиом природы», заданный той же пифагорейской верой, которая внушала надежду на возможность математического познания мира и вдохновляла на этот поиск. Обобщая, можно сказать, что точки роста физической теории задавались тем или иным противоречием, остро ощущаемым теми, кто не только нес в себе эту веру, но и был еще математически одарен и образован.

Это могло быть противоречие между обилием эмпирического материала и отсутствием хорошей (в пифагорейском смысле) теории, его схватывающей, или противоречие между сложившейся теорией и новыми фактами, в нее не укладывающимися, или между сложившимися и складывающимися теориями.

Следом за выходом на такого рода противоречие начинался поиск гипотезы, которая так или иначе сняла бы его. От гипотезы требовалась математическая элегантность, т. е. принципиальная простота, симметрии, инвариантности, достаточная универсальность, широта охвата, плюс при всей новизне у нее должен быть определенный консонанс с уже принятыми теориями. В соответствующих предельных случаях результаты новой гипотезы должны сами собой переходить в выводы хороших старых теорий. Разумеется, гипотеза должна быть адекватной тем фактам, ради охвата которых ее и ищут, когда теорий либо нет вообще, либо они есть, но терпят фиаско. Только такая гипотеза, пифагорейски-хорошая, всему сказанному удовлетворяющая, может вообще претендовать на внимание как кандидат на принимаемую теорию.

Поиск такой хорошей теории совершался теми средствами, которые мы, вслед за Марком Штайнером [24], называем пифагорейскими и которые мы охарактеризовали как свободную игру в математические аналогии, аллюзии и аллегории. Эта игра ведется математической интуицией, вкусом и фантазией участников. В ней нет жестких формальных правил, нет строгой логики, в ней можно многое, чего в установившейся нормальной науке нельзя, но что она впоследствии наследует вместе с правилами обхода опасностей или их устранением. Можно, например, допускать сразу существование и несуществование эфира. Можно считать электроны одновременно локальными и нелокальными сущностями, частицами и волнами. Можно «заметать под ковер» математические расходимости. Можно извлекать квадратные корни хоть из отрицательных чисел, хоть из операторов дифференцирования, допускать любые виданные и невиданные математические структуры как фундаментальные. Можно всерьез утверждать, что кот одновременно жив-здоров и мертв. Можно играючи идти на многое, смело шутя со здравым смыслом, оставляя странности, загадки и парадоксы «на потом», – все вольности оправдаются желанной гипотезой, будь лишь эта сумасшедшая красота найденной [22]. «Мы все согласились, что ваша теория безумна [crazy]. Вопрос, что нас разделяет – достаточно ли она безумна, чтобы иметь шанс быть верной [to be correct]», – заметил Нильс Бор Вольфгангу Паули после выступления последнего [14].

Стремясь к познанию божественного плана Вселенной, основоположники физики полагались одновременно и на строгую математическую красоту плана, и на его граничащее с непостижимым «безумие». Именно такой, пифагорейской, стратегии обязана своим немислимым успехом рациональнейшая из наук о природе – математическая физика. Тайна эффективности этого образа мышления, согласимся с Юджином Вигнером, сокрыта [26]. Но большой, долгосрочный успех этой антропоцентричной

стратегии свидетельствует о ее адекватности; подобного же рода успехов в истории немного.

Благодарность. Авторы признательны Льву Бурову за полезные обсуждения.

Acknowledgement. We are thankful to Lev Burov for useful discussions.

Литература

1. *Арнольд В.И.* Недооцененный Пуанкаре // Успехи математических наук. – 2006. – Т. 61, вып. 1. – С. 3–24.
2. *Буров А., Цвеллик А.* Пифагорейский аргумент разумного замысла Вселенной и его критика. Статья 1: Двойная структура пифагорейского аргумента // Идеи и идеалы. – 2023. – Т. 15, № 3, ч. 2. – С. 290–313.
3. *Грозин А.Г.* История квантовой механики. Видеокурс. – 2018. – URL: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x34Fh8mJgYPvzCBqoygFjqfs> (дата обращения: 22.11.2023).
4. *Дмитриев И.С.* Неизвестный Ньютон: силуэт на фоне эпохи. – СПб.: Алетейя, 1999. – 784 с.
5. *Лозунов А.А., Мествиришвили М.А., Петров В.А.* Как были открыты уравнения Гильберта – Эйнштейна? // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 6. – С. 663–678.
6. *Пуанкаре А.* О науке. – М.: Наука, 1983. – 560 с.
7. *Фридман А.А.* Мир как пространство и время. – 2-е изд. – М.: Наука, 1965. – С. 100–101.
8. *Шаниро И.С.* К истории открытия уравнений Максвелла // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108, № 2. – С. 319–333.
9. *Bersanelli M., Gargantini M.* From Galileo to Gell-Mann. – West Conshohoken, PA: Templeton Press, 2009. – 320 p.
10. *Boglyubov N.N., jr. (originator).* Perturbation theory // Encyclopedia of Mathematics. – URL: https://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Perturbation_theory&oldid=11676 (accessed: 22.11.2023).
11. *Darrigol O.* From c-Numbers to q-Numbers. – Berkeley; Los Angeles: University of California Press, 1992. – 388 p.
12. *Darrigol O.* Relativity Principles and Theories from Galileo to Einstein. – Oxford: Oxford University Press, 2022. – 482 p.
13. *Dirac P.A.M.* The Fundamental Equations of Quantum Mechanics // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1926 – Vol. 109 (752). – P. 642–653.
14. *Dyson F.* Innovation in Physics // Scientific American. – 1958. – Vol. 199 (3). – P. 74–82.
15. *Faraday M.* Lecture notes of 1858 // Jones B. The Life and Letters of Faraday. Vol. 2. – 2nd ed., rev. – London: Longmans, Green and Co., 1870. – P. 404.

16. *Ferguson K.* The Music of Pythagoras. – New York: Bloomsbury Publishing, 2011. – 384 p.
17. *Feynman R.* The Character of Physical Law. – Cambridge, MA: MIT Press, 1965. – 173 p.
18. *Gowers T.* Is mathematics discovered or invented? // *Meaning in Mathematics* / ed. by J. Polkinghorne. – New York: Oxford University Press, 2011. – P. 3–12.
19. *Heisenberg W.* The Meaning of Beauty in the Exact Sciences // Heisenberg W. *Across the Frontier* / transl. from the German by P. Heath. – New York: Harper & Row, 1974. – P. 167.
20. *Jammer M.* Einstein and religion: physics and theology. – Princeton, NJ: Princeton University Press, 1999. – 279 p.
21. Clerk Maxwell J. Inauguration talk at the Marischal College, 1856. <https://christianscholars.com/james-clerk-maxwell-a-model-for-twenty-first-century-physics-in-the-christian-liberal-arts/> (accessed: 22.11.2023).
22. *Penrose R.* Fashion, Faith, and Fantasy in the New Physics of the Universe. – Princeton University Press, 2016. – 501 p.
23. *Snow C.P.* The Two Cultures: And a Second Look: An Expanded Version of The Two Cultures and the Scientific Revolution. – Cambridge University Press, 1962. – 107 p. – Рус. пер. исходного эссе Сноу: <http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/ECCE/SNOW/TWOCULT.HTM>.
24. *Steiner M.* The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 1998. – 215 p.
25. *Wagner R., Briggs A.* The Penultimate Curiosity. – Oxford: Oxford University Press, 2016. – 468 p.
26. *Wigner E.* Unreasonable effectiveness of mathematics in natural science // *Communications on Pure and Applied Mathematics*. – 1960. – Vol. 13 (1). – P. 1–14. – Рус. пер.: Вигнер Е. Непостижимая эффективность математики в естественных науках. УФН, 1968, т. 93, с. 535–546.
27. *Wilczek F.* A Beautiful Question: Finding Nature's Deep Design. – New York: Penguin Press, 2015. – Рус. пер.: Вильчек Ф. Красота физики: постигая устройство природы (Альпина, 2016).

References

1. Arnol'd V.I. Nedootsenennyĭ Puankare [Forgotten and neglected theories of Poincaré]. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Russian Mathematical Surveys*, 2006, vol. 61, iss. 1, pp. 3–24. (In Russian).
2. Бузов А., Цвеллик А. Пифагорейский аргумент разумного замысла Вселенной и его критика. Ст'яга 1: Dvojnaya struktura pifagoreiskogo argumenta [The Pythagorean Argument of the Intelligent Design of the Universe and Its Critique. Part I: Dual Structure of the Pythagorean Argument]. *Idei i idealy = Ideas and Ideals*, 2023, vol. 15, iss. 3, pt. 2, pp. 290–313.

3. Grozin A.G. *Istoriya kvantovoi mekhaniki. Videokurs* [History of Quantum Mechanics. Series of video]. 2018. Available at: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x34Fh8mJgYPvzCBqoygFjqfs> (accessed 22.11.2023).
4. Dmitriev I.S. *Neizvestnyi N'yuton: siluet na fone epokhi* [Unknown Newton: a silhouette on the epoch's background]. St. Petersburg, Aleteiya Publ., 1999. 784 p.
5. Logunov A.A., Mestvirishvili M.A., Petrov V.A. Kak byli otkryty uravneniya Gil'berta-Einsteina? [How were the Hilbert – Einstein equations discovered?]. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Russian Mathematical Surveys*, 2004, vol. 174, no. 6, pp. 663–678. (In Russian).
6. Poincaré H. *O nauke* [About science]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 560 p. (In Russian).
7. Fridman A.A. *Mir kak prostranstvo i vremya* [The world as space and time]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 100–101.
8. Shapiro I.S. K istorii otkrytiya uravnenii Maksvella. [On the history of the discovery of the Maxwell equations]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Soviet Physics Uspekhi*, 1972, vol. 108, no. 2, pp. 319–333. (In Russian).
9. Bersanelli M., Gargantini M. *From Galileo to Gell-Mann*. West Conshohoken, PA, Templeton Press, 2009. 320 p.
10. Boglyubov N.N., jr. (originator). Perturbation theory. *Encyclopedia of Mathematics*. Available at: https://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Perturbation_theory&oldid=11676 (accessed 22.11.2023).
11. Darrigol O. *From c-Numbers to q-Numbers*. Berkeley, Los Angeles, University of California Press, 1992. 388 p.
12. Darrigol O. *Relativity Principles and Theories from Galileo to Einstein*. Oxford, Oxford University Press, 2022. 482 p.
13. Dirac P.A.M. The Fundamental Equations of Quantum Mechanics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1926, vol. 109 (752), pp. 642–653.
14. Dyson F. Innovation in Physics. *Scientific American*, 1958, vol. 199 (3), pp. 74–82.
15. Faraday M. Lecture notes of 1858. Jones B. *The Life and Letters of Faraday*. Vol. 2. 2nd ed., rev. London, Longmans, Green and Co., 1870, p. 404.
16. Ferguson K. *The Music of Pythagoras*. New York, Bloomsbury Publishing, 2011. 384 p.
17. Feynman R. *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA, MIT Press, 1965. 173 p.
18. Gowers T. Is mathematics discovered or invented? *Meaning in Mathematics*. Ed. by J. Polkinghorne. New York, Oxford University Press, 2011, pp. 3–12.
19. Heisenberg W. The Meaning of Beauty in the Exact Sciences. Heisenberg W. *Across the Frontier*. New York, Harper & Row, 1974, p. 167.
20. Jammer M. *Einstein and religion: physics and theology*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1999. 279 p.
21. Clerk Maxwell J. *Inauguration talk at the Marischal College*. 1856. <https://christian-scholars.com/james-clerk-maxwell-a-model-for-twenty-first-century-physics-in-the-christian-liberal-arts/> (accessed 22.11.2023).

22. Penrose R. *Fashion, Faith, and Fantasy in the New Physics of the Universe*. Princeton University Press, 2016. 501 p.
23. Snow C.P. *The Two Cultures: And a Second Look: An Expanded Version of The Two Cultures and the Scientific Revolution*. Cambridge University Press, 1962. 107 p.
24. Steiner M. *The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1998. 215 p.
25. Wagner R., Briggs A. *The Penultimate Curiosity*. Oxford, Oxford University Press, 2016. 468 p.
26. Wigner E. Unreasonable effectiveness of mathematics in natural science. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1960, vol. 13 (1), pp. 1–14.
27. Wilczek F. *A Beautiful Question: Finding Nature's Deep Design*. New York, Penguin Press, 2015.

Статья поступила в редакцию 09.05.2023.

Статья прошла рецензирование 19.05.2023.

The article was received on 09.05.2023.

The article was reviewed on 19.05.2023.