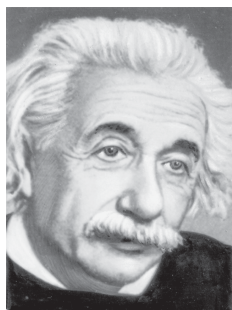


# ІСТОРІЯ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ

Ю.А. Храмов

## А. Эйнштейн и новая научная картина мира

*Показаны трудности, возникшие в классической физике в конце XIX — начале XX в., поиски путей их разрешения, выдающаяся роль А.Эйнштейна как создателя специальной и общей теорий относительности в их преодолении, построении новой — релятивистской — картины мира вместо механической и электродинамической.*



Годы 1895—1904 были этапными в переходе к новой физике — физике XX в., фундамент которой заложили теория относительности и квантовая теория. Начало ее можно отнести к 1905 г., когда А. Эйнштейн разработал третью после механики Ньютона и электродинамики Максвелла великую физическую теорию — специальную теорию относительности — и "изобретенными" им квантами света дал мощный толчок развитию квантовой теории. При этом переход от классической физики к современной характеризовался не только возникновением новых идей, концепций и понятий, но и новыми способами мышления, новым языком формул, изменением ее духа в целом [1].

Этот переход начинается с создания специальной теории относительности, которая своим происхождением обязана фундаментальному противоречию, существующему между электродинамикой Максвелла—Лоренца и классической механикой.

Дело в том, что уравнения электродинамики не удовлетворяют галилеевский принцип относительности классической механики, иначе говоря, они неинвариантны относительно преобразований Галилея. В электродинамике преимущество отдавалось некоторой системе координат. С ней ассоциировали систему, находящуюся в покое по отношению к эфиру — абстрактной гипотетической среде, лишенной всяких физических свойств, которая служила для фиксации систем отсчета, где справедливы уравнения электродинамики. По теории Максвелла—Лоренца для наблюдателя, движущегося относительно эфира, световые явления должны были бы протекать иначе, чем для неподвижного. Это означало, что изучение этих явлений в движущейся системе координат позволит определить скорость этой системы относительно эфира.

Серьезный удар по мировому эфиру — одному из основных понятий классической физики — нанес опыт, поставленный в 1881 г. А. Майкельсоном, а в 1887 г. им и Э. Морли (опыт Майкельсона—Морли) с целью обнаружить движение Земли относительно эфира или же влияние движения Земли на скорость

распространения света, иными словами, так называемого "эфирного ветра". Как известно, опыт показал отсутствие эфирного ветра при скорости более 5—7 км/час, иначе говоря, засвидетельствовал невозможность обнаружить абсолютное движение в явлениях второго порядка по  $\beta = v/c$ , т.е. поставил под сомнение вопрос о существовании мирового эфира как такового. Отсутствие эфирного ветра зафиксировали и другие опыты, в частности опыт Трутона—Нобла, поставленный в 1903 г. с целью обнаружить момент кручения подвешенного плоского конденсатора под влиянием этого "ветра".

Отрицательный результат всех проведенных опытов свидетельствовал, что никакой наблюдатель, участвующий в поступательном движении в эфире, не может обнаружить это движение, т.е. все наблюдаемые явления "нечувствительны" к движению Земли. А это, в свою очередь, означало, что старый принцип механики — принцип относительности, справедливый для механических процессов, оказывается справедливым также и для электромагнитных. Т.е. принцип относительности, сформулированный еще Г. Галилеем для механических систем как требование независимости законов механики от выбора инерциальной системы отсчета (все механические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах), иначе говоря, как требование неизменности (инвариантности) уравнений механики относительно некоторых преобразований:  $x' = x - vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$  (преобразования Галилея), справедлив и для электромагнитных явлений. А это значит, что основные уравнения электродинамики — уравнения Максвелла — не должны изменять свою форму (должны быть инвариантными) при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Однако, как отмечалось выше, уже

вскоре после создания Дж. Максвеллом теории электромагнитных явлений было обнаружено, что его уравнения неинвариантны относительно галилеевских преобразований.

Иными словами, возникла ситуация, когда надо было или признать существование привилегированной инерциальной системы отсчета (эфира как светоносной среды), или допустить, что переход от одной системы к другой не может быть правильно описан преобразованиями Галилея, справедливыми в механике, а требует введения новых преобразований координат и времени, отличных от галилеевских.

Многие ученые, пытаясь объяснить "отрицательный" результат опыта Майкельсона—Морли в рамках классических теорий, прибегали или к уже известным положениям, или выдвигали новые, не отрываясь от классики. В 1891 г. Дж. Фитцджеральд и вслед за ним в 1892 г. Х. Лоренц для его объяснения предложили гипотезу о сокращении размеров тел вследствие их движения через эфир. Так, согласно Х. Лоренцу, каждое тело, имеющее скорость  $v$  относительно эфира, испытывает сокращение в направлении движения на величину  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , где  $c$  — скорость света; т.е., по Лоренцу, мера длины в движущейся системе отличается от меры длины в покоящейся (эфире). Тогда же он выдвинул другое, не менее парадоксальное утверждение о так называемом "локальном времени" — времени, изменяющемся при переходе от одной системы к другой. Иными словами, обе гипотезы утверждали, что пространство и время в движущихся системах и покоящемся эфире следует измерять по-разному.

Отталкиваясь от своих предположений, Х. Лоренц в 1904 г. установил общие преобразования пространственных координат и времени какого-либо события при переходе от одной системы к другой (преобразования Лоренца):

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; y' = y;$$

$$z' = z; t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где  $x, y, z, t$  и  $x', y', z', t'$  — координаты и время события, измеренные в двух инерциальных системах отсчета,  $v$  — скорость движения одной системы относительно другой [2, с. 67—87]. Следует заметить, что похожие формулы вывели также в 1887 г. В. Фогт и в 1900 г. Дж. Лармор.

Иначе говоря, Х. Лоренц открыл законы, согласно которым измеряемые величины в различных системах при переходе от системы к системе преобразуются друг в друга по определенным правилам. Он доказал также, что предложенные им преобразования оставляют уравнения классической электродинамики (уравнения Максвелла—Лоренца) неизменными, т.е. что последние инвариантны относительно этих преобразований. Однако приверженный к своей теории абсолютно покоящегося эфира, Х. Лоренц не осознал физического смысла установленных им преобразований, не поняв, что они являются отражением справедливости принципа относительности как всеобщего закона, ответственно за этот факт.

"Но я не установил принцип относительности как строгую и универсальную истину, — признался он в 1914 г. — Напротив, А. Пуанкаре получил полную инвариантность уравнений электродинамики и сформулировал "постулат относительности"... [2, с. 193].

Заслуги А. Пуанкаре в этих вопросах отмечал и В. Паули, считавший, что тот заполнил те "формальные пробелы", которые имелись у Х. Лоренца, и высказал принцип относительности "в качестве всеобщего и строгого положения". Л. де Бройль считал, что "в 1904 году, накануне появления решающих работ

Альберта Эйнштейна по теории относительности, Анри Пуанкаре уже владел всеми наиболее существенными элементами этой теории" [3, т. 3, с. 706].

А до этого А. Пуанкаре высказал еще ряд положений, совершенно чуждых классической физике и, более того, подрывающих ее основы. Так, в статье "О принципе относительности пространства и движения" (1902) он писал:

"1. Абсолютного пространства не существует, мы знаем только относительные движения... 2. Не существует абсолютного времени. Утверждение, что два промежутка времени равны, само по себе не имеет смысла, и можно применять его только условно. 3. Мы не способны к непосредственному восприятию не только равенства двух промежутков времени, но и не можем быть уверенными в одновременности двух событий, происходящих в различных местах... 4. Наконец, сама наша евклидова геометрия — лишь своего рода условный язык. Мы могли бы изложить факты механики, относя их к пространству неевклидовому, которое было бы основой менее удобной, но столь же законной, как и наше обыкновенное пространство. Изложение слишком осложнилось бы, но осталось бы возможным. Таким образом, абсолютное пространство, абсолютное время, даже сама геометрия не имеет характера вещей, обуславливающих собой механику... Можно было бы попытаться изложить основные законы механики на языке, не зависящем от всех этих условий. Тогда, без сомнения, можно было бы больше отдать себе отчет в том, что представляют эти законы сами по себе" [2, с. 23].

Не случайно, что А. Пуанкаре был одним из тех трех ученых, включая также Х. Лоренца и А. Эйнштейна, в трудах которых, по словам В. Паули, "были установлены положения и развиты соображения, образующие

фундамент теории относительности" [2, с. 199].

В результате обнаружилось, что окружающий мир намного сложнее, чем его представляли еще десятилетие тому назад. Оказалось, он требует введения новых пространственно-временных представлений — относительности длины, времени, одновременности и исключения из рассмотрения эфира. Микромир, рисовавшийся ученым XIX в. миниатюрной копией макромира с полным качественным отождествлением макро- и микрообъектов и различающихся лишь количественно, оказался полным необъяснимых неожиданностей. Отчетливо проявилась ограниченность представлений физики XIX в. Привычный мир Ньютона, Максвелла и Лоренца стал давать "трещины" по всем направлениям. Причем речь шла не о деталях в физической картине, рушились ее механические и электродинамические основания. Все это дало повод А. Пуанкаре в статье "Настоящее и будущее математической физики" (1904) написать:

"Да, действительно есть признаки серьезного кризиса, как если бы мы находились накануне изменения. Не будем, однако, слишком волноваться. Мы уверены, что большая не умрет, и мы можем даже надеяться, что этот кризис будет спасительным, поскольку история прошлого гарантирует нам это" [2, с. 27].

Правда, правильнее было бы говорить не о кризисных явлениях, происходящих в физике, а о процессах ее обновления, порой революционного характера, готовивших переход к новой, современной физике. Этот переходный этап (1895—1904) к новой физике был этапом крутой ломки многих старых понятий и принципов, когда новейшие открытия как в теории, так и в эксперименте разрушали старые представления о пространстве, времени, материи, в частности, неделимости атомов, неизменности химических

элементов, постоянстве массы, когда подвергались сомнению многие старые принципы и открывались многие новые свойства материального мира. Часть физиков поняла это по-своему, как крах, как регресс. "Исчезает масса, исчезает материя, подрываются основы механики", — восклицали они. В действительности же происходящее свидетельствовало об ограниченности наших знаний о физической реальности, об углублении человеческого познания.

По-разному представлялось ученым и будущее физической науки. Например, А. Пуанкаре видел его таким:

"Мы не можем предвидеть, в каком направлении пойдет развитие. Не исключено, что на первый план выдвинется кинетическая теория газа, которая будет развиваться и послужит моделью для других теорий. Тогда явления, сначала казавшиеся нам простейшими, представлятся в виде результата большого числа элементарных фактов, которые сводятся к одной цели лишь законами случая. Физический закон приобретет тогда совершенно новый аспект; это уже не будет только дифференциальное уравнение, он примет характер статистического закона. Возможно, мы должны создать совершенно новую механику, которую мы лишь смутно представляем, механику, где инерция возрастала бы со скоростью и скорость света являлась бы непреодолимым пределом. Обычная механика, более простая, оставалась бы как первое приближение, справедливое для скоростей не слишком больших, так что новая динамика включала бы старую" [2, с. 43].

Проанализировав подробно физический смысл пространства и времени, А. Эйнштейн допустил, что преобразования Лоренца действительно отражают физическую реальность, значение их выходит за пределы уравнений Максвелла и касается сущности пространства и времени и из

инвариантности уравнений электродинамики относительно этих преобразований (из невозможности обнаружить абсолютное движение) вытекает справедливость принципа относительности, т.е. равноправность всех инерциальных систем отсчета (при этом само понятие эфира оказалось лишним). Иными словами, А. Эйнштейн вслед А. Пуанкаре обобщил механический принцип относительности Галилея на оптические и электромагнитные явления, установив так называемый специальный принцип относительности, выражающий независимость (инвариантность) законов природы относительно преобразований движения.

"Чтобы специальный принцип относительности мог выполняться, — писал А. Эйнштейн, — необходимо, чтобы все уравнения физики не изменяли своего вида при переходе из одной инерциальной системы в другую, если использовать преобразования Лоренца для подсчета этого изменения. Говоря на языке математики, все системы уравнений, выражающие законы физики, должны быть инвариантными относительно преобразований Лоренца. Таким образом, с методологической точки зрения специальный принцип относительности ... дает нам общее условие, которому должны удовлетворять все законы природы" [4, т. 2, с. 101].

Из специального принципа относительности следует, что физические законы должны иметь одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета, т.е. сохранять свой вид и при преобразованиях Лоренца. Это требование получило название релятивистской инвариантности физических законов. Связь между координатами и временем двух движущихся систем отсчета (немеханических) дается уже не преобразованиями Галилея, основанными на понятиях абсолютного пространства и времени, а преобразованиями Лоренца. А это означает, что необходимо отка-

заться от этих, казалось бы, таких естественных постулатов.

Проведя глубокий критический анализ экспериментальных методов измерения пространства и времени, в частности анализ понятия одновременности разноместных событий (еще задолго до А. Эйнштейна ньютоновская концепция дальнего действия потерпела фиаско, в природе не было обнаружено тел, которые передавали бы сигналы мгновенно, без затраты времени), А. Эйнштейн постулировал, что любой сигнал не может распространяться со скоростью, большей скорости света в вакууме, а скорость света в вакууме постоянна и одинакова во всех направлениях (принцип постоянства скорости света). Исходя из этого, А. Эйнштейн показал, что два события, одновременные в одной системе, в другой происходят в разное время, т.е. понятие одновременности, как и понятие измерения времени, становится относительным. Подобные рассуждения распространяются и на измерения пространства. Эти два вышеназванные постулата Эйнштейна и были им положены в основу теории, которую он изложил в 1905 г. в статье "К электродинамике движущихся тел" [4, т.1, с. 7—35].

Теория относительности Эйнштейна (частная, или специальная, СТО) заставила пересмотреть ряд основных положений и понятий механики Ньютона. Она представляла собой новую физическую теорию пространства — времени, так как вводила новые пространственно-временные представления (относительность длины, времени и одновременности), получившие свое отражение в замене преобразований Галилея преобразованиями Лоренца. По словам В.Л. Гинзбурга, "отказ от абсолютного времени является особенно радикальным выводом теории Эйнштейна. По своему значению и трудности этот вывод можно сравнить с отказом от абсолютной неподвижно-

сти Земли, лежащей в основе гелиоцентрической системы Коперника" [5, с. 132].

Специальная теория относительности просто объяснила результаты опытов Физо, Майкельсона — Морли и другие наблюдаемые эффекты. Она дала новые выражения для импульса  $p$  и энергии  $E$ :

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}};$$

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

Исходя из нее, А. Эйнштейн открыл фундаментальный закон — закон взаимосвязи массы и энергии. Он установил, что общий запас энергии тела связан с его массой соотношением:  $E_0 = m_0 c^2$ , где  $E_0$  и  $m_0$  — соответственно энергия и масса покоя тела,  $c$  — скорость света в вакууме, равная 300 000 км/с. А. Эйнштейн писал тогда: "Масса тела есть мерой содержащейся в нем энергии; если энергия изменяется..., то масса меняется соответственно..." [4, т. 1, с. 38].

В результате понятие массы пополнилось новым содержанием. Масса тела, выступавшая в классической физике как мера его инертности или мера гравитационного взаимодействия, теперь выступила в новой форме — меры "энергоемкости" тела. Даже тело, находящееся в покое, имеет энергию покоя. Правда, во многих физических процессах она не принимает участия и представляет собою "пассивную" часть энергии. Процессом, в котором "пассивная" энергия покоя превращается в "активную" энергию движения частиц, является радиоактивный распад. Это соотношение впоследствии легло в основу расчета энергетического баланса ядерных реакций. Особенно важное практическое значение оно приобрело в связи с развитием атомной энергетики.

В теории относительности, как уже видно из преобразований Лоренца,

пространственные координаты и время не могут рассматриваться независимо, измерения пространства и времени взаимосвязаны. Чтобы отобразить математически эту внутреннюю взаимосвязь, в 1908 г. Г. Минковский высказал идею объединения трех измерений пространства и времени в одно четырехмерное "пространство — время". Предложив такое абстрактное пространство-континуум — четырехмерный мир, в котором справедлива псевдоевклидова геометрия, Г. Минковский придал специальной теории относительности завершенную логическую и математическую форму, развил ее современный четырехмерный аппарат. Описание какого-либо процесса в рамках мира Минковского содержит его описание в любой возможной системе отсчета.

Однако специальная теория относительности не отбросила закономерностей, установленных механикой Ньютона, а лишь уточнила и дополнила их на случай движения со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме. Созданная на ее основе релятивистская механика в своем предельном случае (в случае малых скоростей) переходит в ньютоновскую механику.

"Именно... путем последовательных приближений, устраняя внутренние противоречия, — писал Луи де Бройль, — и может развиваться наука. Созданные в процессе ее развития теории не будут полностью опровергнуты и уничтожены последующим развитием науки, а войдут в качестве составных частей в новые, более общие теории... Твердо установленные принципы, надежно проверенные законы, хотя и сохраняются в дальнейшем развитии науки, но уже рассматриваются не как абсолютно точные, а лишь как некоторое приближение, пределы применимости которого определяются новой, более общей теорией" [6, с. 14].

Специальная теория относительности оказала огромное влияние на

сам стиль мышления физиков, революционизировав его. Она показала, что наглядные обычные представления, которые как бы очевидны, в новых областях явлений непригодны. Поэтому хотя по своему содержанию специальная теория относительности и принадлежала к классической физике, завершая ее, однако по духу это была новая великая теория, открывшая наряду с квантовой теорией новый период в развитии физики.

Оценивая значение специальной теории относительности, М. Борн писал: "Родившуюся в 1905 специальную теорию относительности по справедливости можно считать завершающим моментом классического периода или началом новой эры в науке. Ибо, с одной стороны, она исходит из твердо установленных классических понятий о материи, распределенной непрерывно в пространстве и времени, и о каузальных, или, более точно, детерминистических, законах природы. Но, с другой стороны, она вносит революционные представления о пространстве и времени, решительно критикуя традиционные концепции, сформулированные Ньютоном. Таким образом, она открывает новые пути осмысливания естественных явлений. Это в наши дни и представляется наиболее выдающимся подвигом Эйнштейна, отличающим в корне его работу от работ его предшественников, а современную науку — от классической" [7, с. 12].

Подобное высказывание мы находим и у Я.И. Френкеля:

"...теория относительности завершила тот долгий путь, по которому шла классическая физика XX в., закончив эмансипацию последней от мирового эфира и подведя простую рациональную базу под электромагнитную и электронную теории, создание которых является одним из главнейших достижений физики XIX в. Таким образом, теория относительности стоит как бы на рубеже старой

и новой физики, венчая первую и указывая путь второй" [8, с. 147].

Однако ревизия понятий пространства и времени не закончилась с открытием специальной теории относительности. Еще в ньютоновской теории гравитации считалось, что тяготение одинаково действует на различные тела, сообщая им одинаковые ускорения независимо от их массы и природы. Отсюда следовал факт равенства гравитационной и инертной масс, установленный еще Г. Галилеем и подтвержденный в 1889 г. экспериментально, с точностью до  $10^{-9}$  Р. Этвешом ( $m_{ин} = m_{гр}$ ). Иными словами, различные тела движутся в заданном гравитационном поле совершенно одинаково, при условии, что их начальные скорости равны.

Из этого факта, как показал в 1907 г. А. Эйнштейн, следует глубокая аналогия между движением тел в гравитационном поле и их движением в отсутствие тяготения, но в ускоренной системе отсчета, т.е. силы инерции в ускоренной системе отсчета эквивалентны гравитационному полю (эквивалентность гравитации и инерции). Установленный принцип эквивалентности А. Эйнштейн положил в основу новой, релятивистской теории тяготения, разработку которой он завершил в 1915 г. и назвал общей теорией относительности (ОТО). Она установила связь между "пространством — временем" и материей, заключающуюся в том, что материя определяет геометрию пространства — времени.

"Специальная теория относительности, лишив время и пространство свойства абсолютности, сохранила за пространством свойство евклидовости. Общая теория относительности, — отмечал А. И. Ахиезер, — лишила пространство этого свойства. Оно стало благодаря присутствию материи неевклидовым, и его метрика стала зависеть от материи и состояния ее движения. Геометрия как бы слилась с физикой в единое целое" [9, с. 25—26].

В общей теории относительности пространство — время не плоское, а искривленное, поэтому к нему применим математический аппарат неевклидовой геометрии. Используя тензорное исчисление и введя метрический тензор  $g_{ik}$ , А. Эйнштейн определил геометрию пространства — времени (что эквивалентно нахождению гравитационного поля), записав уравнения тяготения:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

(уравнения Эйнштейна).

Здесь  $R_{ik}$  — тензор Риччи;  $R = R_{ii}g_{ii}$ ;  $T_{ik}$  — тензор энергии — импульса материи. Уравнения Эйнштейна связывают  $g_{ik}$  с величинами, характеризующими материю, создающую поле тяготения.

Общая теория относительности обусловила развитие космологии. В 1922 г. А.А. Фридман получил нестационарные решения гравитационного уравнения Эйнштейна, исходя из которых допустил возможность существования нестационарной, расширяющейся Вселенной, что было подтвер-

ждено в 1929 г. открытием явления разбегания галактик (Э. Хаббл).

Оценивая значение теории относительности, В. Вайскопф писал:

"Среди колоссального количества идей, выдвинутых в то время, особое место, отличное от других, принадлежит теории относительности, специальной и общей... Это — совершенно новый набор концепций, в рамках которых находят объединение механика, электродинамика и гравитация. Они принесли с собой новое восприятие таких понятий, как пространство и время. Эта совокупность идей в каком-то смысле является вершиной и синтезом физики XIX в. Они органически связаны с классическими традициями" [10].

Результаты, полученные теорией относительности (специальной и общей), имеют не только общенаучное, но и общеполитическое значение. Они обогащают наше представление о мире, наносят удар по метафизическим взглядам. На базе идей, результатов и выводов теории относительности возникла релятивистская картина мира, заменившая механическую и электродинамическую картины.

1. Ахиезер А.И., Белозоров Д.П., Спольник З.А. Альберт Эйнштейн: становление современной физики, новое мышление. I // Наука и науковедение. — 2000. — № 1—2. — С. 45—62.
2. Принцип относительности. — М.: Атомиздат, 1973.
3. Пуанкаре А. Избранные труды. — М.: Наука, 1971—1974. — 3 т.
4. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965—1967. — 4 т.
5. Гинзбург В.Л. Как и кто создал теорию относительности // Вопросы философии. — 1974. — № 8. — С. 125—140.
6. Бройль Л. де. Революция в физике. — 2-е изд. — М.: Атомиздат, 1965.
7. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. — 2-е изд. — М.: Мир, 1972.
8. Френкель Я.И. На заре новой физики. — Л.: Наука, 1970.
9. Ахиезер О.И. Еволюція фізичної картини світу. — К.: Наук. думка, 1973.
10. Вайскопф В. Физика в XX столетии. — М.: Атомиздат, 1977.

Одержано 16.09.2005

Ю.О.Храмов

### А.Ейнштейн й нова наукова картина світу

*Показано труднощі, які виникли в класичній фізиці наприкінці XIX — на початку XX ст., пошуки шляхів їх вирішення, видатну роль А.Ейнштейна як творця спеціальної та загальної теорій відносності у їх переборенні, побудові нової — релятивістської — картини світу замість механічної й електродинамічної.*