УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА



В.С. Окунев

НА ПУТИ К ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

В.С. Окунев

На пути к теории относительности

Учебное пособие

Под редакцией А.Н. Морозова

BAUMANPRESS
Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2025

УДК 539.16
ББК 22.38
О-52

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8485/

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия

Рецензенты:
д-р физ.-мат. наук проф. *Н.В. Щукин*,
канд. физ.-мат. наук *А.А. Семенов*

Окунев, В. С.

О-52 На пути к теории относительности : учебное пособие / В. С. Окунев; под ред. А. Н. Морозова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. — 107, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6594-1

Представлен исторический обзор создания теории относительности. Рассмотрены выводы преобразований Лоренца, энергия и импульс релятивистской частицы. Приведена краткая история создания специальной и общей теории относительности.

Для студентов вузов, изучающих курс общей физики. Может быть использовано как основной или дополнительный материал к лекциям.

УДК 539.16
ББК 22.38

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025

ISBN 978-5-7038-6594-1

Предисловие

В МГТУ им. Н.Э. Баумана курс общей физики рассчитан на три семестра и состоит из шести модулей. В рамках первого модуля «Физические основы механики» рассматривается тема «Элементы релятивистской механики». Для изучения этой темы выделены две лекции и одно семинарское занятие. Кроме многократно переиздаваемого учебника И.Е. Иродова (НИЯУ МИФИ), студентам рекомендуются учебные пособия МГТУ им. Н.Э. Баумана, отражающие специфику подготовки кадров в нашем Университете.

Основная цель учебного пособия заключается в конкретизации материала лекций по релятивистской механике.

Заметим, что традиционные специальности МГТУ им. Н.Э. Баумана ориентированы на проектирование и эксплуатацию систем, перемещающихся на высоких скоростях. Это в первую очередь ракетно-космическая техника. Казалось бы, релятивистской механике в курсе общей физики не уделяется особого внимания, но перемещения даже с третьей космической скоростью (около 16,65 км/с) не требуют учета релятивистской поправки. И орбитальная станция, и аппараты, направленные в дальний космос, подвергаются ударному воздействию космической пыли, метеоров и метеоритов самых разных размеров. Средняя скорость, с которой обломки астероидов сталкиваются с поверхностью Земли — около 20 км/с, максимальная — 72 км/с. Частоту падений на Землю космической пыли с характерным размером частиц от нескольких молекул до 0,2 мкм оценивают в 25...40 тыс. т в год, объектов массой от 1 г до 1 кг — 500 штук в год. Расчет массы таких объектов также не требует учета релятивистской поправки.

Релятивистские эффекты изменения времени заметны в расчетах спутниковых глобальных систем позиционирования: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Евросоюз), Compass (Китай). Принцип работы таких систем основан на определении местоположения путем измерения моментов времени приема синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной потребителя. Для определения трехмерных координат необходимо найти разность моментов приема сигнала потребителем и момента его синхронного излучения от спутников. В МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется подготовка специалистов в этой области. Так, одна из задач передовой инженерной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Системная инженерия ракетно-космической техники» — создание новейших видов высокотехнологичной продукции. Школа работает в рамках Федерального проекта, созданного в 2022 г. (на период с 2022 по 2030 г.) по инициативе Минобрнауки РФ, направленного на подготовку квалифицированных инженерных кадров для высокотехнологичных отраслей экономики.

Для представителей некоторых специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана, связанных с ядерной и плазменной техникой, материаловедением, химией и химической технологией материалов, изучающих физические и химические свойства самых разных веществ, более глубокое знание теории относитель-

ности не будет лишним. Это связано, главным образом, с релятивистским увеличением массы атомных электронов, ведущей к повышению вероятности электронного захвата для тяжелых атомных ядер, отражающейся на физических свойствах этих ядер; с заметным изменением химических свойств тяжелых и сверхтяжелых элементов. В этих областях знаний релятивистские поправки могут играть определяющую роль в свойствах материалов.

Традиционно тема «Элементы релятивистской механики» ограничивается основами специальной теории относительности. Студенты изучают постулаты Эйнштейна, преобразования Лоренца, кинематические следствия преобразований Лоренца, релятивистский закон сложения скоростей, преобразования скорости, понятие интервала событий, элементы релятивистской динамики, взаимосвязь массы и энергии, связь между импульсом и энергией релятивистской частицы, основное уравнение релятивистской динамики, преобразование частоты. Эти вопросы можно считать основными. Остальные вопросы, оставшиеся за пределами курса общей физики по причине ограниченности времени на изучение предмета, можно считать второстепенными, хотя они не менее важны.

В настоящем учебном пособии рассматриваются предпосылки и краткая история создания теории относительности, некоторые отдельные вопросы специальной теории относительности (релятивистской кинематики и динамики), общей теории относительности, условно отнесенные к второстепенным, не представляющим интерес для студентов. Эти вопросы отчасти дополняют материал, изложенный в некоторых рекомендуемых в пособии книгах, и не повторяют его.

Учебное пособие предназначено для студентов всех специальностей, изучающих физические основы механики. Его можно рассматривать как дополнительную литературу по курсу физики.

Пособие направлено на формирование собственных универсальных компетенций студента. Студент должен научиться осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, ее смысловую оптимизацию и наглядное представление, применять системный подход для решения поставленных задач; использовать основы философских знаний для формирования мировоззрения и гражданской позиции. Пособие также направлено на формирование собственных общепрофессиональных компетенций студента. Студент должен быть способен представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики; ставить и решать инженерные и научно-технические задачи в своей профессиональной деятельности и новых междисциплинарных направлений с использованием естественнонаучных и математических моделей.

В заключение можно дать некоторые рекомендации по дальнейшему самостоятельному изучению предмета. В первую очередь следует изучить основную и дополнительную литературу, список которой приведен в конце пособия. Для детального изучения предмета следует ознакомиться с работами, приведенными в подстрочных ссылках. Основные труды ученых XIX, XX

и XXI столетий доступны по интернет-ссылкам, приведенным в подстрочных ссылках на литературу.

При самостоятельной подготовке студентам следует руководствоваться методическими указаниями по освоению дисциплины.

Автор выражает искреннюю благодарность заведующему кафедрой физики МГТУ им. Н.Э. Баумана доктору физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН А.Н. Морозову за многогранную поддержку; рецензентам пособия доктору физ.-мат. наук проф. Н.В. Щукину и канд. физ.-мат. наук А.А. Семенову (НИЯУ МИФИ) за внимание и доброжелательное отношение; канд. техн. наук священнику Петропавловского храма в Лыткарине протоиерею А.И. Круглову за духовную поддержку.

Введение

На рубеже XIX и XX вв. начала формироваться новая, неклассическая, физика: релятивистская, квантовая, ядерная (хотя об атомных ядрах еще ничего не знали). До этого в физике господствовал механистический подход. Он был единственным. Физика была проста и наглядна. Но вдруг все изменилось настолько быстро, что новые теории современники стали считать академическими, далекими от практического использования.

В 1942 г. в «Биографических воспоминаниях членов Королевского общества» английский астрофизик Артур Стэнли Эддингтон писал: «Классическая физика действительно подошла к концу. Из тех, кто все же сумел добиться существенного прогресса на этом трудном этапе — кто, наконец, довел классическую физику до того момента, когда новые методы стали неизбежными — два имени особенно выделяются: Лоренц и Лармор. В их работе было много общего, поэтому иногда трудно оценить их вклад по отдельности. Репутация Лармора, возможно, была в тени репутации Лоренца. Но, по любым оценкам, достижения Лармора высоки; и его место в науке прочно, как того, кто заново зажег тлеющие угли старой физики, чтобы подготовить появление новой»[1].

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований в Дубне Алексей Алексеевич Тяпкин и его менее известный коллега кандидат физико-математических наук Анатолий Сергеевич Шибанов на сраницах монографии, посвященной французскому ученому Жюлю Анри Пуанкаре, пишут: «В самом конце XIX века были уже найдены новые преобразования пространственно-временны́х координат, составляющие основу будущей физической теории — теории относительности, были получены также самые необычные следствия этой теории о сокращении длин отрезков и расширении временны́х интервалов. В работах Лоренца и Лармора контуры новой теории, связанной с революционным преобразованием всей физики, проступали весьма отчетливо. Но на их работы не было обращено должного внимания даже теми учеными, которые интересовались проблемами электродинамики движущихся тел. Да и сами авторы не придавали полученным результатам особого значения и не делали категорических выводов о преодолении кризиса в физике»[1].

Известно, что опыт — единственный источник истины. Однако проведение некоторых опытов стало проблематичным и часто невозможным. Так, при изучении движения тел на высоких скоростях, близких к скорости света, обычные механические часы оказались непригодными. Не было ясно, какие изменения в законы механики вносит гипотеза Лоренца о сокращении длины. Потребовалось проводить мысленные эксперименты с гипотетическими световыми часами.

---

[1] *Arthur Stanley Eddington*. Joseph Larmor, 1857—1942 // Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 1942. Vol. 4. Iss. 11. https://doi.org/10.1098/rsbm.1942.0016

Стало ясно, что одних наблюдений недостаточно; ими надо пользоваться, а для этого необходимо их обобщать. У Пуанкаре есть замечательная книга по этому вопросу под названием «Наука и гипотеза». В то же время ответить на некоторые вопросы может только опыт. Этому посвящена другая книга того же ученого — «Ценность науки».

Специальная, или частная, теория относительности была в основном завершена к 1904–1905 гг. Эта теория описывает движение, законы механики и пространственно-временны́е отношения при произвольных скоростях движения, в том числе близких к скорости света. Теория основана на геометрии четырехмерного пространства-времени и плоском (не искривленном) пространстве. Новая теория овладевала умами ученых не сразу, в основном в течение 10 лет. Так, в 1908 г. уже были известны результаты экспериментов, подтверждающих формулу Пуанкаре $E = mc^2$, полученную им в 1900 г., известную в наше время как формула Эйнштейна, устанавливающую эквивалентность массы и энергии, но в корректности этих экспериментов были сомнения, развеянные лишь в 1915 г.

Созданию теории относительности предшествовали труды многих ученых. Основной вклад в ее формулировку внес французский ученый Анри Пуанкаре в период с 1893 по 1906 г., большой вклад в ее создание внес нидерландский физик Хендрик Антон Лоренц. Физик-теоретик Альберт Эйнштейн предложил для новой теории эффектное название — теория относительности. Его первая статья по теории относительности (1905) была опубликована позже публикации основных работ Лоренца и Пуанкаре по этой тематике. Заметим, что до 1897 г. Лоренц и Пуанкаре не были знакомы лично и работали независимо друг от друга. В 1897 г. Лоренц впервые посетил съезд немецких естествоиспытателей и врачей, проходивший в Дюссельдорфе, и с тех пор стал постоянным участником крупных научных конференций. Он познакомился с такими известными европейскими физиками, как Людвиг Больцман, Вильгельм Вин, Анри Пуанкаре, Макс Планк, Вильгельм Рентген и др.

Началом зарождения теории относительности можно считать декабрь 1893 г., когда Лондонскому королевскому обществу была представлена статья ирландского физика-теоретика и математика сэра Джозефа Лармора «Динамическая теория электрической и светоносной среды»[2]. Эйнштейну было 14 лет... Странно это: про Лармора почти забыли, его имя практически невозможно найти в современных учебниках по физике, о его крупнейших научных достижениях не известно не только студентам, но и профессиональным физикам, а об Эйнштейне все помнят.

Работы Лармора относятся к электродинамике движущихся тел, термодинамике, магнетизму, изучению структуры атома, математической физике. Наряду с Лоренцем он принимал участие в разработке электронной теории. Его монография «Эфир и материя» (Кембридж, 1900) сыграла значительную

[2] Proceedings of Royal Society, 7 dec., 1893, t. LIV, p. 438.

роль в развитии электродинамики. Работы Лармора хотя и уходят корнями в классическую физику, в конечном итоге способствовали ее пересмотру, возникновению теории относительности и квантовой механики.

Именно Лармор первым опубликовал (1900) в законченном виде релятивистские преобразования пространства и времени, относительно которых уравнения Максвелла сохраняют свой вид, а также релятивистскую формулу сложения скоростей. Впоследствии, по предложению Пуанкаре, эти формулы получили название «преобразования Лоренца» (Лоренц ранее опубликовал неточный, приближенный вариант этих преобразований); они позволили Пуанкаре, а затем Эйнштейну обосновать универсальный принцип относительности, охватывающий также и электромагнитные явления.

Свои первые впечатления от теории Лармора Пуанкаре в 1895 г. выразил словами: «Со временем все же потребуется как-то изменить наши представления и выйти за рамки, в которые мы стараемся заключить оптические и электрические явления. Но если даже мы ограничимся чисто оптическими эффектами, все, что было сказано до сих пор для объяснения частичного увлечения волн, не является вполне удовлетворительным. Опыт дал множество фактов, которые допускают следующее обобщение: невозможно обнаружить абсолютное движение материи, или, точнее, относительное движение весомой материи и эфира. Все, что можно сделать, — это выявить движение весомой материи относительно весомой материи».

Труды Лоренца были основаны на концепции существования эфира, труды Пуанкаре предполагали возможность отсутствия эфира. В этом случае эфир можно было заменить дополнительным постулатом теории. Эйнштейн вообще исключил эфир из рассмотрения, опираясь на дополнительный постулат Пуанкаре об инвариантности скорости света, полагавший, что скорость света одинакова для всех наблюдателей.

В 1905 г. Эйнштейн пишет: «Введение “светоносного эфира” окажется при этом излишним», в 1915 г. — «...следует отказаться от введения понятия эфира, который превратился лишь в бесполезный довесок к теории», в 1920 г. — «Согласно общей теории относительности, пространство немыслимо без эфира». Но об этом позже.

В 1900 г. Лоренц попытался объяснить гравитацию на основе уравнений Максвелла[3]. Лоренц полагал, что неэлектромагнитные силы (если они существуют) преобразуются так же, как электромагнитные. Однако Лоренц ошибся в формуле для плотности заряда и тока. В 1905 г. Пуанкаре исправил эти ошибки и включил в теорию неэлектромагнитные силы, в том числе гравитацию. Многие аспекты теории Лоренца вошли в специальную и общую теории относительности в работах Эйнштейна и Минковского. Общая теория относительности Эйнштейна «искусно ассимилировала определенные элементы программы Нордстрёма, равно как и разумные предположения программы Абрахама». (Гуннар Нордстрём — финский физик-теоретик, оппонент

[3] *Lorentz H.A.* Considerations on Gravitation // Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1900. Vol. 2. Pp. 559–574.

Эйнштейна. Теория Нордстрёма — одна из первых попыток создать релятивистскую теорию тяготения. Макс Абрахам — немецкий физик-теоретик. В 1912 г. Абрахам предложил теорию гравитации, обобщающую ньютоновскую, но не учитывающую принцип эквивалентности сил гравитации и инерции.)

«Величайший математик всех времен», Пуанкаре покинул наш мир в 1912 г., так и не дождавшись массового признания новой теории большинством ученых. Возможно, именно поэтому за создание теории относительности никому так и не была присуждена Нобелевская премия.

«Теория относительности, открытая в 1904 году, была признана научным сообществом, начиная с 1915 года. Никакая Нобелевская премия никогда за эту теорию присуждена не была. Причина понятна: тот, кто первым сформулировал принцип относительности, умер в 1912 г. Это был Анри Пуанкаре».

Лоренц пишет: «Я не установил принципа относительности, как строго и универсально справедливого. Пуанкаре, напротив, получил полную инвариантность и сформулировал принцип относительности — понятие, которое он же первым и использовал».

О заслугах Пуанкаре в создании теории относительности можно судить по множеству опубликованных им и о нем работ[4, 5].

На Нобелевскую премию по физике за создание теории относительности Эйнштейна многократно, но безрезультатно номинировали с 1910 по 1922 г. (за исключением 1911 и 1915 гг.). Он получил желанную премию лишь в 1922 г. «за заслуги в области теоретической физики и, в особенности, за открытие фотоэффекта».

Лоренц был удостоен Нобелевской премии по физике в 1902 г. (совместно с нидерландским физиком Питером Зееманом) «в знак признания исключительных услуг, которые они оказали науке своими исследованиями влияния магнетизма на явления излучения».

---

[4] *Poincaré H.* La théorie de Lorentz et le principe de réaction // Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles. 1900. Vol. 5. Pp. 252–278.

[5] *Маршаль К.* Решающий вклад Анри Пуанкаре в специальную теорию относительности // пер. с англ. Протвино: Изд-во ГНЦ РФ ИФВЭ, 1999. 12 с.