

3. В. Гайтлер. Квантовая теория излучения. М.: ИЛ, 1956.
4. А. Ф. Иоффе. К 5-летию со дня смерти А. Эйнштейна // УФН. 1960. Т. 71. С.3-7.
5. У. М. Кляус. Физика и реальность у Эйнштейна. М.: Наука, 1965. С. 321-348.
6. А. Эйнштейн. Испускание и поглощение по квантовой теории: Собр. научных трудов. Т. 3. М., 1966. С. 386; К квантовой теории излучения. Там же. С. 393.
7. А. М. Френк. Оптика движущихся тел. М., 1972.
8. В. Л. Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. М., 1975.
9. А. Ф. Иоффе. О физике и физиках. Л.: Наука, 1977. С. 224-230.
10. И. М. Франк. Эйнштейн и оптика // УФН. 1979. Т.129. Вып. 4.
11. Е. Н. Бутиков. Оптика: Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1986. 512 с.

*Анатолий Александрович КИСЛИЦЫН –
профессор кафедры механики многофазных
систем, доктор физико-математических
наук, декан физического факультета*

УДК 530.12

КОНЦЕПЦИЯ И СОДЕРЖАНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНОГО КУРСА «ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ» ДЛЯ СТУДЕНТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

АННОТАЦИЯ. Обсуждается методика преподавания основ теории относительности на младших курсах физического факультета. Подробно описан факультативный курс «Теория относительности», читаемый автором в 4 семестре для студентов специальности «Физика».

The author offers several approaches to teach the course «Introduction into Einstein's Theory of Relativity» for the first- and second-year students of Physical Sciences Faculty that he delivers during the fourth term to the students who specialize in «Physics».

Создание теории относительности явилось одним из важнейших достижений физики XX в. В связи с отмечаемым в 2005 г. 100-летием этой теории, представляется уместным обсудить некоторые вопросы, связанные с преподаванием теории относительности в вузах.

В современных учебных программах теория относительности разбита на несколько частей и распределена понемногу почти по всем разделам общей физики: «механика», «электричество и магнетизм», «оптика», «физика атома, атомного ядра и частиц». В каждом из разделов материал, относящийся к теории относительности, занимает небольшой объем, и часто ему не уделяется должного внимания. Опыт преподавания показывает, что освоить его удастся только самым сильным студентам, причем, в основном, за счет дополнительных занятий. В то же время этот материал очень важен как с точки зрения дальнейшего изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, так и для формирования у студентов современного научного мировоззрения. Поэтому представляется весьма

полезным ввести в курс общей физики (хотя бы факультативно) такой раздел, в котором были бы систематически изложены основы специальной теории относительности и некоторые представления общей теории относительности. Автор данной статьи читает такой курс на физическом факультете ТюмГУ в 4-м семестре.

Физика – экспериментальная наука, поэтому одна из главных целей данного курса (как и других разделов общей физики) – представить теорию относительности как обобщение большого количества экспериментальных данных, данных наблюдений и практического опыта, убедить студентов в том, что выводы теории относительности, какими бы парадоксальными они ни казались, подтверждены экспериментально (прямо или косвенно) в настоящее время с настолько высокой точностью, что не остается никаких сомнений в их достоверности.

Теория относительности – один из тех разделов физики, который всегда вызывал и вызывает повышенный интерес у школьников старших классов и студентов младших курсов физических факультетов; многие из них читали популярную литературу по этой теории. Очень важно в лекциях, читаемых для студентов младших курсов, поддержать этот интерес, не сделать изложение скучным. С другой стороны, в отличие от чисто популярной литературы, эти лекции должны содержать достаточно строгий вывод количественных соотношений – формул, с помощью которых можно решать достаточно серьезные задачи, т. е. надо найти оптимальное соотношение между научной строгостью и доступностью изложения. Образцом такого изложения являются, по мнению автора, «Фейнмановские лекции» по физике; они и взяты за основу данного курса. Основные задачи курса – изучение экспериментальных фактов и принципов, лежащих в основе релятивистской теории, изучение релятивистской кинематики и динамики на уровне, принятом в курсах общей физики и с использованием математического аппарата, соответствующего этому уровню, а также рассмотрение некоторых положений общей теории относительности, доступных для изложения в рамках курса общей физики.

Объем курса «Теория относительности» составляет 18 часов лекций, 16 часов семинарских занятий и 20 часов индивидуальной и самостоятельной работы (всего 54 часа, в том числе 34 часа аудиторных занятий). Курс состоит из 4 частей. В первой части излагается специальная теория относительности (экспериментальные факты и принципы, лежащие в основе релятивистской теории, преобразования Лоренца, релятивистская кинематика и динамика материальной точки, геометрия пространства-времени). Во второй части рассматриваются элементы электронной оптики и ускорительной техники, а также решаются задачи о движении заряженных частиц в электрических и магнитных полях. В третьей части рассматриваются элементы электродинамики в вакууме (релятивистская природа магнитного поля, инвариантность уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца). В четвертой части излагаются некоторые положения общей теории относительности, а также элементы современной космологии. Тематический план курса приведен в таблице 1.

Таблица 1

Тематический план курса «Теория относительности»

№ темы	Наименование темы	Лекции (часов)	Семинар (часов)	Инд. и самост. работа (часов)
1.	Специальная (частная) теория относительности	9	6	6
1.1.	Принципы, лежащие в основе теории относительности и их экспериментальное обоснование	2	-	
1.2.	Релятивистская кинематика	2	1	
1.3.	Релятивистская динамика материальной точки	2	3	
1.4.	Геометрия пространства-времени	3	2	
2.	Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях	-	8	6
2.1.	Движение заряженных частиц в электростатическом и в постоянном магнитном поле	-	3	
2.2.	Ускорители	-	5	
3.	Применение специальной теории относительности к электродинамике	3	2	4
3.1.	Относительность магнитных и электрических полей	2	1	
3.2.	Релятивистское преобразование уравнений Максвелла	1	1	
4.	Элементы общей теории относительности	6	-	4
4.1.	Основные принципы и некоторые следствия общей теории относительности и их экспериментальная проверка	4	-	
4.2.	Элементы космологии	2	-	
	Всего часов	18	16	20

Первый раздел курса «Специальная (частная) теория относительности» начинается с изложения принципов, лежащих в основе теории относительности, и их экспериментального обоснования. При этом удобно рассмотреть сначала астрономические наблюдения и эксперименты, указывающие на постоянство скорости света в вакууме, а уже затем опыты, из которых следует принцип относительности. В этом случае, например при анализе опытов Майкельсона, нет необходимости подробно останавливаться на баллистической гипотезе Ритца, достаточно лишь упомянуть о ней. Наиболее подробно рассматриваются, конечно, опыты Майкельсона-Морли, но чтобы у студентов не сложилось мнения, что вся теория относительности основана только на этих опытах, рассказывается также об экспериментах Физо, Роуланда и Рентгена. Попутно отмечается, что в настоящее время теория относительности стала инженерной наукой, и наиболее убедительное ее подтверждение заключается в том, что создано большое количество приборов (ускорителей, электронных микроскопов и др.), в которых используются результаты этой теории. Параллельно с изложением материала дается краткий исторический обзор работ Лоренца, Пу-

анкаре, Эйнштейна, Минковского. Время от времени в СМИ появляются претендующие на сенсационность работы, в которых авторство Эйнштейна в создании теории относительности подвергается сомнению. Некоторые студенты видели эти публикации или слышали о них, поэтому одна из целей лекции по этой теме – показать, что вклад Лоренца и Пуанкаре в создание теории относительности важен и неоспорим, но главная заслуга принадлежит все же Эйнштейну.

Далее излагается релятивистская кинематика: относительность одновременности, замедление хода движущихся часов, сокращение длины движущегося тела, преобразования Лоренца, формула сложения скоростей в релятивистской механике. Здесь же рассказывается о прямых экспериментальных подтверждениях эффекта замедления времени. На семинаре рассматриваются некоторые парадоксы теории относительности: возможно ли превышение скорости света, парадокс близнецов, парадоксы, связанные с сокращением длины движущегося стержня. Ключевым пунктом является вывод формулы замедления хода движущихся часов

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}. \quad (1)$$

Это делается на модели часов, рассмотренной Р. Фейнманом [1, вып.2]; отсюда выводятся все остальные формулы, в том числе преобразования Лоренца. Изложение раздела ведется без использования понятий четырехмерного пространства и четырехмерных векторов и доступно не только всем студентам, но и школьникам старших классов. Один из главных выводов заключается в том, что после того как приняты принцип относительности и принцип постоянства скорости света, все эффекты, кажущиеся парадоксальными, получаются с неизбежной математической логикой, и чем более простым путем (с точки зрения математики) эти результаты получены, тем они убедительнее.

Далее рассматривается релятивистская динамика материальной точки. В подавляющем большинстве учебников по общей физике (как отечественных, так и зарубежных) изложение данного материала основано на использовании понятия релятивистской массы. Это и классические учебники С. П. Стрелкова и С. Э. Хайкина, и «Фейнмановские лекции» по физике, и «Берклевский курс физики», и учебники Д. В. Сивухина и А. Н. Матвеева, которые в настоящее время являются основными по общей физике в российских вузах, и многие другие авторитетные учебники. В учебниках же по теоретической физике понятие релятивистской массы, как правило, не используется. В последнее время ряд авторов подвергли критике методику изложения с использованием релятивистской массы и объявили ее устаревшей, указывая, в частности, на то, что релятивистская масса и полная энергия, связанные между собой постоянным множителем c^2 , фактически дублируют друг друга, что в формуле $\vec{p} = m\vec{v}$ релятивистская масса m не является скаляром, а скорость \vec{v} не является четырехвектором, и это якобы приводит к путанице, когда студенты переходят к изучению теоретической физики. Однако отказ от использования понятия релятивистской массы при изложении основ релятивистской динамики приводит к еще большим трудностям. В этом случае приходится сразу полностью переходить на довольно абстрактный язык четырехмерных векторов, понять физический смысл которых не так просто (например, каков смысл 4-скорости, модуль которой всегда равен единице, независимо от того, движется тело или покоится, как

эту скорость измерить, и т. п.). Трудности вызывает также отказ от понятия релятивистской массы фотона (если у одного фотона масса равна нулю, то откуда появляется масса у фотонного газа, и т. д.). Вообще опыт преподавания показывает, что попытки изложить какой-либо раздел общей физики методами, принятыми в теоретической физике, приводят к тому, что студентам приходится заучивать материал без ясного понимания физического смысла, к формализации обучения, к тому, что Р. Фейнман называл «бразильской системой обучения». Что касается опасений путаницы при переходе к изучению теоретической физики, то они явно надуманы. Объяснить старшекурснику, приступившему к изучению электродинамики, эквивалентность релятивистской массы и полной энергии (если он сам еще об этом не догадался) – дело нескольких минут. Исходя из сказанного выше, автор данной статьи придерживается традиционной методики при изложении основ релятивистской динамики. Вначале с помощью формулы сложения скоростей выводится формула

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}, \quad (2)$$

а затем из релятивистского уравнения движения материальной точки в форме

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}, \quad (3)$$

выводится связь между массой, энергией и импульсом в релятивистской механике, критерии применимости нерелятивистских формул и ультрарелятивистский предел. При этом отмечается, что в научной литературе формула (2) используется редко, зато незаменимыми оказываются соотношения

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad \text{и} \quad pc = \frac{Ev}{c}. \quad (4)$$

На семинарских занятиях по этой теме рассматриваются некоторые релятивистские эффекты в атомной и ядерной физике: энергия связи ядра, фотоэффект, эффект Комптона, рождение электронно-позитронных пар.

Таким образом, на первых трех лекциях достаточно подробно рассматриваются основы теории относительности на привычном языке трехмерного пространства, а на семинарских занятиях решаются задачи. Материал несложен и знаком студентам из раздела «механика» (хотя и не так подробно), уровень изложения совершенно элементарен и доступен не только всем студентам, но и школьникам старших классов, знакомым с простейшими приемами дифференцирования и интегрирования, поэтому никаких трудностей при изучении этой части курса, как правило, не возникает.

Завершается первый раздел введением в четырехмерную геометрию пространства-времени в специальной теории относительности. В течение трех часов лекционного времени рассматриваются: интервал, инвариантность интервала, световой конус, пространственноподобные и времениподобные интервалы, четырехвекторы (в частности, подробно рассматривается четырехвектор энергии-импульса), алгебра четырехвекторов, четырехмерное представление преобразований Лоренца, их геометрическая интерпретация, некоторые парадоксы плоскости Минковского. Материал этого подраздела более абстрактен и менее знаком студентам, поэтому для его лучшего усвоения, кроме лекции, ему посвящается еще и семинарское занятие, которое проводится в форме собеседования.

Второй раздел «Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях» полностью изучается на семинарских занятиях, в основном на примерах и решениях задач. В первой части этого раздела «Движение заряженных частиц в электростатическом и в постоянном магнитном поле» рассматриваются: электростатическая и магнитная линза, электронный микроскоп, квадрупольные линзы, движение заряженных частиц в комбинированных электрическом и магнитном полях, основные принципы масс-спектропии. Во второй части «Ускорители» рассматриваются: принцип действия и устройство циклотрона, современные ускорители тяжелых заряженных частиц (изохронный циклотрон, фазотрон, синхрофазотрон), ускорители электронов (синхротрон, бетатрон, микротрон), линейный ускоритель электронов, ускорители со встречными пучками частиц. Материал этого раздела совершенно элементарен и частично может быть рассмотрен в форме коротких докладов, подготовленных самими студентами с помощью, например, книги Л. А. Арцимовича и С. Ю. Лукьянова [2]. В то же время этот материал очень важен с точки зрения экспериментальной проверки теории относительности. Как уже отмечалось выше, именно тот факт, что на основе релятивистской теории создана разнообразная электронная и ускорительная техника, является ее наиболее убедительным экспериментальным подтверждением.

Третья часть курса называется «Применение специальной теории относительности к электродинамике». Изложение основано на примере, рассмотренном Р. Фейнманом [1, вып. 5]: заряженная частица движется параллельно проводнику с электрическим током. На этом примере демонстрируется инвариантность электрического заряда относительно выбора системы координат, зависимость плотности электрического заряда от скорости, а также относительность магнитных и электрических полей: доказываем, что получается один и тот же результат, рассматриваем ли мы движущуюся частицу рядом с неподвижным проводником с электрическим током, или переходим в систему координат, в которой частица неподвижна, а двигается проводник. В первом случае сила, действующая на частицу, является чисто магнитной, а во втором – чисто электрической. В заключение этого раздела рассматриваются преобразования Лоренца для плотности заряда и плотности тока и уравнения Максвелла в четырехмерных обозначениях [1, вып. 6]. Это самая сложная часть курса. Несмотря на то, что студенты только что (в конце 3-го семестра) сдали экзамен по электричеству и магнетизму, материал этого раздела, как показывает опыт, вызывает наибольшие трудности, поэтому для его лучшего усвоения, кроме 3-х часов лекции, ему посвящается еще и семинарское занятие.

В последнем, 4-м разделе излагаются элементы общей теории относительности. Это прежде всего принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс и его экспериментальная проверка. Рассказывается об опытах Галилея, Ньютона, Бесселя, Этвеша, Саутернса, Дикке, Брагинского, в которых этот принцип проверялся со все возрастающей точностью. Далее очень коротко на популярном уровне рассказывается о связи между гравитацией и кривизной пространства и дается понятие о геодезических линиях. Этот вопрос освещается в разнообразной популярной литературе, и останавливаться на нем подробно нет необходимости. Далее приводится и обсуждается формула

$$\vec{F} = -GMm \left[\left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{\vec{r}}{r^3} - \frac{(\vec{r}\vec{v})\vec{v}}{c^2 r^3} \right], \quad (5)$$

которую можно рассматривать как релятивистское обобщение (в первом приближении) закона всемирного тяготения. Формула (5) – единственная, которая в данном курсе дается без вывода, однако ее обсуждение и использование вполне доступно в рамках общей физики и представляется вполне оправданным, т. к. позволяет правильно определить некоторые следствия общей теории относительности и обсудить результаты их экспериментальной проверки. В частности, гравитационное смещение спектральных линий и искривление светового луча в гравитационном поле, вычисленное по методике, изложенной, например, в «Берклевском курсе физики» [3], но с использованием формулы (5), дает совершенно правильные результаты. На заключительной лекции рассматриваются элементы космологии: современные представления об эволюции Вселенной, модель Большого взрыва, рождение и эволюция звезд, нейтронные звезды, черные дыры, проблема обнаружения гравитационных волн. За основу этого подраздела взят материал книги Б. С. Ишханова, И. М. Капитонова и И. А. Тутыня [4].

В конце семестра студенты сдают зачет. По итогам прослушанного курса они должны знать: принципы теории относительности и их экспериментальное обоснование, преобразования Лоренца, релятивистский закон сложения скоростей, эффекты замедления времени и сокращения размеров движущихся тел, релятивистское уравнение движения, релятивистское соотношение между энергией и импульсом; должны уметь решать простейшие задачи о движении заряженных частиц в электрических и магнитных полях с учетом релятивистских эффектов, а также объяснять известные парадоксы теории относительности. Кроме этого, студенты должны иметь представление о современных взглядах на пространство и время, о некоторых следствиях общей теории относительности и о результатах их экспериментальной проверки, о современных космологических теориях, об электронной оптике, об устройстве и принципах работы ускорителей заряженных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуски 2, 5, 6. М.: Мир, 1966.
2. Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978.
3. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Берклевский курс физики. Том 1. Механика. М.: Наука, 1971.
4. Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А. Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1999.