



Специальная теория относительности (СТО) — раздел физики, который играет важную роль в формировании научного мышления и современных представлений учащихся о пространстве и времени. Однако, несмотря на то, что данный раздел является очень сложным для усвоения, он изучается в течение ограниченного промежутка времени практически в конце курса физики, между разделами «Оптика» и «Квантовая физика». Между тем задания на знания основ СТО включены в контрольно-измерительные материалы ЕГЭ по физике.

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕМЫ «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

Файруза САБИРОВА, доцент ЕГПУ

В изучении специальной теории относительности учителю может оказаться полезным использование созданных самостоятельно или готовых цифровых образовательных ресурсов (ЦОР), так как эффективный образовательный процесс в настоящее время невозможен без использования информационных ресурсов, доступ к которым становится необходимым условием, обеспечивающим качество образования. Для разработки цифровых образовательных ресурсов и обеспечения высокого уровня педагогического дизайна мультимедийного урока учитель может использовать возможности Интернет. Так, обратившись к [8], учитель найдет необходимый материал по истории формирования идей специальной теории относительности. В ресурсах сайта [1, 7] можно найти различные методические рекомендации и иллюстрации по изучаемой теме. Обратившись к [5, 6] представляется возможным подобрать тренировочные задания для подготовки к ЕГЭ по физике и даже пройти он-лайн тестирование. В этом случае учитель может больше уделить внимание тому, как он будет управлять учебным процессом, каким образом будет обеспечиваться педагогическое общение с учащимися на уроке.

В данной статье мы приведем краткий конспект обобщающего урока по теме «Основы специальной теории относительности», в котором вместо традиционного основного содержания приведены эскизы к презентации. Здесь имеются основные положения темы и рекомендуемые задачи для подготовки к ЕГЭ по физике по данной теме.

### Цели урока:

- формирование основных представлений о СТО: постулатов СТО, преобразований Лоренца, следствий из преобразований Лоренца, а также элементов релятивистской динамики;
- формирование умения применять полученные знания при решении задач базового уровня.

### Краткое содержание урока и эскизы слайдов

#### 1. Постулаты специальной теории относительности

В основе классической механики лежит механический принцип относительности (или принцип относительности Галилея), который означает, что законы динамики инвариантны относительно преобразований Галилея.

Слайд 1

**Преобразования Галилея**

Для инерциальных систем  $K$  и  $K'$  преобразования координат и времени Галилея (для  $v \ll c$ ):

$$\begin{aligned} x &= x' + vt' \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t'. \end{aligned}$$

Слайд 2

**Следствие из преобразований Галилея**

Закон преобразования скоростей при переходе от  $K$  к  $K'$ :

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z$$

Ускорения тела во всех инерциальных системах одинаковы:

$$a_x = a'_x, \quad a_y = a'_y, \quad a_z = a'_z, \quad \vec{a} = \vec{a}'$$

$$m\vec{a} = m\vec{a}'$$

Уравнение движения классической механики не меняет своего вида при переходе от одной инерциальной системы к другой.

После просмотра слайдов 1 и 2 сообщается, что, в отличие от классической механики, в основе специальной теории относительности лежат два принципа или постулата, сформулированные Эйнштейном в 1905 г.

Слайд 3

**Постулаты Эйнштейна**

**Принцип относительности:** все инерциальные системы отсчета физически равноправны

**Принцип постоянства скорости света:** скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета

## 2. Преобразования Лоренца и следствия из преобразований Лоренца

Кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО называются преобразованиями Лоренца.

Слайд 4

**Преобразования Лоренца**

Преобразования Лоренца - кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО (usc)

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

### Следствие 1. Замедление времени

Слайд 5

**Замедление времени**

Пусть время начала события в системе K':

$$t'_1 = \frac{t_1 - \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Время окончания события в системе K':

$$t'_2 = \frac{t_2 - \frac{vx_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Временной интервал между событиями в K':

$$\tau' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$\tau' < \tau$

В соответствии с этим следствием, продолжительность события в системе K  $\tau = t_2 - t_1$  и K'  $\tau' = t'_2 - t'_1$  не совпадают. Ход времени для движущейся системы отсчета замедляется относительно неподвижной системы.

## Следствие 2. Сокращение длины

Слайд 6

**Сокращение длины**

Длина тела в направлении движения в системе K':

$$l_0 = x_2' - x_1'$$

Длина тела в направлении движения в системе K:

$$l = x_2 - x_1$$

В соответствии с преобразованием координат Лоренца:

$$x_1' = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x_2' = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

В соответствии с этим следствием расстояние не является абсолютной величиной, оно зависит от скорости движения тела относительно данной системы отсчета. Движущиеся относительно наблюдателя тела **сокращаются** в направлении своего движения.

**Задача № 1.** Какое время пройдет на Земле, если в ракете, движущейся со скоростью 0,99 c относительно Земли, пройдет 10 лет?

**Решение.** Интервал движущейся системы оказывается больше, чем для неподвижной, то есть на Земле интервал времени окажется дольше, чем в ракете. Используя формулу замедления времени, найдем  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{10 \text{ лет}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2}} = \frac{10 \text{ лет}}{\sqrt{0,0199}} \approx 70,88 \text{ лет} \approx 71 \text{ год}$$

**Ответ.** 71 год.

**Задача № 2.** Звездный корабль будущего, движущийся со скоростью  $v = 0,8 c$  ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ), путешествовал  $t_0 = 10$  лет по часам космонавтов. На сколько лет земляне будут старше космонавтов, когда корабль вернется на Землю?

**Решение.** Разницу во времени определим из разности:  $\Delta t = t - t_0$ . Из условия замедления

времени:  $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ , поэтому:

$$\Delta t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - t_0 = t_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

$$\Delta t = 10 \text{ лет} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 0,8^2}} - 1 \right) = 6,7 \text{ лет.}$$

**Ответ.** 6,7 лет.

**Задача №3.** Собственная длина стержня равна 1 м. Определите его длину для наблюдателя, относительно которого стержень перемещается со скоростью 0,6 c, направленной вдоль стержня.

**Решение.** Длина стержня, измеренная в системе отсчета, относительно которой он движется, меньше его длины  $l_0$ , измеренной в системе отсчета, относительно которой он покоится. Используя формулу Лоренцева сокращения длины, найдем  $l$ :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}};$$

$$l = 1 \text{ м} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}} = 1 \text{ м} \cdot \sqrt{1 - 0,36} = 0,8 \text{ м} = 80 \text{ см}$$

**Ответ:** 80 см.

**Задача № 4.** С какой скоростью  $v$  должно двигаться тело, чтобы его длина уменьшилась на 20% по сравнению с первоначальной длиной?

**Решение.**  $\Delta l = l_0 - l$  — уменьшение длины тела.

По условию  $\frac{\Delta l}{l_0} = 20\% = 0,2$ . С другой стороны:  $\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{l}{l_0}$ .

Используя формулу сокращения длины

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ получим } \frac{\Delta l}{l_0} = 1 - \frac{l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{l_0} = 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

После преобразования полученного выражения, получим  $v^2 = c^2 \frac{\Delta l}{l_0} \left( 2 - \frac{\Delta l}{l_0} \right)$ . Следова-

$$\text{тельно: } v = c \sqrt{\frac{\Delta l}{l_0} \left( 2 - \frac{\Delta l}{l_0} \right)}.$$

Произведя вычисления, получим:

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot \sqrt{0,2(2 - 0,2)} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 0,6 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

**Ответ.**  $v = 1,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

### 3. Релятивистский закон сложения скоростей

Слайд 7



Релятивистский закон сложения скоростей

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}$$

Если  $v \ll c$ , то  $u_x = u'_x + v$ ,  
или  $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$  (классический случай)

**Задача № 5.** Два космических корабля движутся относительно Земли со скоростью 0,75 c во взаимно противоположных направлениях. Какова их относительная скорость с точки зрения каждого из космонавтов?

**Решение.** Один космический корабль удаляется от другого со скоростью  $v_{отн.}$ , равной:

$$v_{отн.} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1^2}{c^2}}; v_{отн.} = \frac{2 \cdot 0,75 c}{1 + 0,75^2} = 0,96 c$$

**Ответ.**  $v_{отн.} = 0,96 c$ .

**Задача № 6.** В лабораторной системе отсчета вдоль общей прямой и в одном направлении движутся три частицы. Скорость первой частицы относительно второй равна 0,3 c, скорость второй частицы относительно третьей составляет 0,4 c, третья частица движется в лаборатории со скоростью 0,5 c. Определите скорость первой частицы относительно лабораторной системы отсчета.

**Решение.** По релятивистскому закону преобразования скоростей скорость второй частицы относительно лаборатории:

$$v_2 = \frac{v_{23} + v_3}{1 + \frac{v_{23} v_3}{c^2}} = \frac{(0,4 + 0,5) c}{1 + 0,4 \cdot 0,5} = 0,75 c,$$

тогда скорость первой частицы в лабораторной системе отсчета равна:

$$v_1 = \frac{v_{12} + v_2}{1 + \frac{v_{12} v_2}{c^2}} = \frac{(0,3 + 0,75) c}{1 + 0,3 \cdot 0,75} = 0,86 c.$$

**Ответ.**  $v_1 = 0,86 c$ .

### 4. Элементы релятивистской динамики

Уравнения классической механики Ньютона оказались неинвариантными относительно преобразований Лоренца, и поэтому СТО потребовала пересмотра и уточнения законов механики. В основу такого пересмотра Эйнштейн положил требования выполнимости закона сохранения импульса и закона сохранения энергии в замкнутых системах. В результате оказалось необходимым изменить определение импульса тела и энергии тела. Так, вместо классического импульса  $\vec{p} = m\vec{v}$  был введен релятивистский импульс, а движущееся тело обладает энергией, которая зависит от релятивистской массы.

Слайд 8



Элементы релятивистской динамики

Релятивистский импульс:  $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Полная энергия в релятивистской динамике:  $E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

$E = E_k + m_0 c^2$   
 $E_k$  — кинетическая энергия

Если  $v \ll c$  ( $v = 0$ ), то  $E_0 = m_0 c^2$  — энергия покоя

**Задача № 7.** Электрон движется со скоростью, равной 0,6 c. Определить импульс электрона.

**Решение.** Релятивистский импульс электрона вычислим по формуле:

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

$$\text{Следовательно: } p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{5m_0 v}{4}.$$

$$p = \frac{5 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8}{4} = 2,05 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Ответ: } p = 2,05 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

**Задача № 8.** При какой скорости кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя?

**Решение.** Кинетическая энергия релятивистской частицы определяется соотношением:  $E_k = mc^2 - m_0 c^2$  (1), где  $E_0 = m_0 c^2$  — энергия покоя и  $E = mc^2$  — релятивистская энергия.

Релятивистскую массу  $m$  найдем из формулы:

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

Подставляя формулу (2) в уравнение (1),

$$\text{получим: } E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

По условию задачи  $E_k = E_0$ , поэтому имеем:

$$m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Сократив на  $m_0 c^2$  и проделав соответствующие преобразования, найдем скорость час-

$$\text{тицы: } \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 = 1; \quad 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{4}; \quad \frac{4c^2 - 4v^2}{4c^2} = \frac{c^2}{4c^2};$$

$$3c^2 = 4v^2, \text{ отсюда: } v = \sqrt{\frac{3}{4}}c = 0,866 c.$$

**Ответ.**  $v = 0,866 c$ .

#### Вопросы и задания для самопроверки.

1. Какие системы отсчета называются инерциальными?
2. Сформулируйте и разъясните содержание первого постулата СТО — принципа относительности Эйнштейна.
3. В чем отличие первого постулата теории относительности в релятивистской физике от принципа относительности в классической физике?
4. Сформулируйте второй постулат СТО.
5. Сформулируйте закон сложения скоростей в классической механике.
6. Напишите релятивистский закон сложения скоростей.
7. Что такое собственная длина стержня? Сдвинута ли длина стержня в различных инерциальных системах отсчета? Имеет ли смысл понятие длина стержня вне связи с системой отсчета?
8. Какое выражение имеет закон релятивистской динамики?
9. По какой формуле определяется релятивистский импульс тела?
10. Что такое энергия покоя тела?

#### Задачи для самостоятельной работы

1. Ионизированный атом, вылетев из ускорителя со скоростью  $0,8 c$ , испустил фотон в направ-

лении своего движения. Определить скорость фотона относительно ускорителя. (**Ответ:** скорость фотона в собственной системе координат и относительно ускорителя одинакова и равна скорости света.)

2. Протон движется со скоростью  $0,75 c$ . Определить его релятивистский импульс и кинетическую энергию. (**Ответ:**  $p = 5,68 \cdot 10^{-19} \text{ Н} \cdot \text{с}$ ;  $E_k = 7,69 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ .)

3. Определите промежуток времени, прошедший за 35 земных лет на звездолете, движущемся относительно Земли со скоростью  $0,40 c$ . (**Ответ:** 32 года.)

4. Определите кинетическую энергию электрона при движении его со скоростью  $0,75 c$  по классическим и релятивистским формулам. (**Ответ:**  $2,3 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ ;  $4 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ .)

5. Частица движется со скоростью  $v = 0,8 c$ . Определить отношение полной энергии релятивистской частицы к ее энергии покоя. (**Ответ:** 1,7.)

6. Определить скорость, при которой релятивистский импульс частицы превышает ее ньютоновский импульс в три раза. (**Ответ:**  $2,83 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .)

7. Определить релятивистский импульс электрона, кинетическая энергия которого  $E_k = 1 \text{ ГэВ}$ . (**Ответ:**  $1,7 \cdot 10^{-15} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .)

8. Частица массой  $m_0$ , двигаясь со скоростью  $0,8 c$ , испытывает неупругое столкновение с покоящейся частицей той же массы. Определите скорость и энергию покоя составной частицы, которая образовалась в результате соударения. (**Ответ:**  $0,5547 c$ ;  $2,3 m_0 c^2$ .)

9. Какой промежуток времени пройдет на звездолете, движущемся относительно Земли со скоростью  $0,33 c$  за 50 земных лет? (**Ответ:** 47,2 лет.)

10. Во сколько раз время существования нестабильной космической частицы, движущейся со скоростью  $0,98 c$  относительно Земли, измеренное по «земным часам», больше ее собственного времени? (**Ответ:** в 5 раз.)

11. Какое время пройдет по часам в ракете, движущейся со скоростью  $v$ , если на часах, покоящихся на относительно инерциальной системе отсчета, относительно которой движется ракета, прошел 1 час? Скорость считать равной: а)  $3000 \text{ км/с}$ , б)  $100000 \text{ км/с}$ . (**Ответ:** а) 59 мин 59,8 с; б) 56 мин 7 с.)

12. Каким импульсом обладает электрон движущийся со скоростью, равной  $4/5$  скорости света. (**Ответ:**  $3,64 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .)

#### Литература.

1. Горохов А.В. Элементы теории относительности. — Режим доступа: <http://nauka.ssu.samara.ru/PHIZ/STAT/STO/sect0.html>
2. Единый государственный экзамен: физика: контрольно-измерительные материалы: 2006 — 2007. — М.: Просвещение, СПб.: Просвещение, 2007.
3. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразовательных учреждений: базовый и профиль. — 17-е изд. — М.: Просвещение, 2008.
4. Орлов В.А., Демидова М.Ю. Единый государственный экзамен: 2010. Физика. Универсальные материалы для подготовки учащихся. — М.: ФИПИ, Интеллект-Центр, 2010.
5. Основы специальной теории относительности. Разноуровневые вопросы и задачи. — Режим доступа: [http://fiz.1september.ru/2000/no02\\_1.htm](http://fiz.1september.ru/2000/no02_1.htm)
6. Основы специальной теории относительности. — Режим доступа: <http://egephizika.26204s024.edusite.ru/DswMedia/sto1.htm>
7. Официальный сайт МИВлГУ. Кафедра физики. — Режим доступа: <http://www.mivgu.ru/kafedra/phisica>
8. Тяпкин А.А. Об истории формирования идей специальной теории относительности. — Режим доступа: <http://bourabai.narod.ru/tyapkin/relativity.htm>
9. Физика: Учеб. пособие для 11 классов школ и классов с углубленным изучением физики/А.Т. Глазунов, О.Ф. Кабардин, А.Н. Малинин и др. — М.: Просвещение, 1994.