

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

530.12:531.18(018)

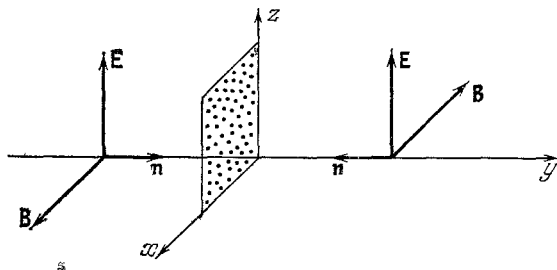
К ВОПРОСУ О «ЗАПАЗДЫВАНИИ» РЕЛЯТИВИСТСКОГО
СОКРАЩЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ

С. И. Сыроватский

Релятивистское сокращение движущихся тел или систем тел иногда приводит к недоразумениям, связанным со смешением двух существенно различных явлений. С одной стороны — это различие размеров тела, измеренных в двух, движущихся друг относительно друга системах отсчета, с другой — изменение размеров тела, приведенного в движение (или остановленного) в данной системе координат. Если в первом случае ответ однозначен и дается формулами преобразования Лоренца, то во втором — он существенно зависит от того, как именно двигалось рассматриваемое тело между двумя измерениями. Несмотря на очевидность этих утверждений, полезно проиллюстрировать их на простом примере, тем более, что он показывает, в каких условиях различие исчезает, и в обоих случаях результат выражается преобразованием Лоренца.

Таким примером служит одномерная задача о движении плоского слоя зарядов под действием плоской электромагнитной волны. Эта задача возникает в проблеме ускорения частиц в нейтральных токовых слоях в плазме^{1, 2}. Мы рассмотрим ее в простейшем варианте.

Пусть на гонкий слой заряженных частиц (в плоскости x, y ; см. рисунок) по нормали к нему падает плоская электромагнитная волна с прямоугольным фронтом. Задача особенно проста в симметричном случае, когда



одновременно такая же волна приходит с противоположной стороны слоя. В этом случае магнитные поля погашают друг друга, а электрические складываются, приводя заряды в движение в направлении оси z (см. рисунок). Возникающий ток с плотностью $j = nev$, где n — плотность зарядов, v — их скорость, в свою очередь, порождает излучение (отраженную волну). Точное решение такой самосогласованной задачи не представляет труда, и мы не будем здесь его приводить (см. ²). Остановимся только

на одном вопросе: как связана плотность движущихся зарядов n с ее начальным значением n_0 ?

Ответ на этот вопрос автоматически вытекает из одномерности задачи (все величины не зависят от координат в плоскости слоя x и z) и сохранения числа частиц: все частицы движутся одновременно и одинаково, и поэтому какое бы то ни было изменение плотности невозможно. Ошибкой было бы полагать, что расстояния между зарядами и их плотность по мере роста их скорости будут изменяться в соответствии с релятивистскими формулами

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad n = \frac{n_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}. \quad (1)$$

В самом деле, любые два заряда движутся одинаково и независимо друг от друга с сохранением расстояния между ними. При этом применение преобразования Лоренца показывает, что в собственной системе отсчета (движущейся вместе с зарядами) плотность последних равна

$$n' = n_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}, \quad (2)$$

т. е. слой оказывается «растянутым», с большим расстоянием между частицами, чем в начальном состоянии. Это растяжение вполне реально и причина его состоит в том, что, в отличие от исходной «лабораторной» системы, где фронт или фиксированная фаза волны действует одновременно на все частицы, в «собственной» системе этой одновременности уже нет. В собственной системе запаздывание фронта в точке z'_2 по сравнению с точкой z'_1 равно

$$\Delta t = t'_2 - t'_1 = -\frac{v}{c^2}(z'_2 - z'_1), \quad (3)$$

как это следует из преобразования Лоренца и одновременности в лабораторной системе. Иными словами, в собственной системе слоя волны уже не падают строго навстречу друг другу, а сближаются под некоторым углом и их фронты не параллельны слою, хотя вся физическая картина по-прежнему симметрична относительно слоя.

Ввиду растяжения слоя в собственной системе рассматриваемая совокупность независимых зарядов не может быть выбрана в качестве масштаба для измерения длин и соответственно не может удовлетворять преобразованиям (1). В качестве масштабов в теории относительности выбираются реальные тела, находящиеся в различных системах в одинаковых физических условиях, например, упругие стержни в разгруженном состоянии. В силу принципа относительности их собственные длины будут во всех системах одинаковыми.

Видоизменим нашу задачу, закрепив заряды на упругой пластине. Рассмотренное выше движение, во-первых, придаст пластине скорость вдоль оси z и, во-вторых, вызовет растяжение пластины, т. е. выведет ее из упругого равновесия. Для того чтобы ее снова можно было использовать как масштаб, нужно подождать, пока эти напряжения релаксируют и упругое равновесие восстановится. Это время, очевидно, будет определяться размером пластины по оси z и скоростью распространения взаимодействий, определяющих равновесие пластины (в случае упругой пластины скоростью упругих, т. е. звуковых волн). Спустя это время размер пластины примет равновесное значение и, в силу принципа относительности, будет подчиняться соотношениям (1).

Таким образом, в тех случаях, когда тело, используемое как масштаб, изменяет состояние своего движения (например, при переносе из одной системы координат в другую), формулы релятивистского преобразования

длины будут справедливы лишь спустя время, необходимое для восстановления внутреннего равновесного состояния этого тела (снятия напряжений, возникающих при переносе) — вывод вполне тривиальный, хотя и не всегда учитываемый. Укажем здесь, что в более широком плане обсуждение вопроса о преобразовании Лоренца в процессе установления равновесия содержится в статье Фейнберга³.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Сыроватский, Изв. АН СССР, сер. физ. 31, 1303 (1967).
2. С. В. Буланов, С. И. Сыроватский, Тр. ФИАН СССР 74, 88 (1974).
3. Е. Л. Фейнберг, УФН 116, 709 (1975).

