

Парадокс Эренфеста: почему вращающаяся карусель не может достичь скорости света



Дата публикации: 15.06.2026

На первый взгляд кажется очевидным, что если постепенно раскручивать идеально жесткий диск или карусель, то его край будет двигаться всё быстрее и быстрее. Однако специальная теория относительности накладывает фундаментальное ограничение: ни одна материальная точка не может достичь скорости света. Это означает, что линейная скорость любой точки на краю вращающегося диска всегда должна оставаться меньше световой. Именно из этой, казалось бы, простой идеи в начале XX века вырос один из самых известных мысленных экспериментов современной физики — парадокс Эренфеста.

Этот парадокс был сформулирован в 1909 году австрийским физиком Паулем Эренфестом. Его цель состояла в том, чтобы проверить, как принципы специальной теории относительности работают в случае вращающихся тел. Результат оказался настолько необычным, что впоследствии сыграл важную роль в формировании идей общей теории относительности.

Чтобы понять проблему, представим себе идеально жесткий диск. Согласно специальной теории относительности, любой движущийся объект испытывает Лоренцево сокращение длины в направлении движения. Этот эффект был предсказан ещё до появления теории Эйнштейна и означает, что длина движущегося тела для внешнего наблюдателя становится меньше по мере увеличения скорости.

Во вращающемся диске каждая точка окружности движется по касательной к круговой траектории. Следовательно, каждый маленький элемент окружности должен испытывать Лоренцево сокращение. Однако радиус диска направлен перпендикулярно движению. Поскольку сокращение происходит только вдоль направления скорости, радиус сокращаться не должен.

Именно здесь возникает противоречие. Если окружность уменьшается за счёт сокращения своих элементов, а радиус остаётся прежним, то изменяется фундаментальное отношение между длиной окружности и радиусом. В обычной евклидовой геометрии это отношение всегда равно числу два пи. Независимо от размера круга окружность всегда равна двум пи эр.

Но в случае вращающегося диска получается, что окружность и радиус подчиняются разным правилам. Если воспринимать Лоренцево сокращение буквально, отношение длины окружности к радиусу должно стать меньше двух пи. Возникает странная ситуация: одна и та же геометрическая фигура оказывается одновременно подчинённой и не подчинённой законам евклидовой геометрии.

Долгое время этот парадокс вызывал серьёзные дискуссии среди физиков. Постепенно стало понятно, что сама постановка задачи содержит скрытое предположение о существовании абсолютно жёсткого тела. Именно это предположение и оказывается несовместимым с теорией относительности.

Ключ к разрешению парадокса связан с особенностями вращающихся систем отсчёта. В специальной теории относительности наиболее просто описываются инерциальные системы, движущиеся равномерно и прямолинейно. Вращение относится к неинерциальному движению. Для такой системы нельзя построить единую глобальную систему координат, которая одинаково хорошо работала бы во всех точках диска.

Особенно важную роль играет проблема времени. Точки диска на разных расстояниях от центра движутся с разными скоростями. Чем дальше от оси вращения находится точка, тем выше её линейная скорость. Согласно теории относительности, время в более быстро движущихся областях течёт медленнее. В результате часы, расположенные на различных радиусах вращающегося

диска, идут неодинаково.

Из-за этого становится невозможно синхронизировать часы вдоль всей окружности. Пространство и время перестают вести себя так, как в привычной евклидовой геометрии. Именно поэтому попытка описать вращающийся диск как обычный объект в плоском пространстве приводит к противоречию.

Современное решение парадокса показывает, что для наблюдателя, находящегося на вращающемся диске, геометрия пространства становится неевклидовой. В такой геометрии отношение длины окружности к радиусу уже не обязано быть равным двум π . Более того, окружность оказывается длиннее значения, которое предсказывает обычная школьная геометрия.

Этот результат стал одним из важных шагов к общей теории относительности Альберта Эйнштейна. В общей теории относительности ускорение и гравитация тесно связаны между собой. Вращающаяся система отсчёта рассматривается как пример среды, в которой проявляются эффекты, аналогичные действию гравитационного поля.

В искривлённом пространстве-времени длины и интервалы времени зависят не только от расстояний между объектами, но и от способа измерения. Геометрия перестаёт быть универсальной и становится свойством самого пространства-времени.

Хотя парадокс Эренфеста может показаться чисто теоретическим, его последствия имеют вполне практическое значение. Один из наиболее известных примеров связан с работой системы GPS. Спутники навигационной системы движутся относительно поверхности Земли и одновременно находятся в другом гравитационном поле. Из-за этого их часы идут с иной скоростью по сравнению с часами на Земле.

Без учёта релятивистских поправок ошибка навигации быстро накапливалась бы и достигала нескольких километров в сутки. Современные системы позиционирования работают точно именно потому, что инженеры используют расчёты, основанные на специальной и общей теориях относительности.

Дополнительное подтверждение релятивистских эффектов дают современные эксперименты с кольцевыми лазерами и оптическими резонаторами. Особое значение здесь имеет эффект Саньяка, открытый ещё в начале XX века. Он заключается в том, что два световых луча, распространяющихся по кольцевому маршруту в противоположных направлениях, проходят путь за немного разное время, если установка вращается.

Современные кольцевые лазеры способны измерять эти различия с

невероятной точностью. Такие приборы используются для определения параметров вращения Земли, исследования геофизических процессов и проверки предсказаний общей теории относительности. Эксперименты последних лет подтверждают, что эффекты, связанные с вращением и искривлением пространства-времени, полностью соответствуют расчётам Эйнштейна.

Парадокс Эренфеста остаётся одним из самых красивых примеров того, как простая на первый взгляд задача приводит к глубоким выводам о природе реальности. Он показывает, что специальная теория относительности сама по себе исключает существование абсолютно жёстких тел. Любое вращающееся тело при достаточно высокой скорости неизбежно должно деформироваться и не может сохранять идеальную форму. На практике предел вращения достигается задолго до появления заметных релятивистских эффектов, поскольку реальные материалы разрушаются под действием центробежных сил. Тем не менее парадокс Эренфеста остаётся важнейшим мостом между специальной и общей теориями относительности, демонстрируя, что даже обычная карусель может привести к пониманию искривлённого пространства-времени и фундаментальных законов Вселенной.