

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.1(023)

## ТАХИОНЫ

ЧАСТИЦЫ, ДВИЖУЩИЕСЯ СО СКОРОСТЯМИ БОЛЬШЕ  
СКОРОСТИ СВЕТА

В. С. Барашенков

## МНИМЫЕ МАССЫ

Могут ли существовать в природе частицы, движущиеся со скоростями, превосходящими скорость света в вакууме? Когда такой вопрос задается тому, кто знаком с основами теории относительности, то ответ, как правило, бывает отрицательным, поскольку с первого взгляда кажется, что частицы, обладающие такими скоростями (их принято называть тахионами от греческого слова  $\tau\alpha\chi\acute{\iota}\varsigma$  — быстрый), должны находиться в очевидном противоречии с хорошо проверенными на опыте принципами этой теории.

Действительно, один из основных выводов теории относительности состоит в том, что полная энергия частицы, движущейся со скоростью  $v$  и имеющей в состоянии покоя массу  $m$ , равна

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}},$$

где  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/сек — скорость света в вакууме. Из этого соотношения видно, что когда скорость частицы приближается к скорости света,  $v \rightarrow c$ , энергия такой частицы обращается в бесконечность, а при скоростях, когда подкоренное выражение в знаменателе принимает отрицательные значения, вообще становится мнимой величиной. То же самое происходит с импульсом частицы  $p = mv/\sqrt{1-(v/c)^2}$ , со временем ее жизни  $t = \tau/\sqrt{1-(v/c)^2}$  ( $\tau$  — время жизни неподвижной частицы) и со всеми другими физически наблюдаемыми, измеримыми в эксперименте характеристиками частицы, выражения для которых содержат релятивистский фактор

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

Невозможность движения тел со сверхсветовыми скоростями  $v > c$  отмечалась еще Пуанкаре, а затем и Эйнштейном в его знаменитой работе в «Annalen der Physik», где были сформулированы основные положения теории относительности.

Однако эти возражения являются не столь серьезными, как это можно было бы думать, и, в сущности, говорят лишь о том, что частица, движущаяся со скоростью  $v < c$ , не может путем *непрерывного* увеличения

скорости превратиться в тахион и, наоборот, тахионы, если они существуют в природе, путем постепенного уменьшения своей скорости не могут перейти в обычные «досветовые» частицы. Другими словами, тахионы и досветовые частицы представляют собой *существенно различные* типы частиц. Тахионам нет нужды преодолевать световой барьер; подобно тому, как фотон и нейтрино сразу рождаются со скоростью  $v = c$ , тахионы также могут рождаться и поглощаться, *всегда* имея скорость  $v > c$ .

Заметим, что масса частицы  $m$  и ее собственное время жизни  $\tau$  относятся к неподвижной частице и, следовательно, *непосредственно* измеримы в эксперименте лишь при  $v \rightarrow 0$  — в случае, который, как мы только что видели, принципиально недостижим для тахиона; во всех же других случаях для тахионов при  $v > c$  и в промежуточном случае, когда  $v = c$ , эти величины являются не измеряемыми, а *определяемыми* с помощью тех или иных теоретических соотношений. Важно лишь, чтобы была логически самосогласованной и согласовалась с опытом вся совокупность соотношений, в которые входят определенные таким образом значения  $m$  и  $\tau$ . Массе  $m$  при этом можно приписать, в частности, нулевое значение, как это имеет место в случае фотона и нейтрино, или даже считать  $m$  и  $\tau$  мнимыми величинами:  $m = im_0$ ,  $\tau = i\tau_0$ . Последнее как раз и соответствует тахионам, у которых энергия, импульс, время жизни в лабораторной системе координат и все другие экспериментально наблюдаемые характеристики будут при этом обычными действительными величинами \*).

#### УСКОРЕНИЕ ВМЕСТО ЗАМЕДЛЕНИЯ

Сверхсветовые частицы будут обладать многими совершенно непривычными для нас свойствами. Так, нам представляется вполне естественным, что потеря энергии частицей, например в результате столкновений с атомами среды, в которой частица движется сопровождается ее замедлением. Тахион же, наоборот, теряя энергию, ускоряется. Это непосредственно видно из приведенной выше формулы для энергии  $E$ . В частности, когда скорость тахиона значительно превосходит скорость света, его энергия

$$E \approx m_0 c^2 \frac{c}{v} \ll m_0 c^2$$

и может обратиться в нуль независимо от величины массы  $m_0$ . Скорость тахиона при этом принимает бесконечно большое значение,  $v \rightarrow \infty$ , но его импульс тем не менее остается конечным и отличным от нуля:  $p \rightarrow m_0 c$  (рис. 1).

Можно сказать, что тахион с бесконечно большой скоростью может быть обнаружен в любой точке своей траектории, аналогично тому, как в квантовой механике частицу с нулевой скоростью можно найти в любой пространственной точке  $x$ . Время жизни тахиона при  $v \rightarrow \infty$ , как и его энергия, становится исчезающе малым:  $\tau \approx \tau_0 (c/v) \rightarrow 0$ . Исключение составляет случай, когда  $\tau_0 = \infty$  и тахион вообще является стабильной частицей.

Парадоксальность свойств тахионов с точки зрения привычных для нас представлений еще не может служить основанием для заключения

\*) Возможность рассматривать тахион как релятивистскую частицу с мнимой массой покоя впервые была указана Терлецим (см. работы <sup>1, 2</sup>, а также книгу <sup>3</sup>). За рубежом эта возможность впервые обсуждалась Биланюком, Дешпанде и Сударшаном <sup>4</sup>, идеи которых определили дальнейшее развитие этого направления. За последние десять лет различным аспектам проблемы тахионов были посвящены десятки работ. В классической дорелятивистской физике следствия гипотезы о сверхсветовых частицах обсуждались Зоммерфельдом <sup>5, 6</sup> и другими физиками.

о невозможности существования таких частиц в природе — за последние годы экспериментальная физика представила нам немало сюрпризов, радикально повлиявших на многие наши, казалось бы, самые незыблемые представления об окружающей природе. Важно, что ни одно из перечисленных выше свойств тахионов само по себе не противоречит основным законам, лежащим в основе здания современной физики.

### ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГИИ

Более серьезное возражение против существования тахионов заключается в том, что, в отличие от обычных частиц, знак энергии сверхсветовой частицы может быть изменен на обратный путем простого перехода к другой системе координат, движущейся с некоторой скоростью  $u$ , меньшей скорости света. При таком переходе энергия  $E \rightarrow E'$ , где в соответствии с преобразованием Лоренца для перехода от одной системы координат к другой новая энергия тахиона

$$E' = \left( E - \frac{pu}{c} \right) \gamma = E \left( 1 - \frac{pu}{Ec} \right) \gamma = \\ = E \left( 1 - \frac{uv}{c^2} \right) \gamma$$

(здесь  $\gamma = 1/\sqrt{1 - (u/c)^2}$  — упоминавшийся уже выше релятивистский фактор,  $p$  — импульс, а  $v = pc/E$  — скорость тахиона в старой системе координат). Очевидно, если произведение скоростей  $uv > c^2$ , то энергии  $E$  и  $E'$  будут иметь различные знаки.

Трудность, связанная с изменением знака энергии, заключается не только в том, что полная, а также кинетическая энергии частицы по самому смыслу должны быть положительными величинами; возможность сделать энергию тахиона отрицательной означает, что любая физическая система была бы нестабильной по отношению к испусканию неограниченного числа тахионов, бесконечно увеличивая при этом свою энергию и реализуя тем самым идею вечного двигателя. Кроме того, из вакуума должны были бы спонтанно рождаться пары тахионов с энергиями  $-E$  и  $+E$ ; образование неограниченного числа таких пар не противоречит законам сохранения энергии-импульса и не изменяет суммарную нулевую энергию вакуума.

### АКАУЗАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Для частицы, движущейся со скоростью  $v > c$ , путем перехода к новой системе координат можно изменить также и временной порядок событий, т. е. обратить направление течения времени. Действительно, если в некоторой системе координат происходят какие-то события в точках  $x_1$  и  $x_2$  соответственно в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , причем  $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$ , то в другой системе координат, движущейся относительно первой со скоростью  $u$ , интервал времени, разделяющий события в точках  $x_1$  и  $x_2$ ,

$$\Delta t' = \left( \Delta t - \frac{\Delta x u}{c^2} \right) \gamma = \Delta t \left( 1 - \frac{uv}{c^2} \right) \gamma < 0,$$

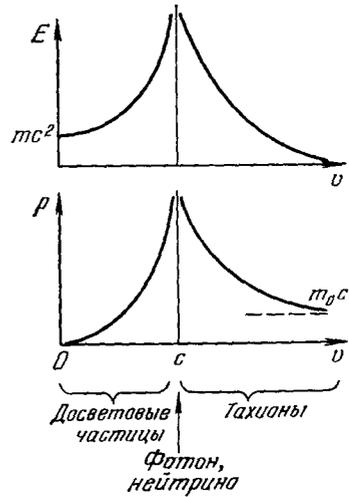


Рис. 1. Зависимость энергии и импульса частицы от ее скорости.

если только произведение скоростей  $uv > c^2$ . (Мы обозначили  $\Delta x = x_2 - x_1$ ,  $v = \Delta x / \Delta t$ .) Таким образом, если в исходной системе координат событие в точке  $x_1$  происходит раньше события в точке  $x_2$ , то в новой системе координат оно совершается позднее события в точке  $x_2$ .

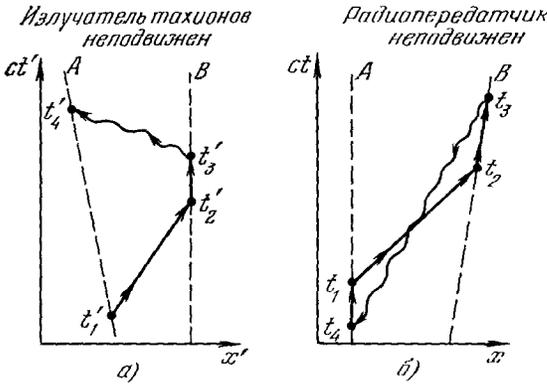


Рис. 2. Акаузальная петля событий с обменом одним тахионом.

Радиопередатчик движется по траектории А, источник тахионов — по траектории В. Волнистые линии — траектории тахионов. В системе координат, связанной с источником тахионов (а), времена событий удовлетворяют условию  $t'_1 < t'_2 < t'_3 < t'_4$ . В системе координат радиопередатчика (б) временной порядок испускания и поглощения тахиона оказывается переставленным:  $t_3 < t_4$ , и при достаточно большой скорости тахион достигнет радиопередатчика раньше, чем последний успеет испустить радиоволну:  $t_4 < t_1$ .

ний, чем тот, когда он был испущен. Иначе обстоит дело в системе координат радиопередатчика, которая движется по отношению к источнику тахионов; в этой системе порядок событий, связанных тахионным сигналом, изменяется на обратный и тахионы достигнут радиопередатчика и включают его в момент времени  $t_4 < t_1$ . Далее цикл событий повторится бесконечное число раз \*).

В приведенном примере замкнутый временной цикл событий образуется лишь в той системе координат, которая движется по отношению к источнику тахионов; в другой системе происходит обычный периодический процесс. Если рассмотреть обмен двумя тахионами (рис. 3), то временная последовательность событий сворачивается в петлю в любой системе координат независимо от ее движения.

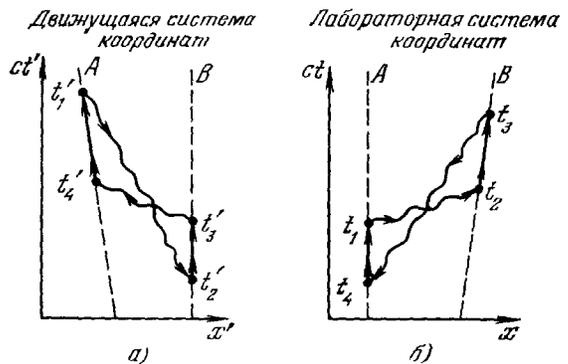


Рис. 3. Временная петля событий с обменом двумя тахионами.

А и В — траектории двух источников тахионов. В движущейся системе координат (а) испускание и поглощение тахиона, испущенного неподвижным источником, происходит в обратном порядке.

\*) Этот пример иногда представляют также в форме логического парадокса, потребовав, чтобы радиопередатчик испускал сигнал, включающий источник тахионов, в том и только в том случае, если он сам ранее не получил сигнала от этого источника. При

Можно привести еще целый ряд различных акаузальных эффектов, обусловленных изменением временного порядка событий, связанных сверхсветовыми сигналами. Казалось бы, этого вполне достаточно для того, чтобы убедиться в невозможности существования частиц со скоростями  $v > c$ .

### ПРИНЦИП РЕИНТЕРПРЕТАЦИИ

Тем не менее более пристальное рассмотрение показывает, что трудности с обращением знака энергии и времени также можно устранить уже на современном, еще весьма низком уровне теории сверхсветовых частиц. Для этого заметим, что *оба* эти явления наступают, когда выполняется условие  $uv > c^2$ :

$$\frac{E'}{E} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} = 1 - \frac{uv}{c^2} \gamma. \quad (1)$$

Это обстоятельство открывает возможность такой трактовки парадоксов с изменением знаков  $E$  и  $\Delta t$ , при которой происходит как бы взаимная их компенсация<sup>4, 9-11</sup>.

Будем считать, что событие поглощения частицы с положительной энергией тождественно событию испускания частицы с отрицательной энергией; аналогично будем считать, что акт испускания частицы с энергией  $E > 0$  совершенно неотличим от события поглощения частицы с энергией  $E < 0^*$ ). При этом условии, которое называется «принципом реинтерпретации»<sup>4, 9-11</sup>, изменение временного порядка событий в соответствии с соотношением (1) сопровождается такой перестановкой актов испускания и поглощения, что мы каждый раз имеем дело с причинно упорядоченной цепью событий для частиц с положительно определенными энергиями. Другими словами, физические сигналы могут передаваться лишь объектами, имеющими положительную энергию<sup>\*\*</sup>).

Допустим, например, что произошел процесс, который мы интерпретируем как испускание тахиона с энергией  $E > 0$  в некоторой фиксированной пространственно-временной точке 1 и последующее поглощение этого тахиона в другой пространственно-временной точке 2. Для наблюдателя в системе координат, движущейся со скоростью  $u > c^2/v$  ( $v$  — скорость тахиона), событие в точке 2 происходит раньше события в точке 1, однако для этого наблюдателя изменяется также и знак энергии тахиона, поэтому наблюдатель в движущейся системе координат будет интерпретировать весь процесс как поглощение в точке 1 тахиона с положительной энергией, испущенного *ранее* в точке 2. Никаких отрицательных энергий или

---

этом обмен сигналами «будет иметь место только тогда, когда он не имеет места»<sup>7, 8</sup>. Однако фактически никакого парадокса здесь нет, так как заложенное в его основу требование представляет собой внутренне противоречивое, самоисключающее начальное условие, которое никогда не может быть удовлетворено (*каждому* моменту  $t_1$  предшествует прошлое), и излучение попросту не происходит.

\*) Эту идею легко усвоить, если вспомнить, что сходное условие используется в теории позитронов Дирака, где «дырка» в фоне электронов с отрицательными энергиями отождествляется с позитроном, имеющим положительно определенную энергию.

\*\*) Изменение направления времени сопровождается изменением знака не только энергии, но и других квантовых чисел сверхсветовой частицы: ее заряда, барионного или лептонного чисел и т. д. Поэтому более точно принцип реинтерпретации следует сформулировать следующим образом: при любом взаимодействии частица, имеющая отрицательную энергию и движущаяся в конечном (начальном) состоянии реакции обратно во времени, должна интерпретироваться как соответствующая античастица, имеющая положительную энергию и движущаяся вперед во времени в начальном (конечном) состоянии реакции.

акаузальных эффектов ни движущийся, ни неподвижный наблюдатели при этом не зафиксируют.

Нетрудно убедиться, что последовательность событий на рис. 2, а при учете принципа реинтерпретации не изменится, а процесс на рис. 2, б будет представлять собой спонтанное излучение антитахиона, последующее испускание радиоволны радиопередатчиком и поглощение их далее источником тахионов. Последовательность событий на рис. 3 также укладывается в причинно-следственную цепь.

### СНОВА АКАУЗАЛЬНОСТЬ

Однако рассмотренная выше интерпретация обращения временного порядка путем перехода к античастицам все же не исключает полностью всех акаузальных явлений. Это можно видеть из следующего примера.

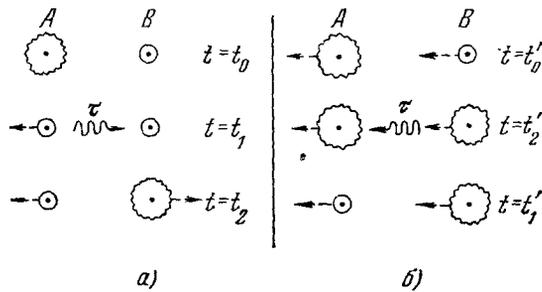


Рис. 4. Обмен тахионом между двумя атомами. а) С точки зрения неподвижного наблюдателя в начальный момент времени  $t_0$  атом  $A$  находится в возбужденном, атом  $B$  — в основном состоянии. Оба атома покоятся. В следующий момент  $t_1$  атом  $A$  испускает тахион  $\tau$ , а сам в результате этого получает импульс отдачи и переходит в основное состояние. В момент  $t_2 > t_1$  тахион  $\tau$  поглощается атомом  $B$ , который переходит в возбужденное состояние и получает соответствующий импульс отдачи. б) С точки зрения движущегося наблюдателя в начальный момент времени  $t'_0$  атом  $A$  также находится в возбужденном, а атом  $B$  — в основном состоянии. Оба атома движутся. В следующий момент  $t'_2$  атом  $B$  испускает тахион  $\tau$  и переходит в возбужденное состояние с соответствующим уменьшением своей кинетической энергии. Атом  $A$  поглощает тахион в момент времени  $t'_1 > t'_2$  и переходит в основное состояние, при этом его кинетическая энергия возрастает. Для неподвижного наблюдателя  $t_0 < t_1 < t_2$ , для движущегося наблюдателя  $t'_0 < t'_2 < t'_1$ .

Пусть в некоторый момент времени  $t_0$  мы имеем дело с двумя неподвижными атомами: атомом  $A$  в возбужденном и атомом  $B$  в его основном состоянии (рис. 4). В неподвижной системе координат в результате обмена тахионом сначала атом  $A$  переходит в невозбужденное состояние, а затем атом  $B$  возбуждается. Вследствие эффекта отдачи при испускании и поглощении тахиона оба первоначально покоившихся атома после окончания процесса движутся. Наблюдатель, который перемещается со скоростью  $u > c^2/v$  (подчеркнем, что эта скорость меньше скорости света, так что движение наблюдателя является вполне обычным, «досветовым»), зафиксирует изменение состояния атома  $B$  раньше, чем что-то произойдет с

атомом  $A$ , и интерпретирует весь процесс как спонтанное излучение тахиона атомом  $B$  и последующее его поглощение атомом  $A$ . Таким образом, то, что происходит с атомом  $B$ , неподвижный наблюдатель воспринимает как поглощение, а движущийся наблюдатель — как спонтанное испускание тахиона.

Представим теперь, что атомы  $A$  и  $B$  разделены поглощающим тахионы экраном, в котором в заданный момент  $t$  на некоторое время  $\Delta t$  открывается щель. Повторяя этот опыт много раз, неподвижный наблюдатель, конечно, заметит, что распределение случаев возбуждения атома  $B$  по времени (временная гистограмма) зависит от закона, по которому открывается щель в экране. Так как щель каждый раз открывается раньше, чем возбуждается атом  $B$ , никакого противоречия с принципом причинности неподвижный наблюдатель не обнаружит. Совершенно иную интерпретацию эксперименту будет вынужден дать движущийся наблюдатель, который также заметит корреляцию между видом распределения по вре-

мени числа случаев спонтанного возбуждения атома  $B$  и законом, в соответствии с которым открывается щель в экране. Поскольку, однако, щель каждый раз открывается уже *после* того, как произошло возбуждение атома  $B$ , наличие корреляции будет восприниматься наблюдателем в движущейся системе координат как необъяснимый акаузальный эффект, при котором атом  $B$  заранее «знает» о том, по какому закону будет открываться и закрываться щель<sup>12</sup>.

Образно говоря, если, например, один из сонетов Шекспира перевести на язык азбуки Морзе и в соответствии с этим модулировать, открывая и закрывая щель, интенсивность потока тахионов, то точно по такому же временному закону будет излучать и атом  $B$ . Телеграфную передачу спонтанно излучающим атомом сонета Шекспира движущийся наблюдатель воспримет как подлинное чудо. Однако этот наблюдатель всегда может установить истинную причину необычного явления, если перейдет в другую систему координат.

Таким образом, мы должны заключить, что в процессах с участием сверхсветовых частиц направление потока информации (энергии взаимодействия), составляющее основу причинно-следственной связи, остается инвариантным по отношению к изменениям системы координат, в то время как порядок следования причины и следствия зависит от выбора системы координат.

Проблеме причинности в теории со сверхсветовыми частицами в последнее время было посвящено большое число работ<sup>7-9, 12-17</sup>, тем не менее достаточной ясности в этом вопросе еще нет.

Некоторые авторы (см., например,<sup>8</sup>) считают, что в процессах с участием тахионов принцип причинности безусловно нарушается, поэтому тахионы вообще не могут взаимодействовать с фотонами и обычным «досветовым» веществом. Фактически это означает отказ от рассмотрения сверхсветовых частиц, поскольку ни один прибор не сможет их зафиксировать; в этом случае мы должны допустить существование в природе целого мира принципиально непознаваемых объектов.

Другие авторы высказывают мнение, что причинная обусловленность явлений, связанных сверхсветовыми сигналами, по-прежнему сохраняется, но в этих случаях изменяется и становится более общей сама форма причинной связи, симметрично включающая «запаздывающую каузальность», когда причина предшествует следствию, и «опережающую каузальность», при которой явление-следствие происходит раньше явления-причины<sup>7, 12, 16, 18</sup>. Однако такой подход — во всяком случае, в области макроскопических пространственно-временных масштабов — представляется весьма неудовлетворительным с методологической точки зрения. Кроме того, очень важно подчеркнуть, что формулировка принципа причинности с учетом запаздывания следствия по отношению к причине хорошо подтверждается опытами по проверке дисперсионных соотношений в процессах упругого рассеяния частиц. Как известно, требование «запаздывающей причинности» лежит в основе вывода дисперсионных соотношений. Вплоть до пространственно-временных расстояний  $\Delta x \approx 7 \cdot 10^{-16}$  см и  $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-26}$  сек никаких отклонений дисперсионных расчетов от эксперимента не обнаружено<sup>19</sup>.

#### КАКОЙ ЖЕ ВЫВОД ИЗ ТЕОРИИ?

Хотя весь наш предшествующий опыт свидетельствует против «опережающей причинности», тем не менее, вообще говоря, нельзя исключить возможность существования совершенно новой области явлений, где хронологический порядок причинно-следственной связи не имеет строго определенного значения, инвариантного к выбору системы координат.

После того как в опытах с распадами частиц было установлено, что физические явления могут быть инвариантными по отношению к отражениям пространства и времени, такая возможность не кажется абсолютно невероятной — во всяком случае, для микроявлений.

Если тахионы в силу каких-то неизвестных нам законов не выходят за пределы некоторой микроскопической «области нелокальности», где понятие временного порядка не определено или имеет смысл, весьма отличный от того, к чему мы привыкли до сих пор, то мы с помощью наших макроскопических приборов не сможем зафиксировать явления с обратным порядком причины и следствия, подобно тому, например, как благодаря соотношению неопределенностей  $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$  мы не можем экспериментально обнаружить нарушение классического закона сохранения энергии-импульса при виртуальных квантовых процессах \*).

Таким образом, мы видим, что в настоящее время нельзя привести какие-либо абсолютные запреты для частиц со сверхсветовыми скоростями. Существуют такие частицы или нет, это прежде всего — вопрос эксперимента.

В последние годы было выполнено несколько специальных опытов по поиску тахионов, кроме того, некоторые физики пытались получить сведения о свойствах этих частиц из анализа известных астрофизических данных и данных, полученных на ускорителях. Далее мы кратко рассмотрим результаты этих работ. Хотя ни в одной из них не было получено каких-либо определенных указаний на существование тахионов, эти гипотетические частицы обладают настолько необычными свойствами, что отрицательные выводы ряда выполненных до настоящего времени экспериментов и оценок выглядят весьма неоднозначными и, как мы увидим ниже, не учитывают многих важных особенностей сверхсветовых частиц.

### ПОИСК ТАХИОНОВ В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

Оценку величины массы и электрического заряда тахиона можно попытаться получить на основе экспериментальных данных о космическом радиоизлучении. Поскольку энергия тахионов может быть сколь угодно малой, даже очень длинноволновые фотоны могут распадаться на пары тахионов и антитахионов:  $\gamma \rightarrow \tau + \bar{\tau}$ . В то же время космическое радиоизлучение, прежде чем достигнуть приемных устройств на земле, успеваает пройти колоссальные расстояния порядка  $10^{10}$  световых лет.

Если теперь предположить, что взаимодействие тахионов с электромагнитным полем происходит по тем же законам, что и для других заряженных частиц, то из теоретического выражения для вероятности пройти фотону без распада расстояние  $\sim 10^{10}$  световых лет следует оценка электрического заряда  $e_0$  и массы  $m_0$  тахиона:

$$\frac{e_0}{e} \frac{m_0}{m_e} \lesssim 10^{-24},$$

где  $e$  — заряд,  $m_e$  — масса электрона. Другими словами, если тахионы существуют, они должны являться нейтральными (или «почти нейтральными») частицами с зарядом, много меньшим заряда электрона, либо должны обладать очень малой массой  $m_0$ , на много порядков меньшей массы электрона <sup>21</sup>.

Однако этот вывод нельзя рассматривать как достаточно убедительный, так как наряду с лабораторной системой координат, где фотон распа-

\*) Различные варианты нелокальных теорий можно рассматривать как формально-математическое выражение этой идеи.

дается на пару  $\tau + \bar{\tau}$ , всегда можно найти систему координат, в которой тахионы будут формально обладать отрицательной энергией и в соответствии с принципом реинтерпретации рассматриваемый процесс будет представлять собой аннигиляцию пары  $\tau + \bar{\tau} \rightarrow \gamma$ . Наоборот, распад фотона в некоторой движущейся системе координат будет восприниматься в лабораторной системе координат как его рождение в результате аннигиляции пары  $\tau + \bar{\tau}$ , и в силу равноправия систем координат интенсивность потока космического радиоизлучения в среднем останется в действительности неизменной.

Возможность компенсирующих аннигиляционных процессов означало бы, что Вселенная должна быть наполнена тахионным излучением. Это — важное, хотя и весьма удивительное, следствие принципа реинтерпретации. Впрочем, мы уже привыкли к тому, что Вселенная заполнена вакуумными флуктуациями, реликтовыми фотонами, очень слабо взаимодействующим и поэтому не наблюдаемым нами нейтринным излучением. С этой точки зрения «тахионный фон» хотя и обладает весьма специфическими особенностями, тем не менее не является чем-то совершенно исключительным и не противоречит каким-либо известным нам физическим законам.

Однако существует и другая, по-видимому, даже более обоснованная точка зрения. Процесс распада  $\gamma \rightarrow \tau + \bar{\tau}$  и обратный ему процесс аннигиляции описываются той же самой амплитудой, что и процесс черенковского излучения тахиона  $\gamma \rightarrow \gamma + \tau$  (различаются лишь значения кинематических переменных и знаки квантовых чисел \*). Как мы увидим ниже, можно привести довольно убедительное объяснение, почему черенковское излучение тахиона в вакууме невозможно; поэтому должны быть запрещены и связанные с ним распад фотона на пару тахионов и аннигиляция двух тахионов в фотон. Вывод о том, что Вселенная должна быть наполнена тахионным излучением, в этих условиях представляется необоснованным. (Кроме того, это еще раз показывает, что приведенная выше оценка заряда и массы тахиона является весьма сомнительной.)

Тем не менее следует иметь в виду, что эти выводы также небезупречны и основаны на определенных гипотезах, связанных с возможностью обобщения лоренцовских преобразований на сверхсветовые движения (см. ниже); существует ли тахионный фон в природе и какова его интенсивность — это в настоящее время прежде всего вопрос эксперимента.

В работе <sup>22</sup> была предпринята попытка получить сведения о взаимодействии тахионов с обычным «досветовым веществом» путем оценки количества тепла, выделяющегося внутри планет, в частности внутри нашей Земли, в результате поглощения ими частиц тахионного фона.

Вероятности процессов поглощения тахиона нуклоном или электроном можно оценить, если, основываясь на принципе реинтерпретации, формально рассматривать эти процессы как спонтанное излучение тахиона с энергией  $E < 0^{**}$ ;

$$N \rightarrow N + \tau, \quad e \rightarrow e + \tau.$$

Поток тепла из глубин Земли сейчас известен с точностью 10%. Если забыть о распадах радиоактивных ядер и считать, что тепловой поток

\* Все три процесса описываются одной и той же «треххвостной» фейнмановской диаграммой, поэтому выбор знаков четырехмерных импульсов частиц и знаков их квантовых чисел определяется тем, в каком направлении «считается» эта диаграмма. Мы имеем здесь дело с частным случаем так называемой кроссинг-симметрии процессов взаимодействия.

\*\* Следует подчеркнуть, что в данном случае эта возможность имеет смысл лишь чисто формального приема, поскольку полная энергия испускаемого антитахиона является отрицательной величиной.

целиком обусловлен энергией поглощенных тахионов, то отсюда получается следующая оценка времени тахионного распада нуклона и электрона (т. е. времени, в течение которого происходит поглощение тахиона одной из этих частиц):

$$t_N \gtrsim 3 \cdot 10^{17} \Delta E_N \text{ лет}, \quad t_e \gtrsim 1,5 \cdot 10^{17} \Delta E_e \text{ лет},$$

где  $\Delta E$  ( $M\text{эв}$ ) — энергия отдачи, которую получает нуклон или электрон в результате поглощения тахиона <sup>22</sup>.

Величину  $\Delta E$  можно оценить, если предположить, что тахионы космического фона уже успели растратить свою полную энергию  $E$  и имеют предельный импульс  $p = m_0 c$  (т. е. скорость  $v \gg c$ ). Из закона сохранения энергии в этом случае сразу же следует, что энергия отдачи слабо связанной поглощающей частицы с массой  $M$

$$\Delta E \approx E_{\text{кон}} - M = \frac{m_0^2}{2M}. \quad (2)$$

Если теперь предположить, что выражения, описывающие взаимодействия тахионов, имеют в общих чертах такой же вид, как и для других частиц, то из сравнения теоретического выражения для времени  $t$  с приведенными выше экспериментальными значениями  $t_N$  и  $t_e$  получаются оценки постоянных взаимодействия тахиона с нуклоном и электроном:

$$\frac{g_N^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-52}, \quad \frac{g_e^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-55}.$$

Эти оценки пригодны для тахионов с массой  $m_0 \gtrsim 50 M\text{эв}$  в случае поглощения их нуклонами и  $m_0 \gtrsim 0,1 M\text{эв}$  в случае поглощения электронами <sup>22</sup>. (Для меньших значений  $m_0$  требуется более тщательное рассмотрение взаимодействия тахиона со всем атомом в целом, так как отдача  $\Delta E$  в этом случае уже очень мала.)

Однако против этих выводов можно также привести серьезные возражения, поскольку в их основе лежит предположение о том, что Вселенная заполнена тахионным излучением. Если же интенсивность фона тахионов (их потока, падающего на Землю) мала, то тахионы внутри Земли будут поглощаться только некоторыми нуклонами и электронами и поэтому из приведенных выше рассуждений можно оценить фактически лишь произведение неизвестной нам сейчас интенсивности тахионного фона и постоянной их взаимодействия.

Мы видим, что все полученные до настоящего времени «экспериментальные заключения» о том, что тахионы исключительно слабо взаимодействуют с досветовыми частицами и несравненно слабее всех известных нам типов частиц, в действительности основаны на гипотезах, справедливость которых далеко не очевидна, и поэтому являются пока не очень убедительными.

Интересная попытка обнаружить тахионы в составе космических лучей, распространяющихся в толще земной атмосферы, была предпринята индийскими физиками <sup>23</sup>. В этих опытах исследовалась компонента широких атмосферных ливней, доходящая до регистрирующих приборов быстрее, чем электрон-фотонная компонента. В пределах статистических ошибок число таких сверхсветовых частиц (верхняя оценка) было меньше 0,03% числа электронов.

Вместе с тем ряд авторов отмечает, что постепенно накапливается число различных астрофизических явлений, объяснение которым хотя и может быть дано в рамках известных физических законов, без привлечения сверхсветовых скоростей, однако выглядит довольно сложным и искусственным. Так, по мнению большой группы американских астро-

номов результаты их наблюдений за излучением квазара 3С-279 очень трудно объяснить, если не предполагать скоростей передачи сигналов, приблизительно в десять раз превосходящих скорость света<sup>24</sup>. Теория тахионов использовалась также для интерпретации опытов Вебера по регистрации гравитационных волн<sup>25</sup>. Однако все эти «положительные результаты» выглядят еще очень неубедительными и требуют дальнейшего анализа.

#### ТАХИОНЫ В ОПЫТАХ ПО СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТИЦ

В течение последних полутора десятков лет выполнено большое число весьма прецизионных экспериментов по поиску возможных распадов протонов и электронов. Методика всех этих опытов была такова, что в них должны были бы фиксироваться также и реакции поглощения тахионов

$$\tau + p \rightarrow p, \quad \tau + e \rightarrow e,$$

которые выглядели бы как случаи спонтанного движения первоначально покоившейся частицы. В качестве примера рассмотрим два таких эксперимента.

В работе Г. Н. Флерова с сотрудниками<sup>26, 27</sup> фиксировались все случаи спонтанного деления в образце из  $\text{Th}^{232}$ . Ядро  $\text{Th}^{232}$  стабильно по отношению к делению, однако в случае распада одного из протонов, входящих в состав этого ядра, или в случае, когда этот протон получает дополнительную энергию в результате поглощения им тахиона, остаточное ядро должно претерпеть распад. Отрицательный результат опытов дает нижнюю оценку времени жизни протона и вместе с тем устанавливает нижний предел для времени, в течение которого происходит взаимодействие тахиона с внутриядерным протоном:

$$t_p \gtrsim 2 \cdot 10^{23} \text{ лет.}$$

С помощью такой методики можно исследовать взаимодействия тахионов с массами  $m_0 \gtrsim 100 \text{ Мэв}$ . (Эта оценка следует из соотношения (2).)

Из сравнения экспериментального и теоретического значений  $t_p$  следует оценка постоянной взаимодействия тахионов с протонами

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-54}.$$

В работе Гура с сотрудниками<sup>28</sup> случаи распада протонов и электронов на заряженные фрагменты фиксировались системой сцинтилляционных счетчиков, расположенных глубоко под землей, практически при полном отсутствии фона космических лучей. Система автоматически зафиксировала бы и случаи отдачи, которую получил бы протон или электрон при поглощении им тахиона.

В этих опытах установлены пределы для поглощения тахиона

$$t_p \gtrsim 10^{29} \text{ лет,} \quad m_0 \gtrsim 200 \text{ Мэв,}$$

$$t_e \gtrsim 10^{29} \text{ лет,} \quad m_0 \gtrsim 10 \text{ Мэв.}$$

(Минимальное значение массы тахиона определяется чувствительностью установки, регистрирующей частицы с кинетической энергией  $T > 20 \text{ Мэв}$ .) Это приводит к исключительно малым значениям постоянных взаимодействия:

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \sim \frac{g_e^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-60}.$$

Однако, как и в распространенных выше оценках, основанных на выделении тепла в толще Земли, все эти заключения опять-таки предполагают существование интенсивного тахионного фона и определяют фактически не постоянную взаимодействия  $g^2$ , а величину произведения этой постоянной на интенсивность потока тахионов.

#### ПОПЫТКИ ОБНАРУЖИТЬ ТАХИОНЫ В ОПЫТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ

В работе Балтая, Фейнберга и др.<sup>21</sup> оценка величины «ядерного заряда» тахиона, постоянной его взаимодействия с нуклоном  $g_N^2/\hbar c$ , получена путем анализа потерь энергии пучком ускоренных протонов в вакууме. Такие потери могут происходить благодаря реакциям излучения

$$p \rightarrow p + \tau, \quad p \rightarrow p + \tau + \bar{\tau}.$$

Если снова предположить, что выражения, описывающие взаимодействия тахионов, имеют приблизительно такой же вид, как и для других частиц, то из сравнения теоретического выражения с экспериментальным значением потерь энергии получается оценка

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \frac{m_0}{m_p} \lesssim 10^{-18},$$

где  $m_p$  — масса протона. Отсюда следует либо очень малое значение ядерного заряда тахиона, либо чрезвычайно малая величина его массы.

Однако, как и в рассмотренном выше случае взаимодействий с электромагнитным полем, этот вывод встречает возражения, поскольку в соответствии с принципом реинтерпретации наряду с реакциями, в которых протон испускает тахионы, должны происходить и обратные процессы поглощения тахионов и антитахионов,

$$p + \tau \rightarrow p, \quad p + \tau + \bar{\tau} \rightarrow p,$$

благодаря чему энергия пучка протонов в среднем остается неизменной. Аналогичный вывод следует также из соображений, запрещающих черенковское излучение тахионов в вакууме (см. ниже).

То же самое можно сказать о неудачных попытках зафиксировать с помощью водородной пузырьковой камеры рождение заряженных и нейтральных тахионов в реакциях с остановившимися  $K^-$ -мезонами и антипротонами

$$K^- + p \rightarrow \Lambda + \tau, \quad \Lambda + \tau + \bar{\tau} \\ \bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \tau, \quad \pi^+ + \pi^- + \tau + \bar{\tau}.$$

Квадраты четырехмерных импульсов обычной досветовой частицы и тахиона имеют различные знаки ( $P_{\text{обыч}}^2 = -m^2$ ,  $p_{\tau}^2 = m_0^2$ ), и это различие проявляется в корреляциях кинематических характеристик рождающихся в реакции частиц. С первого взгляда может показаться, что это обстоятельство открывает принципиальную возможность экспериментального обнаружения тахионов, например путем построения гистограммы недостающих эффективных масс для вторичных частиц и поиска в них «резонансных пиков» (так, как это делается обычно в опытах с короткоживущими частицами-резонансами). Однако наряду с реакциями рождения тахионов одновременно должны происходить и соответствующие обратные процессы поглощения тахионов и антитахионов парой сталкивающихся частиц (в частности, процессы  $K^- + p + \tau \rightarrow \Lambda$ ,  $K^- + p + \bar{\tau} \rightarrow \Lambda + \tau$  и т. д.). С кинематической точки зрения такие процессы эквивалентны рождению частиц с обратным по знаку четырехмерным импульсом

—  $p$  и в среднем, при сложении результатов, относящихся к различным актам взаимодействия, будут компенсировать, затушевывать ожидаемые аномалии в корреляциях. (Кинематические соотношения, использованные в работе <sup>21</sup> для анализа характеристик вторичных частиц, должны быть соответствующим образом изменены.) Этим можно объяснить, почему в работе <sup>21</sup> не было замечено никаких признаков сверхсветовых частиц.

Эти критические замечания относятся и к более поздней работе <sup>29</sup>, где в водородной пузырьковой камере, помещенной в магнитное поле, при энергии около  $2 \text{ Гэв}$  изучались реакции типа  $K^- + p \rightarrow \Lambda +$  две ионизирующие частицы, которыми, в частности, могла быть и пара достаточно долгоживущих тахионов  $\tau + \bar{\tau}$ .

Кинематический анализ эффективных масс вторичных частиц в этом случае также должен учитывать возможность обратных реакций с поглощением тахионов \*).

Для того чтобы избежать трудностей с обратными реакциями, в работе <sup>22</sup> были рассмотрены реакции поглощения тахионов очень медленными (практически покоящимися) протонами в водородной пузырьковой камере. Обратные процессы испускания тахионов в этом случае оказываются запрещенными законами сохранения энергии-импульса \*\*).

Минимальное значение массы тахиона, которое могло быть зафиксировано в этом эксперименте,  $m_0 \approx 5 Mэв$ , приблизительно вдвое меньше, чем в опытах по распаду протонов.

Анализ большого числа снимков показал, что поглощение тахиона протоном может происходить не чаще чем один раз за время  $t_p \approx \approx 2 \cdot 10^{21}$  лет, что дает верхнюю оценку постоянной взаимодействия

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \leq 10^{-52}.$$

Следует, однако, подчеркнуть, что эта оценка снова основана на предположении о том, что Вселенная заполнена тахионами.

Совершенно иной подход к исследованию свойств тахионов использовали Глисон, Гундцик и Сударшан <sup>29</sup>. Они предположили, что тахионы являются очень короткоживущими частицами и поэтому подобно резонансам проявляются лишь во взаимодействиях. В частности, обмен виртуальными тахионами должен приводить к возникновению дополнительных пиков в дифференциальных сечениях двухчастичных каналов неупругих взаимодействий мезонов, нуклонов и  $\gamma$ -квантов.

В дифференциальном сечении  $\pi^-p$ -рассеяния с перезарядкой и в сечениях многих других двухчастичных реакций при значении передаваемого импульса  $t \approx -0,1 (\text{Гэв}/c)^2$  действительно наблюдается пик, который, с одной стороны, сохраняет свое положение при переходе от одной реакции к другой и не зависит от энергии первичной частицы, а с другой — имеет в рамках современной теории довольно сложную и неоднозначную интерпретацию.

Как показано в работе <sup>30</sup>, этот пик хорошо объясняется, если допустить, что сталкивающиеся частицы обмениваются тахионом, масса кото-

\*) В работе <sup>29</sup> было обнаружено несколько событий, которые, вообще говоря, можно было рассматривать как рождение пар тахионов, однако авторы работы <sup>29</sup> нашли для этих случаев «более естественное» объяснение, приняв во внимание некоторые сопутствующие, фоновые процессы с обычными частицами.

\*\*) События поглощения тахионов в водородной пузырьковой камере нельзя отличить от событий рассеяния на протонах нейтральных частиц космического излучения, в которых протон также получает отдачу и оставляет видимый трек в камере. Однако отсутствие (или очень малое число) таких треков определяет верхнюю оценку сечения поглощения тахионов.

рого  $m_0 = 1$  Гэв, собственное время жизни  $\tau_0 \approx 10^{-24}$  сек, а остальные квантовые числа такие же, как и у  $\rho$ -мезона. Степень согласия теоретических кривых и экспериментальных точек видна из рис. 5.

Конечно, этот результат нельзя рассматривать как доказательство существования короткоживущих сверхсветовых частиц — для такого

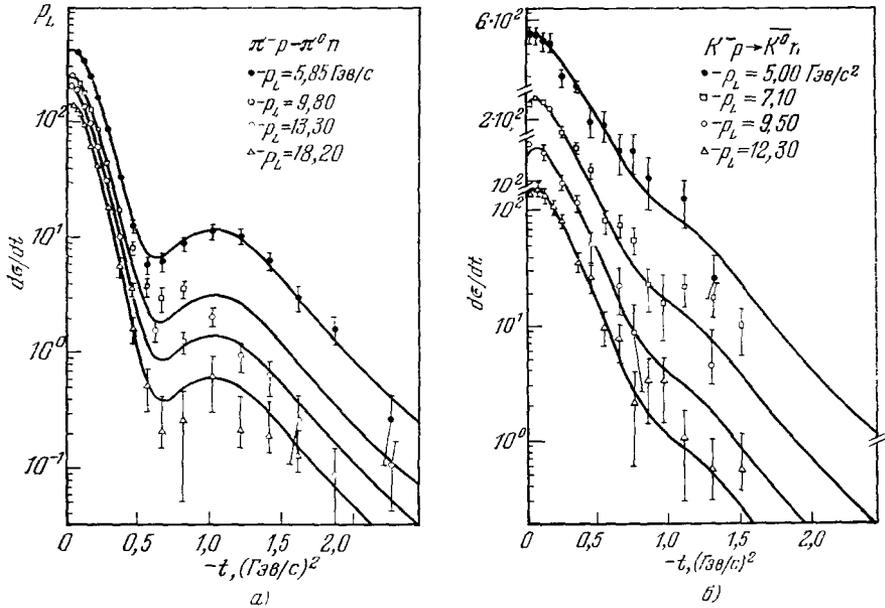


Рис. 5. Дифференциальное сечение реакций  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  и  $K^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ . а) Кривые рассчитаны в предположении обмена  $\rho$ -мезоном и тахионом; б) кроме того, учтен обмен  $A_2$ -мезоном.  $\rho_L$  — импульс первичного мезона в лабораторной системе координат.

заключения требуется значительно большее число различных экспериментальных данных, однако сам подход к проблеме и его успех в данном частном случае заслуживает дальнейшего изучения.

#### ОПЫТЫ С ЧЕРЕНКОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТАХИОНОВ

Большое внимание привлекли работы группы американских и шведских физиков по измерению черенковского излучения заряженных тахионов<sup>31, 32</sup>.

Если тахион имеет электрический заряд, то, как и любая другая заряженная частица, движущаяся в среде со скоростью, превосходящей фазовую скорость света  $c^* = c/n$  ( $n \geq 1$  — показатель преломления среды), он должен терять энергию на черенковское излучение, причем, вообще говоря, можно ожидать, что, в отличие от частиц, имеющих досветовые скорости, излучение тахиона будет происходить не только в среде, но и в вакууме, где  $n = 1$ , так как скорость тахиона  $v > c^*$  даже при  $n = 1$ . В соответствии с этим при измерениях предполагалось, что тахионы родившиеся в свинцовом блоке под действием  $\gamma$ -квантов с энергией около 1 Мэв, вылетают далее из блока и, двигаясь в вакууме, испускают фотоны черенковского излучения, которые фиксируются фотоумножителем. Поскольку расчеты показывали, что тахион должен терять почти всю свою энергию, проходя всего лишь сотые доли миллиметра от точки рождения, в опыте использовался специальный конденсатор, электрическое

поле которого подбиралось таким образом, чтобы скомпенсировать потери энергии тахиона на испускание им черенковских фотонов (рис. 6). Параметры экспериментальной установки были таковы, что от каждого тахиона, вылетевшего из свинцового блока в конденсатор, можно было ожидать в фотоумножителе свыше сотни фотонов, тем не менее не удалось зарегистрировать никакого эффекта; сечение фоторождения тахионов оказалось по меньшей мере в десять тысяч раз меньше сечения рождения электрон-позитронных пар.

Этот результат представляется тем более важным, если заметить, что фотоумножитель должен зафиксировать фотон независимо от того, образовался он в реакции  $\tau + \bar{\tau} \rightarrow \gamma$ , допустимой принципом рентерпретации.

Отрицательный результат экспериментов инициировал целую серию теоретических исследований в этом направлении. В последовавшей теоретической дискуссии было выяснено, что вывод о черенковском излучении тахиона в вакууме основан на некорректном обобщении соотношений, пригодных для досветовых частиц (см. работы <sup>33, 34</sup>, где собрана подробная библиография). Более последовательное рассмотрение показывает, что тахионы, как и обычные частицы, по-видимому, не могут излучать в вакууме.

Последнее можно пояснить следующими соображениями. Поскольку с тахионом, как и с обычной досветовой частицей, может быть связана система координат, преобразования Лоренца, с помощью которых осуществляется переход между различными системами координат, должны быть обобщены на случай сверхсветовых относительных скоростей движения <sup>35-37</sup>. При этом для любой частицы, имеющей в лабораторной системе координат скорость  $v > c$ , существует система координат, движущаяся со скоростью  $u > c$ , в которой эта частица имеет скорость  $v < c$ , т. е. является «досветовой частицей» и подчиняется обычным законам физики; в частности, изменение ее энергии при движении в вакууме

$$\frac{dE}{dt} = 0.$$

Преобразуя это соотношение с помощью обобщенных преобразований Лоренца в лабораторную систему координат, можно убедиться, что и в этой системе изменение энергии

$$\frac{dE_{\text{лаб}}}{dt_{\text{лаб}}} = 0,$$

т. е. черенковское излучение не происходит <sup>37</sup> \*).

Запрет на черенковское излучение тахионов в вакууме, который дает теория обобщенных лоренцевских преобразований, позволяет уstra-

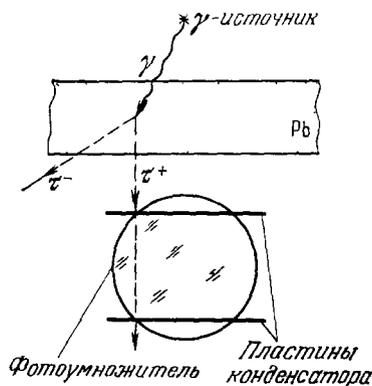


Рис. 6. Принципиальная схема эксперимента по детектированию черенковского излучения тахионов <sup>31, 32</sup>.

Тахионы рождаются  $\gamma$ -квантами в толстом свинцовом экране, полностью экранирующем источник  $\gamma$ -квантов. Положительно заряженные тахионы замедляются электрическим полем между пластинами конденсатора, их черенковское излучение регистрируется фотоумножителем.

\*) Этот вывод относится не только к электромагнитному, но и ко всем другим типам излучений: ядерному, гравитационному и т. д.

нить большое число затруднений и противоречий, связанных с таким излучением<sup>20, 33, 38, 39</sup>; однако следует иметь в виду, что возможность обобщения преобразований Лоренца на случай сверхсветовых скоростей движения также является определенной гипотезой.

#### ВОПРОС ОСТАЕТСЯ ОТКРЫТЫМ

Мы видим, что нужны весьма специфические экспериментальные условия, чтобы можно было достаточно однозначно интерпретировать эффекты, связанные с возможным существованием тахионов.

Отрицательный результат многих предпринимавшихся до сих пор попыток обнаружить эти частицы не должен рассматриваться как обескураживающий. Существуют в природе частицы со сверхсветовыми скоростями или нет? Этот вопрос следует считать пока открытым, хотя трудные проблемы причинной интерпретации сверхсветовых явлений наталкивают на мысль, что частицы со сверхсветовыми скоростями, если и существуют, то скорее всего где-то в области ультрамалых пространственно-временных интервалов  $\Delta x \lesssim 10^{-16}$  см и  $\Delta t \lesssim 10^{-26}$  сек, где начинают играть существенную роль процессы, протекающие с нарушением пространственной и временной четностей.

Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна (Московская обл.)

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. П. Терлецкий ДАН СССР 133, 329 (1960).
2. Ya. P. Terletsky, J. Phys. et Radium 21, 681 (1960); 23, 910 (1962).
3. Я. П. Терлецкий, Парадоксы теории относительности, М., «Наука», 1966.
4. O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande, E. C. G. Sudarshan, Am. J. Phys. 30, 718 (1962).
5. A. Sommerfeld, Kon. Ned. Acad. Wetenschap. Amsterdam Proc. 8, 346 (1904).
6. A. Sommerfeld, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 201 (1905).
7. P. L. Csonka, Nucl. Phys. B21, 436 (1970).
8. W. B. Rolnik, Phys. Rev. 183, 1105 (1969).
9. G. Feinberg, *ibid.* 159, 1089 (1967).
10. M. E. Azons, E. C. G. Sudarshan, *ibid.* 173, 1622 (1968).
11. J. Dhar, E. C. G. Sudarshan, *ibid.* 174, 1808.
12. R. G. Newton, *ibid.* 162, 1274 (1967).
13. A. E. Antippa, A. E. Everett, *ibid.* D4, 2198 (1971).
14. J. A. Parmentola, D. D. H. Lee, *ibid.*, p. 1912.
15. L. S. Schulman, Am. J. Phys. 39, 481 (1971).
16. E. Recami, Lett. Nuovo Cimento 4, 73 (1970).
17. R. Fox, C. E. Kuper, S. G. Lipson, Proc. Roy. Soc. A316, 515 (1970).
18. P. L. Csonka, Phys. Rev. 180, 1266 (1969).
19. М. Г. Шафранова, Пробл. физ. ЭЧАЯ (1974).
20. H. K. Wimmel, Nature (Phys. Sci.) 236, 79 (1972).
21. C. Baltay, G. Feinberg, N. Yen, R. Linsker, Phys. Rev. D1, 759 (1970).
22. J. S. Danburg, G. R. Kalbfleisch, *ibid.* D5, 1575 (1972).
23. P. V. Ramana Murthy, Lett. Nuovo Cimento 1, 908 (1971).
24. A. R. Whitney, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, D. S. Robertson, C. A. Knight, T. A. Clark, R. M. Goldstein, G. E. Marandino, N. R. V anderberg, Science 173, 225 (1971).
25. L. S. Schulman, Nuovo Cimento B2, 38 (1971).
26. Г. Н. Флеров, сборник «Ядерные реакции при малых и средних энергиях» (Труды Всесоюзной конференции, ноябрь 1957 г.), М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 608.
27. Г. Н. Флеров, Д. С. Клочков, В. С. Скобкин, В. В. Терентьев, ДАН СССР 118, 69 (1958).
28. H. S. Gurr, W. R. Kropp, F. Reines, B. Meyer, Phys. Rev. 158, 1321 (1967).

29. A. M. Gleeson, M. G. Gundzik, E. C. G. Sudarshan, *ibid.* **D6**, 807 (1972).
  30. J. S. Danburg, G. R. Kalbfleish, S. R. Borenstein, R. S. Strand, V. Vanderburg, *ibid.* **D4**, 53 (1971).
  31. T. Alväger, M. N. Kreisler, *ibid.* **171**, 1357 (1968).
  32. M. B. Davis, M. N. Kreisler, T. Alväger, *ibid.* **183**, 1132 (1969).
  33. E. C. Jones, *ibid.* **D6**, 2727 (1972).
  34. H. K. Wimmel, *Lett. Nuovo Cimento* **1**, 645 (1971).
  35. M. Glück, *Nuovo Cimento* **A1**, 467 (1972).
  36. R. Mignani, E. Recami, *ibid.* **A14**, 169 (1973).
  37. R. Mignani, E. Recami, *Lett. Nuovo Cimento* **7**, 388 (1973).
  38. R. G. Cawley, *Phys. Rev.* **D2**, 276 (1970).
  39. A. S. Lapides, K. S. Jacobs, *Nature (Phys. Sci.)* **234**, 6 (1972).
-