УДК 539.12.01

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-102-117

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕМАТИКА ДВУХЧАСТИЧНЫХ РЕАКЦИЙ РАССЕЯНИЯ С УЧАСТИЕМ ТАХИОНОВ

Самсоненко Н. В., Сёмин М. В.

Российский университет дружбы народов

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, Российская Федерация

Аннотация:

Цель работы рассмотреть универсальные эффекты (для всех типов взаимодействий), вытекающие только из законов сохранения энергии и импульса в процессах упругого и квазиупругого рассеяния релятивистских частиц с участием тахионов, люксонов и брадионов.

Процедура и методы исследования. Используя законы сохранения энергии и импульса в системе центра масс, находятся выражения для энергий частиц в общепринятых переменных Мандельштама.

Результаты исследования. Показано, что на основе полученных в работе выражений, предполагающих существование частиц с мнимыми массами – тахионов, можно объяснить ряд явлений, например, механизм генерации космических лучей высоких энергий, а также эффект «красного смещения».

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что результаты, представленные в работе, дают дополнительную ценную информацию об особенностях реакций с участием тахионов.

Ключевые слова: тахион, красное смещение, космические лучи, релятивистская кинематика

RELATIVISTIC KINEMATICS OF TWO-PARTICLE SCATTERING REACTIONS WITH PARTICIPATION OF TACHIONS

N. Samsonenko, M. Semin

Peoples' Friendship University of Russia

ul. Miklukho-Maklaya 6, 117198 Moscow, Russian Federation

Abstract.

Purpose. We consider universal effects (for all types of interactions) arising only from the laws of conservation of energy and momentum in the processes of elastic and quasi-elastic scattering of relativistic particles with the participation of tachyons, luxons and bradyons.

Methodology and Approach. Using the laws of conservation of energy and momentum in the center of mass system, expressions are found for the particle energies in the generally accepted Mandelstam variables.

Results. It is shown that on the basis of the expressions obtained in the work assuming the existence of particles with imaginary masses — tachyons, a number of phenomena can be explained, for example, the mechanism of generation of high-energy cosmic rays, as well as the “red shift” effect.

Theoretical and Practical implications. The results presented in the work provide additional valuable information about the characteristics of reactions involving tachyons.

Keywords: *tachyon*, redshift, cosmic rays, relativistic kinematics

1. Введение

Большинство работ, связанных с существованием частиц, движущихся быстрее, чем скорость света – тахионов, носят философский характер и не ставят перед собой расчётных задач даже на уровне кинематики. Впервые следствия, вытекающие из кинематики реакций частиц с участием тахионов, были изучены Я. П. Терлецким [1].

Основной задачей нашей работы будет описание столкновений частиц высоких энергий с участием тахионов без привлечения законов динамики, специфичных для каждого типа взаимодействия. Мы используем тот факт, что законы сохранения энергии и импульса справедливы для любого типа взаимодействия: слабого, сильного, электромагнитного и гравитационного, то есть они универсальны.

В результате столкновений и распадов элементарных частиц происходят их различные превращения. Основой экспериментального исследования свойств различных частиц, участвующих в реакциях, является измерение импульсных и энергетических характеристик. Распределение вторичных частиц по импульсу и энергии, полученное в результате обработки и анализа наблюдаемых событий, является главным приоритетом при тестировании различных теоретических моделей.

Важность и неизбежность кинематического анализа данных вытекает из постановки задач экспериментального наблюдения за взаимодействием частиц. Такой анализ подразумевает получение информации об энергиях, импульсах, углах рассеяния вторичных частиц при фиксированных импульсах и энергиях начальных частиц. Дополнительные характеристики частиц, такие как заряд, спин и другие внутренние квантовые числа, требуют специальных измерений, и мы рассматривать их при анализе энергии и импульсов частиц не будем.

2. Методы исследования

Основой нашего метода является использование законов сохранения энергии и импульса при предположении, что другие законы сохранения внутренних квантовых чисел (электрического заряда, барионного заряда, лептонных чисел и других) тоже выполняются.

2.1. Тахионы в физике элементарных частиц и космологии

Актуальность выбранной темы подтверждается многими современными теориями, которые используют тахионы в основном как удобный математический

инструмент. При создании таких теорий тахионы специально вводятся для того, чтобы сделать вакуумное состояние нестабильным и спровоцировать его восстановление (самопроизвольное нарушение симметрии), обеспечивая тем самым появление масс у изначально безмассовых частиц [2].

Тахионы в современных физических теориях рассматриваются как некий экзотический объект, совершенно чуждый физике. Однако в действительности с частицами со свойствами тахиона приходится сталкиваться довольно часто в теории. Эта проблема представляется очень интересной как в общих теоретических терминах, так и с точки зрения возможных приложений в астрофизике и физике элементарных частиц.

Начиная с теории элементарных частиц, можно указать на виртуальные частицы, которые составляют необходимый элемент квантовой теории поля. Их квадрат массы произвольный и, в частности, может быть отрицательным, а масса частицы мнимой. Сверхсветовые свойства таких частиц проявляются в том, что причинная функция Грина квантованного поля не исчезает вне светового конуса. Однако в этой области она падает настолько быстро, что принцип неопределённости не позволяет говорить о нарушении причинности.

Тахионы включены в теорию в качестве важнейшего компонента аппарата единой перенормируемой теории слабых и электромагнитных взаимодействий на основе «модели Вайнберга-Салама-Глэшоу». В оригинальных версиях теории струн тахион появляется в спектре масс частиц как основное вакуумное состояние струны. Простое вакуумное состояние нестабильно – его наличие является основой для модификации струнных теорий. Однако иногда такая модификация производится путём анализа самого состояния тахиона. Тахионы в этой модели не проявляют сверхсветовых свойств. Дело в том, что из-за «неправильного» знака квадрата массы тахионов, которые в этой модели являются бозе-частицами, их бозе-эйнштейновская конденсация происходит в состоянии с нулевым импульсом. В результате знак квадрата массы «исправляется», и тахионы, как таковые, перестают существовать.

Во многих современных теориях, которые включают в себя спонтанное нарушение симметрии (например, механизм Хиггса, как он включён в Стандартную модель), существуют поля, которые в определённом смысле можно назвать тахионными.

Тахионные модели способны объяснить инфляцию на ранних этапах развития Вселенной и могут способствовать описанию новых форм космологической темной материи в более поздние эпохи эволюции. Тахионные поля имеют потенциал с нестабильным максимумом в начале координат и падают почти до нуля, поскольку поле стремится к бесконечности. Были проведены исследования тахионной тёмной энергии в зависимости от различных форм этого потенциала [3].

Справедливость сказанного легко проверить на основе канонического гамильтониана скалярного нелинейного тахионного поля [4]:

$$H = \int d^3x \left[\frac{1}{2} (\dot{\varphi}^2 + (\nabla \varphi)^2 - M^2 \varphi^2) + \lambda \varphi^4 \right], \quad (1)$$

где λ – малая константа связи между тахионами.

Обычное определение основного состояния системы (вакуума) как состояния без частиц приводит к нестабильной ситуации из-за отрицательного знака третьего члена. Истинное основное состояние системы соответствует ненулевому и постоянному по пространству и времени среднему значению поля $\langle \varphi \rangle$, возникающему вследствие бозе-конденсации тахионов. Из-за условия минимальной энергии $\varphi = \frac{M}{\sqrt{2\lambda}}$, вводящего «конденсатное» поле $\chi = \varphi - \langle \varphi \rangle$, гамильтониан

легко привести к форме:

$$H = \int d^3x \left[\frac{1}{2} (\dot{\chi}^2 + (\nabla \chi)^2 + 2M^2 \chi^2) + 2\sqrt{\lambda} M \chi^3 + \lambda \chi^4 \right]. \quad (2)$$

Результирующая замена $-M^2 \rightarrow 2M^2$ действительно приводит к превращению тахионов в обычные частицы. Тахионное поле ведёт себя аналогично, в зависимости от статистики Ферми; в этом случае происходит бозе-конденсация пар частиц с нулевым суммарным спином.

Свойства тахионов могут, в принципе, также обнаруживать обычные частицы с «неминимальным» взаимодействием (частицы с аномальными магнитными или квадрупольными моментами, с более высокими спинами и т. д.). В достаточно сильном внешнем поле квадрат эффективной массы такой частицы может стать отрицательным. Простейшим примером такого рода является векторная частица с аномальным магнитным моментом μ в магнитном поле H , параллельном её импульсу. Закон дисперсии частиц $E = c\sqrt{p^2 + M^2 c^2 \pm 2M\mu H}$ приобретает тахионный характер в достаточно сильном поле.

Приведённые примеры, число которых можно умножить, взяты из квантовой теории поля и носят довольно специфический характер. Оказывается, в макроскопической физике есть много примеров «тахионоподобной» ситуации, которая довольно типична для нестабильных систем. Отрицательный «квадрат массы» содержится в законе дисперсии тех колебаний, которые приводят к накоплению системы:

$$\omega^2 = c'^2 k^2 - \Gamma^2. \quad (3)$$

Здесь ω и k – частота и волновой вектор колебаний, c' – характерная скорость, а Γ – обратное время развития неустойчивости. Как и у тахионов, групповая скорость волны больше, чем c . С другой стороны, при малых k частота приобретает мнимые значения, что соответствует увеличению колебаний со временем.

В дополнение ко всему вышесказанному можно привести пример [5], касающийся распространения электромагнитной волны в среде с обратной заселённостью. Пусть частицы среды представляют собой двухуровневые системы с уровнями энергии $E_{1,2}$, а частота перехода $E_1 - E_2$ считается малой по сравнению

с частотой волны. Заселение уровней, отнесённых к единице объёма, обозначим $N_{1,2}$. Тогда обратная заселённость соответствует положительному значению параметра $\xi = (E_1 - E_2)(N_1 - N_2)$. Векторы электрического поля волны E и поляризации среды P связаны соотношением $E = 4\pi\ddot{P}$. С другой стороны, уравнения движения дают соотношение $\ddot{P} = -2\xi|d_{12}|^2 E$, где d_{12} – матричный элемент дипольного момента. Таким образом, мы получаем дисперсионное соотношение с $c' = c$ и $\Gamma^2 = 8\pi\xi|d_{12}|^2$. Отрицательный квадрат эффективной массы фотона в среде с обратной заселённостью отражает нестабильность системы по отношению к переходу на нижний уровень и генерации когерентной электромагнитной волны.

Тахионный газ обладает характерными свойствами так называемой тёмной (скрытой) материи. С одной стороны, невозможно обнаружить отдельную частицу тёмной материи. С другой стороны, тёмная материя образует огромные гало вокруг галактик с почти постоянной плотностью распределения массы внутри гало. Существование таких гало обнаруживается по их гравитационному влиянию на скорости звёзд на периферии галактики. Тахионы имеют схожие свойства. Отдельный тахион не может быть обнаружен. Тахионный газ имеет почти постоянную массовую плотность в гравитационном поле галактики.

Состояния, подобные тахионам, возникли в теории до появления этого термина [6] при рассмотрении различных обобщений известных уравнений. Так, например, в 1952 г. Корбен предложил добавить псевдоскалярную массу [7] к уравнению Дирака, описывающему частицы с левой и правой спиральностью:

$$\left(\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} + m_0 + im_c \gamma_5 \right) \psi = 0. \quad (4)$$

При рассмотрении конкретных задач уравнение Дирака-Корбена привело к тем же результатам, что и уравнение Дирака. Было показано [8], что существует унитарное преобразование

$$\psi_C = U \psi_D \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{m_0}{m} \right)^{1/2} \left[1 + i \frac{m_c}{m} \left(1 + \frac{m_0}{m} \right)^{-1} \right], \quad (6)$$

приводящее уравнение Дирака-Корбена к уравнению Дирака, в котором массовый член принимает вид:

$$m = (m_0^2 + m_c^2)^{1/2}; \quad (7)$$

то есть квадрат массы может принимать разные значения в зависимости от величины псевдоскалярной массы m_c :

$$m^2 = m_0^2 + m_c^2. \quad (8)$$

При $m_0 \neq 0$ и $m_c = i\mu$ ($\mu > 0$) для эффективной массы получаем выражение:

$$m = \pm (m_0^2 - \mu^2)^{1/2}. \quad (9)$$

Таким образом, здесь частица может быть тахионом ($v > c$) с $m_0 < 0$, люксоном ($v = c$) с $m_0 = 0$ и брадионом ($v < c$) с $m_0 > 0$.

Для наглядной иллюстрации сосуществования волны и частицы де Бройль предположил [9], что физическая волна $u(\vec{r}, t)$ (в отличие от фиктивной статистической волны $\psi(\vec{r}, t)$ в традиционной квантовой механике) может быть представлена в виде суперпозиции двух физических волн. Одна из них является сильно локализованной (сингулярной) областью волны u_0 с очень высокой концентрацией энергии, то есть корпускулой, другая является физической волной ϑ , имеющей очень малую амплитуду во всей области распространения, которая может быть связана с нефизической фиктивной волной ψ .

Де Бройлю пришла в голову идея рассматривать частицу как маленькие движущиеся часы. При этом наблюдателями эксперимента были сами элементарные частицы, а не внешние наблюдатели. Такие частицы взаимодействуют друг с другом путём обмена волновыми сигналами. Он приписал каждой частице внутренний периодический процесс с несколькими функциями. Первая функция заключалась в том, что этот процесс служил мерой внутреннего времени, вторая заключалась в обеспечении создания волновых сигналов, посредством которых происходит взаимодействие. Поскольку ритм частицы задаёт масштаб времени и является внутренними часами, только сама частица может быть ориентирована во времени. Де Бройль не знал механизма внутренних колебаний, но он принял это как должное. По частоте этого внутреннего процесса он описывает формулу, руководствуясь одной из фундаментальных идей теории квантов:

$$m_0 c^2 = \hbar \omega_0. \quad (10)$$

Формула справедлива в лабораторной системе отсчёта, но вступает в полное противоречие при использовании релятивистской теории при переходе в другую систему, поскольку она не является лоренц-инвариантным выражением.

В разрешении этого противоречия Луи де Бройль приходит к понятию стационарной волны. Он предположил, что где-то внутри частицы происходит некоторый колебательный процесс с частотой ω_0 . Этот процесс каким-то образом выходит наружу и в каждой точке пространства, окружающего данную частицу, возбуждает колебания одинаковой частоты.

Это утверждение, по нашему мнению, можно представить строгой математической формулировкой. Пусть для частицы в покое во всех точках пространства мы наблюдаем колебательный процесс, описываемый экспонентой $e^{i\omega_0 t}$. То есть в каждой точке пространства, бесконечно удалённой от частицы, происходит колебательный процесс (но не волна) с частотой ω_0 . Все эти процессы имеют одинаковую фазу во всём пространстве. Однако такое поведение характерно только для собственной системы отсчета частицы, в которой мы наблюдаем только колебания, но не волну.

Согласно релятивистскому описанию, время изменяется согласно преобразованиям Лоренца как:

$$t \rightarrow \frac{t - \frac{\beta x}{c}}{(1 - \beta^2)^{1/2}}, \quad \text{где } \beta = \frac{v}{c}. \quad (11)$$

Тогда уравнение для стационарной волны в любой системе отсчёта будет переписано в виде:

$$\begin{aligned} e^{i\omega_0 t} &\rightarrow e^{i \frac{\omega_0}{(1-\beta^2)^{1/2}} \left[t - \frac{\beta x}{c} \right]} = e^{i \frac{\omega_0}{(1-\beta^2)^{1/2}} \left[t - \frac{vx}{c^2} \right]} = \\ &= e^{i \frac{\omega_0}{(1-\beta^2)^{1/2}} t \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]} = e^{i \frac{\omega_0}{(1-\beta^2)^{1/2}} t [1 - \beta^2]} \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, мы находим, что частота в движущейся системе отсчёта преобразуется так же, как и масса:

$$\frac{m_0 c^2}{(1 - \beta^2)^{1/2}} = \frac{\hbar \omega_0}{(1 - \beta^2)^{1/2}}. \quad (13)$$

Поэтому выражение $m_0 c^2 = \hbar \omega_0$ можно, наконец, переписать в релятивистской форме:

$$mc^2 = \hbar \omega. \quad (14)$$

Опишем некоторые следствия теории, представленной де Бройлем [9; 10].

В формуле (12) имеем:

$$\frac{c^2}{v} = V > c, \quad v \cdot V = c^2, \quad (15)$$

где V – фазовая скорость волны де Бройля, движущейся быстрее, чем скорость света (тахин), v – групповая скорость, скорость корпускулы (брадиона).

Эти две скорости должны быть строго разделены в соответствии с их физическим значением, но в то же время они связаны формулой $c^2 = v \cdot V$.

Используя формулу (15) связи фазовой скорости волны и скорости распространения сингулярности, получаем, что стационарная волна распространяется с фазовой скоростью V и имеет длину волны:

$$\begin{aligned} \lambda = V \cdot T = V \cdot \frac{2\pi}{\omega} &= \left[\omega = \frac{mc^2}{\hbar}, \quad \frac{c^2}{v} = V \right] = \\ &= 2\pi \frac{\hbar}{mv} = \frac{h}{p} = \lambda_B \approx \frac{h}{m_0 v}, \quad v \ll c. \end{aligned} \quad (16)$$

Из-за взаимосвязи фазовой скорости волны ($V > c$) де Бройля и скорости частицы ($v \ll c$), получая длину волны де Бройля (16), мы переходим от одной скорости к другой.

Скорость стационарной волны де Бройля (фазовая скорость), а также скорость тахиона всегда больше скорости света, что, в свою очередь, указывает на возможную связь между теорией тахионов и волной де Бройля.

Таким образом, несмотря на необычные свойства тахиона, есть все основания считать его не просто удобным инструментом теории, но реальной частью физической картины мира.

2.2. Формулировка проблемы

Как известно, частицы с массой движутся со скоростью v_B , меньшей скорости света. Мы назовем их брадионами и обозначим буквой B . Безмассовые частицы (фотоны, нейтрино) движутся со скоростью света $v_\Lambda = c$. Их будем называть люксонами Λ .

Кроме того, специальная теория относительности допускает существование частиц, движущихся всегда быстрее, чем скорость света (тахионы), их мы будем обозначать буквой T .

В развитии идей, изложенных в [1], где реакции с участием тахионов (T), брадионов (B) и люксонов (Λ) имеют вид:

$$B' \rightleftharpoons B + T, \quad B' \rightleftharpoons \Lambda + T, \quad \Lambda \rightleftharpoons B + T, \quad T' \rightleftharpoons B + T, \quad (17)$$

мы рассматриваем двухчастичные реакции с участием брадионов, люксонов и тахионов и их превращение в другие частицы с большей или меньшей массой вида:

$$1 + 2 \rightleftharpoons 3 + 4. \quad (18)$$

Здесь одна, две, три или даже все четыре частицы, могут быть тахионами. В этой статье мы предполагаем, что скорость света c равна 1.

Основной кинематической характеристикой частицы в физике взаимодействий элементарных частиц является 4-вектор энергии импульса $\mathbb{P}$, временной компонентой которого является полная энергия частицы p_0 , а пространственными компонентами являются компоненты импульса частицы $\vec{p}$.

С точки зрения кинематики, частицы полностью характеризуются значениями энергии и импульса, комбинацию которых определяет 4-импульс. Последний после преобразований Лоренца трансформируется как 4-вектор. Полный 4-импульс системы сохраняется. Эти простые факты лежат в основе кинематики элементарных процессов рассеяния и распада частиц.

В нашей работе мы используем метрику $(+1, -1, -1, -1)$, $x^\mu = (x^0, \vec{x})$, $x_\mu = (x_0, -\vec{x})$, в которой «ко» и «контравариантные» компоненты векторов разные. Также используются следующие обозначения: вектор энергии-импульса

$P^\mu = (E, \vec{p}) = (p_0, \vec{p})$, который мы будем обозначать далее $\mathbb{P}$. В принятой метрике $\mathbb{P}^2 = E^2 - \vec{p}^2$. Здесь и далее мы принимаем $c = 1$.

Закон сохранения 4-вектора энергии-импульса в произвольной системе координат для процесса (18) имеет вид:

$$\mathbb{P}_1 + \mathbb{P}_2 = \mathbb{P}_3 + \mathbb{P}_4. \quad (19)$$

Здесь для каждой из частиц мы имеем соотношения Эйнштейна:

$$\mathbb{P}^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2. \quad (20)$$

Возможные варианты:

$$m^2 > 0, \quad m^2 = -\mu^2 < 0, \quad m^2 = 0. \quad (21)$$

Для брадионов соотношение Эйнштейна:

$$\mathbb{P}_B^2 = m_B^2 > 0, \quad \text{что есть } E_B^2 - \vec{p}_B^2 = m_B^2 > 0. \quad (22)$$

Здесь энергия браниона E_B всегда является действительной положительной величиной.

Аналогично для люксонов имеем:

$$\mathbb{P}_\Lambda^2 = m_\Lambda^2 = 0, \quad \text{или } E_\Lambda^2 - \vec{p}_\Lambda^2 = 0. \quad (23)$$

Энергию люксонов будем считать положительной.

Для тахионов ($m = i\mu$, $\mu > 0$):

$$\mathbb{P}_T^2 = -\mu^2 < 0, \quad \text{или } E_T^2 - \vec{p}_T^2 = -\mu^2 < 0. \quad (24)$$

Из этого следует

$$E_T^2 = \vec{p}_T^2 - \mu^2, \quad E_T = \pm (\vec{p}_T^2 - \mu^2)^{1/2}. \quad (25)$$

Из двух возможных знаков энергии в (25) мы выбираем положительный (как для обычных частиц), то есть:

$$E_T = +(\vec{p}_T^2 - \mu^2)^{1/2}, \quad (26)$$

что означает всегда $P_T^2 > \mu^2$.

Исходя из законов сохранения энергии и импульса (4 скалярных уравнения), согласно (19) имеем:

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4 \equiv E \quad (27)$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4. \quad (28)$$

Мы предполагаем, что характеристики исходных частиц $m_1, m_2, \vec{p}_1, \vec{p}_2$ (8 скалярных величин), которые взаимодействуют друг с другом, известны, а значения $m_3, m_4, \vec{p}_3, \vec{p}_4$ должны быть найдены.

Таким образом, мы имеем восемь неизвестных скалярных величин, удовлетворяющих четырём скалярным уравнениям (27) – (28) и четырём уравнениям

(20). Поскольку законы сохранения справедливы для всех типов взаимодействий элементарных частиц, полученные формулы оказываются универсальными и не зависят от динамики взаимодействий.

Все реакции рассеяния элементарных частиц можно свести к трём типам. **Первый тип** – это упругие реакции рассеяния частиц $1 + 2 \rightarrow 1' + 2'$. Это самая простая бинарная реакция рассеяния. При таком типе рассеяния в результате столкновения импульсы и энергии исходных частиц изменяются, а все другие характеристики, такие как масса, спин и заряд, не изменяются. Образование новых частиц не происходит. **Второй тип** – это квазиупругие реакции, когда образуются две конечные частицы, и их типы отличаются от типов исходных частиц. Однако также возможно, что разновидность одной из вторичных частиц совпадает с первичной. **Третий тип** – реакции неупругого взаимодействия, в результате которых образуется более двух частиц. Число вторичных частиц при современных энергиях ускорителей может достигать нескольких десятков и даже сотен, образуя струи элементарных частиц.

Реакции взаимодействия элементарных частиц изучаются в различных системах отсчёта. Это часто связано с особенностями экспериментальных установок и с теоретическим удобством описания процесса взаимодействия. Лабораторная система отсчёта соответствует стандартной постановке экспериментов на ускорителях, когда пучок частиц типа 1 попадает в неподвижную цель, состоящую из частиц типа 2. В системе центра масс сталкивающиеся частицы имеют равные по модулю, но противоположно направленные импульсы. То есть $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4 = 0$. На практике система центра масс используется при проведении экспериментов на встречных пучках. Если эксперимент был выполнен в лабораторной системе, для удобства теоретического анализа все кинематические характеристики преобразуются в систему центра масс, где кинематическая картина реакции выглядит более симметричной. Именно поэтому мы рассматриваем нашу задачу в системе центра масс.

Для удобства расчётов в задаче рассеяния вводятся инвариантные переменные s , t , u [11].

По определению:

$$s = (\mathbb{P}_1 + \mathbb{P}_2)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1m_2 \quad (29)$$

в лабораторной системе.

Также

$$s = (E_1^* + E_2^*)^2 \quad (30)$$

в системе центра масс. Значения в системе центра масс отмечены звёздочкой. Физический смысл переменной s – квадрат полной энергии в системе центра масс реакции. Характеризует начальное состояние всей системы.

Квадраты переданных 4-импульсов t и u :

$$t = (\mathbb{P}_1 - \mathbb{P}_3)^2 = (\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_4)^2 \quad (31)$$

$$u = (\mathbb{P}_1 - \mathbb{P}_4)^2 = (\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_3)^2. \quad (32)$$

Переменные s , t , u называются инвариантами Мандельштама. Они связаны линейным инвариантным соотношением:

$$s + t + u = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2. \quad (33)$$

В дальнейших рассуждениях мы будем использовать только инвариант s , поскольку на этом этапе проблема определения углов рассеяния элементарных частиц с участием тахионов не рассматривалась.

В системе центра масс полный импульс сталкивающихся частиц равен нулю, а энергии частиц выражаются через инвариант s и массу следующим образом [12]:

$$E_1^* = \frac{s + m_1^2 - m_2^2}{2\sqrt{s}} \quad E_2^* = \frac{s + m_2^2 - m_1^2}{2\sqrt{s}} \quad (34)$$

$$E_3^* = \frac{s + m_3^2 - m_4^2}{2\sqrt{s}} \quad E_4^* = \frac{s + m_4^2 - m_3^2}{2\sqrt{s}}. \quad (35)$$

3. Результаты и обсуждение

3.1. Энергетические выражения для продуктов реакции и следствия для космологии

Приведём примеры наиболее интересных, с нашей точки зрения, реакций. Сначала рассмотрим двухчастичное квазиупругое рассеяние брадиона на брадионе с последующим рождением двух тахионов:

$$B_1 + B_2 \rightarrow T_1 + T_2. \quad (36)$$

Используя полученные ранее соотношения для энергий начальных и конечных частиц (34) и (35), запишем:

$$E_{B_1}^* = \frac{s + m_{B_1}^2 - m_{B_2}^2}{2\sqrt{s}} \quad E_{B_2}^* = \frac{s + m_{B_2}^2 - m_{B_1}^2}{2\sqrt{s}} \quad (37)$$

$$E_{T_1}^* = \frac{s + \mu_{T_2}^2 - \mu_{T_1}^2}{2\sqrt{s}} \quad E_{T_2}^* = \frac{s + \mu_{T_1}^2 - \mu_{T_2}^2}{2\sqrt{s}}. \quad (38)$$

Из (38) можно сделать вывод, что у тахиона с большей массой будет меньшая энергии, чем у тахиона с меньшей массой, то есть большая часть энергии уносится более лёгким тахионом. Это абсолютно не так при рождении частиц реальной массы, когда большая часть энергии уносится более массивной частицей (а большая часть импульса – лёгкой частицей).

Рассмотрим реакцию квазиупругого рассеяния люксона на брадионе с рождением люксона и тахиона:

$$\Lambda + B \rightarrow \Lambda' + T. \quad (39)$$

Перепишем выражения для энергий конечных и исходных частиц в следующем виде:

$$E_{\Lambda}^* = \frac{s - m_B^2}{2\sqrt{s}} \quad E_B^* = \frac{s + m_B^2}{2\sqrt{s}} \quad (40)$$

$$E_{\Lambda'}^* = \frac{s + \mu_T^2}{2\sqrt{s}} \quad E_T^* = \frac{s - \mu_T^2}{2\sqrt{s}}. \quad (41)$$

Как видно из полученных выражений (41), люксон приобретает энергию, которую можно интерпретировать как «синее смещение». В настоящее время в космологии считается, что свет, приходящий из областей с более слабым гравитационным полем, испытывает гравитационное синее смещение [13]. Как можно заметить, кинематика не запрещает процессы, приводящие к эффекту синего смещения при рассеянии люксонов на брадионах с последующим рождением тахиона.

Рассмотрим реакцию квазиупругого рассеяния брадиона на люксоне с последующим рождением брадиона и тахиона:

$$B + \Lambda \rightarrow B' + T. \quad (42)$$

Выражения для энергий принимают вид:

$$E_B^* = \frac{s + m_B^2}{2\sqrt{s}} \quad E_{\Lambda}^* = \frac{s - m_B^2}{2\sqrt{s}} \quad (43)$$

$$E_{B'}^* = \frac{s + m_{B'}^2 + \mu_T^2}{2\sqrt{s}} \quad E_T^* = \frac{s - \mu_T^2 - m_{B'}^2}{2\sqrt{s}}. \quad (44)$$

Из уравнений (44) мы заключаем, что брадион при взаимодействии с люксоном при рождении тахиона приобретает энергию. Данная реакция может быть интерпретирована как механизм ускорения космических лучей. Поэтому можно предположить, что принципиально новые, чрезвычайно мощные источники энергии могут быть реализованы в космосе, если частицы мнимой массы на самом деле существуют в природе. Действительно, частицы с энергией в миллиарды ТэВ или несколько эксаэлектронвольт, так называемые частицы OMG (частицы «Боже мой»), были зарегистрированы в атмосфере, механизм рождения которых обсуждается [14]. Брадионы при наличии таких реакций на протяжении миллиардов лет всё время ускоряются и приобретают огромные энергии. Такая высокоэнергетическая частица, попадая в атмосферу Земли, в результате многочисленных каскадных реакций создаёт широкий атмосферный поток вторичных субатомных частиц.

Ещё более интересна реакция квазиупругого рассеяния люксона на тахионе с рождением люксонов и брадионов:

$$\Lambda + T \rightarrow \Lambda' + B \quad (45)$$

$$E_{\Lambda}^* = \frac{s + \mu_T^2}{2\sqrt{s}} \quad E_T^* = \frac{s - \mu_T^2}{2\sqrt{s}} \quad (46)$$

$$E_{\Lambda'}^* = \frac{s - \mu_B^2}{2\sqrt{s}} \quad E_B^* = \frac{s + m_B^2}{2\sqrt{s}}. \quad (47)$$

Таким образом, предполагая, что космическое пространство заполнено тахионным газом, проходя через который люксоны, при последующем рождении брадионов (частиц реальной массы), теряют свою энергию, тем самым уменьшая частоту, что можно интерпретировать как эффект «красного смещения» света. В настоящее время космологическое красное смещение связывают с эффектом Доплера, который зависит от динамического удаления источников друг от друга и, в частности, от нашей галактики. Чтобы объяснить этот факт, была введена гипотетическая тёмная энергия, которая недоступна для прямых наблюдений и имеет экзотические свойства. Однако «природа и структура темной энергии совершенно неясны, и, таким образом, трудности переносятся из области теории гравитации и космологии в физику микромира» [15]. В нашей работе результаты, полученные из простых кинематических выражений, позволяют нам взглянуть на эту проблему под другим углом.

4. Заключение

Итак, в предположении, что выполняются только законы сохранения энергии и импульса, получаются следующие результаты.

1. При взаимодействии двух брадионов с последующим рождением двух тахионов, у тахиона с большей массой будет меньшая энергия, чем у тахиона с меньшей массой.
2. При рождении люксона с тахионом в реакциях взаимодействия люксона с брадионом, люксон приобретает энергию (синее смещение света).
3. При квазиупругом рассеянии брадиона на люксоне с последующим рождением брадионов и тахионов, брадион приобретает энергию (высокоэнергетические космические лучи).
4. Когда потоки люксонов проходят через тахионный газ, возможны реакции с образованием брадионов, что, в свою очередь, обеспечивает потерю энергии исходного потока люксонов. Его уменьшенная частота выглядит как явление «красного смещения».

Статья поступила в редакцию 16.05.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терлецкий Ю. П. К кинетике реакций рождения и поглощения тахионов. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 1977. С. 1–7.
2. Сазонов В. Н., Киржниц Д. А. Сверхсветовые движения и специальная теория относительности // Эйнштейновский сборник. М.: Наука, 1973. С. 84–111.
3. Shchigolev V. K., Rotova M. P. A tachyon cosmological model with non-minimal derivative

- coupling to gravity // *Gravitation and Cosmology*. 2012. Vol. 18. Iss. 1. P. 88–92.
4. Rylov Y. A. Tachyon gas as a candidate for dark matter // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика*. 2013. № 2. С. 159–173.
 5. Андреев А. Ю., Киржниц Д. А. Тахионы и неустойчивость физических систем // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 10. С. 1135–1140.
 6. Терлецкий Ю. П. Парадоксы теории относительности. М.: Наука, 1966. 120 с.
 7. Samsonenko N. V., Ndhao F., Ousmane M. A. On γ_5 – invariance of the Dirac-Corben equation for massive neutrinos // *LIII All-Russia conference on problems in dynamics, particle physics, plasma physics and optoelectronics*. М.: PFUR, 2017. P. 41–42.
 8. Bellomo E., Loinger A. Equivalenza fisica dell'equazione di Dirac-Corben con l'equazione di Dirac // *Il Nuovo Cimento*. 1952. Vol. 9. Iss. 12. P. 1240–1241.
 9. Де Бройль Л. Реинтерпретация волновой механики // *Избранные научные труды. Т. 4. Термодинамика изолированной частицы. Переосмысление волновой механики. Отчеты и выступления*. М.: ПРИНТ-АТЕЛЬЕР, 2014. С. 112–138.
 10. Самсоненко Н. В. Интерпретация квантовой механики 100 лет спустя после ее создания // *Метафизика*. 2018. № 2 (28). С. 59–62.
 11. Гольданский В. И., Никитин Ю. П., Розенталь И. И. Основы релятивистской кинематики частиц // *Кинематические методы в физике высоких энергий. Т. 2*. М.: Наука, 1989. С. 1–19.
 12. Бюклинг Э., Каянти К. Энергии и импульсы сталкивающихся частиц, выраженные через инварианты // *Кинематика элементарных частиц*. М.: Мир, 1975. С. 34–38.
 13. Test of the special-relativistic Doppler formula at $\beta=0.84$ / Mac-Arthur D., Butterfield K. B., Clark D. A., Donahue J. B., et al. // *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 56. Iss. 4. P. 282.
 14. Observations of Mkn 421 during 1997 and 1998 in the energy range above 500 GeV with the HEGRA stereoscopic Cherenkov telescope system / Aharonian F. A., Akhperjanian A. G., Andronache M., Barrio J. A., et al. // *Astronomy and Astrophysics*. 1999. Vol. 350 (3). P. 757–764.
 15. Владимиров Ю. С., Кленицкий А. Н., Кречет В. Г. К вопросу об интерпретации космологического красного смещения // *Ярославский педагогический вестник*. 2010. Т. 3. № 2. С. 53–62.

REFERENCES

1. Terletsii Yu. P. *K kinetike reaktsii rozhdeniya i pogloshcheniya takhionov* [To the kinetics of the reactions of birth and absorption of tachyons]. Dubna, Joint Institute for Nuclear Research Publ., 1977, pp. 1–7.
2. Sazonov V. N., Kirzhnits D. A. [Superluminal motions and the special theory of relativity]. In: *Einsteinovskii sbornik* [Einstein collection]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 84–111.
3. Shchigolev V. K., Rotova M. P. A tachyon cosmological model with non-minimal derivative coupling to gravity. In: *Gravitation and Cosmology*, 2012, vol. 18, iss. 1, pp. 88–92.
4. Rylov Y. A. [Tachyon gas as a candidate for dark matter]. In: *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika* [RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics], 2013, no. 2, pp. 159–173.
5. Andreev A. Yu., Kirzhnits D. A. [Tachyons and the instability of physical systems]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)], 1996, vol. 166, no. 10, pp. 1135–1140.
6. Terletsii Yu. P. *Paradoksy teorii otnositel'nosti* [The paradoxes of relativity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 120 p.

7. Samsonenko N. V., Ndhao F., Ousmane M. A. On γ^5 – invariance of the Dirac-Corben equation for massive neutrinos. In: *LIII All-Russia conference on problems in dynamics, particle physics, plasma physics and optoelectronics*. Moscow, PFUR Publ., 2017, pp. 41–42.
8. Bellomo E., Loinger A. Equivalenza fisica dell'equazione di Dirac-Corben con l'equazione di Dirac. In: *Il Nuovo Cimento*, 1952, vol. 9, iss. 12, pp. 1240–1241.
9. de Broglie L. [Reinterpretation of wave mechanics]. In: *Izbrannye nauchnye trudy. T. 4. Termodinamika izolirovannoi chastitsy. Pereosmyslenie volnovoi mekhaniki. Otchety i vystupleniya* [Selected scientific works. Vol. 4. Thermodynamics of an isolated particle. The reinterpretation of wave mechanics. Reports and presentations]. Moscow, PRINT-ATELER Publ., 2014, pp. 112–138.
10. Samsonenko N. V. [Interpretation of quantum mechanics 100 years after its creation]. In: *Metafizika* [Metaphysics], 2018, no. 2 (28), pp. 59–62.
11. Goldansky V. I., Nikitin Yu. P., Rosenthal I. I. [Fundamentals of relativistic particle kinematics]. In: *Kinematicheskie metody v fizike vysokikh energii. T. 2* [Kinematic methods in high energy physics. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 1–19.
12. Byukling E., Kayanti K. [Energies and momenta of colliding particles expressed through invariants]. In: *Kinematika elementarnykh chastits* [Kinematics of elementary particles]. Moscow, Mir Publ., 1975, pp. 34–38.
13. Mac-Arthur D., Butterfield K. B., Clark D. A., Donahue J. B., et al. Test of the special-relativistic Doppler formula at $\beta=0.84$. In: *Physical Review Letters*, 1986, vol. 56, iss. 4, pp. 282.
14. Aharonian F. A., Akhperjanian A. G., Andronache M., Barrio J. A., et al. Observations of Mkn 421 during 1997 and 1998 in the energy range above 500 GeV with the HEGRA stereoscopic Cherenkov telescope system. In: *Astronomy and Astrophysics*, 1999, vol. 350 (3), pp. 757–764.
15. Vladimirov Yu. S., Klenitskii A. N., Krechet V. G. [To the question on interpretation of cosmological red displacement]. In: *Yaroslavskii pedagogicheskii vestnik* [Yaroslavl Pedagogical Bulletin], 2010, vol. 3, no. 2, pp. 53–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самсоненко Николай Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физических исследований и технологий Российского университета дружбы народов;
e-mail: nsamson@bk.ru;

Сёмин Михаил Валерьевич – аспирант Института физических исследований и технологий, Российского университета дружбы народов;
e-mail: mvsemin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai V. Samsonenko – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Institute of Physical Research and Technology, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: nsamson@bk.ru;

Michael V. Semin – postgraduate student at the Institute of Physical Research and Technology, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: mvsemin@yandex.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Самсоненко Н. В., Сёмин М. В. Релятивистская кинематика двухчастичных реакций рассеяния с участием тахионов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 2. С. 102-117.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-102-117

FOR CITATION

Samsonenko N. V., Semin M. V. Relativistic kinematics of two-particle scattering reactions with participation of tachions. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 102–117.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-102-117