

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

*С 844*

**P2-87-812**

**В.Н.Стрельцов**

**ДЛИНА ФОРМИРОВАНИЯ  
И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДЛИНА**

**1987**

1. Как известно, многие электромагнитные процессы, происходящие при взаимодействии быстрых заряженных частиц с веществом, разыгрываются в большой пространственной области вдоль импульсов частиц. Длина этой области, она называется длиной когерентности или длиной формирования излучения, быстро растет с ростом энергии частиц.

Понятие длины формирования было введено И.М.Франком<sup>/1/</sup> при рассмотрении излучения равномерно движущегося осциллятора в преломляющей среде. Он определил ее как отрезок пути, с которого все волны излучаются осциллятором (источником) в фазе.

В дальнейшем оказалось, что длина формирования играет важную роль в процессах излучения быстрых частиц (см., например,<sup>/2, 3/</sup>). Знание этой величины позволяет не только представить себе качественные особенности картины излучения, но и с хорошей точностью оценить количественно такие характеристики излучения, как спектр, угловое распределение, полные потери и т.д.

Рост длины формирования с увеличением энергии наводит на мысль о ее возможной связи с другой важной характеристикой — релятивистской длиной, определяющей, в частности, продольные размеры быстро движущихся объектов. Указанные величины играют все большую роль при описании взаимодействий частиц высоких энергий. Ниже мы и затронем эти вопросы.

2. Рассмотрим движение быстрой заряженной частицы вдоль прямой линии. В каждой точке своего пути частица излучает плоскую волну частоты  $\omega$  с волновым вектором  $k$ . При этом разность фаз  $\Delta\phi$  волн, излучаемых частицей под углом  $\theta$  к ее импульсу, в моменты времени  $t$  и  $t + \ell/v$  будет равна

$$\Delta\phi = \omega \frac{\ell}{v} - k\ell \cos\theta, \quad (1)$$

где  $\ell$  — пройденный путь, а  $v$  — ее скорость. Длина формирования  $\ell_f$  определяется как расстояние, на котором  $\Delta\phi = 1$ . Тогда легко видеть, что

$$\ell_f = \frac{v}{\omega(1 - v \cos\theta)}. \quad (2)$$

Таким образом, по определению  $\ell_f$  — это длина пути, с которой в точку наблюдения волны приходят с разностью фаз, не большей  $\pi$ , то

есть с волновой точки зрения одновременно. Вместе с тем  $l_f$  — численная мера спектрального и углового распределения излучения. Эти характеристики излучения пропорциональны квадрату длины формирования.

Отметим также, что к формуле (2) можно прийти, если трактовать длину формирования как расстояние, на котором происходит "отрыв" фотона от излучающего его заряда.

Наше рассмотрение было чисто классическим, то есть мы считали, что заряженная частица движется равномерно, и не учитывали, например, отдачи, возникающей при излучении кванта. В квантовой теории величина, имеющая смысл длины формирования, вводится<sup>/4/</sup> на основе матричного элемента, содержащего под знаком интеграла по пространственным координатам множитель  $\exp(i\vec{q}\vec{r})$ , где  $\vec{q}$  — переменный импульс,  $\vec{q} = \vec{p}_0 - \vec{p} - \vec{k}$ ,  $\vec{p}_0$  и  $\vec{p}$  — импульсы заряда до и после излучения,  $\vec{k}$  — импульс излученного фотона.

Экспонента определяет эффективное значение  $\vec{r}$ , вносящее основной вклад в матричный элемент. При высоких энергиях процесс излучения разыгрывается вдоль импульса частицы, поэтому существенны

$$q_{||} = p_0 - p - k \approx \frac{\omega m^2}{2E_0 E}, \quad (3)$$

где  $E_0$  и  $E$  — энергии электрона до и после излучения,  $m$  — его масса. Отсюда следует, что длина формирования фотона определяется величиной

$$l_f = \frac{2E_0 E}{m^2 \omega}. \quad (4)$$

3. Поскольку все частицы обладают волновыми свойствами, то понятие длины формирования может быть введено, в частности, и для процессов испускания пионов, то есть в сильных взаимодействиях. На основании (1) и (2) для длины формирования достаточно медленного пиона с 4-импульсом  $p_\pi^i(E_\pi, \vec{p}_\pi)$  найдем

$$l_f = \frac{p_0}{E_0 E_\pi - p_0 p_\pi} = \frac{p_0}{p_0^i p_\pi^i}, \quad (5)$$

где  $p_0^i(E_0, \vec{p}_0)$  — 4-импульс налетающего адрона ( $E_0 \gg E_\pi$ ).

В случае множественного рождения пионов при высоких энергиях мы будем иметь дело с некоторой эффективной  $l_f$ . В отличие от процесса излучения фотонов образующиеся пионы могут иметь скорости, близкие к скорости движения налетающего адрона, и "отрыв" может происходить на значительных расстояниях. Кроме того, мы будем иметь случаи "отрыва" излучателя от своего излучения.

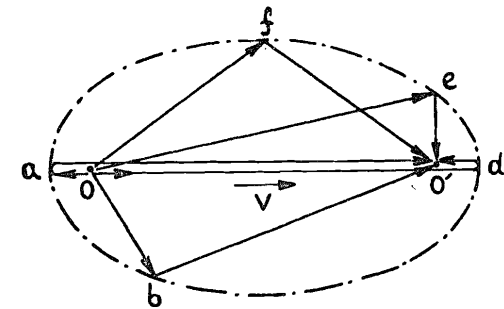
С другой стороны, длина формирования вторичных частиц вводится, в частности, на основе партонной модели строения адронов или других соображений (см., например, обзор<sup>/5/</sup>). При этом в первом случае  $l_f \sim EM^{-2}$ , где  $E$  — энергия адрона,  $M$  — его масса.

4. То, что характеризующие взаимодействия частиц высоких энергий продольные расстояния и, в частности, обсуждаемые длины формирования растут с увеличением энергии, стало уже чем-то привычным (см., например,<sup>/5/</sup>). При этом вполне естественно думать, что упомянутые продольные расстояния должны определяться, особенно в сильных взаимодействиях, продольными размерами сталкивающихся частиц. Но продольный размер нуклона (ядра) мишени постоянен, а согласно традиционным представлениям продольный размер налетающего адрона на основании формулы лоренцева сокращения стремится к нулю с ростом энергии. Указанные факты трудно согласовать между собой. По нашему мнению, путь устранения отмеченной трудности связан с применением концепции релятивистской длины<sup>/6/</sup> и вытекающей из нее "формулы удлинения".

Простая и наглядная иллюстрация этого основывается на современном представлении взаимодействующей частицы в виде облака виртуальных квантов. Для нуклона, например, раньше мы говорили о пионном облаке, а в последнее время — о составляющих его партонах, отождествляемых сейчас с кварками и глюонами.

В системе покоя нуклона  $S^0$  эффективное ("усредненное" по времени) виртуальное облако образует сферу радиуса  $l_0$ . В  $S$ -системе нуклон (его центр инерции) движется со скоростью  $v$  и занимает последовательно положения  $O$  и  $O'$  (см. рисунок). По наблюдениям из  $S$  некоторая испущенная виртуальная частица  $a$  до момента возвращения пройдет расстояние  $l_a = (1 - v/u)l_0\gamma$ , а симметричная ей частица  $d$  —  $l_d = (1 + v/u)l_0\gamma$ . Здесь  $l_0$  — расстояние, пройденное частицами, а  $u$  — их скорость в  $S_0$ ,  $\gamma = (1 - v^2)^{-1/2}$ . При этом среднее расстояние  $l = l_0\gamma$ . В обратных направлениях будем иметь  $l_a = (1 + v/u)l_0\gamma$  и  $l_d = (1 - v/u)l_0\gamma$ .

Таким образом, соответствующее сейчас расстояние составит снова  $l_0\gamma$ . Более того, для каждой частицы  $l_a = l_d = l_0\gamma$ . Этот результат можно считать еще одним проявлением релятивистской "формулы



Пространственно-временная картина движения виртуальных составляющих нуклона.

удлинения" \*. На рисунке показаны пути движения и других частиц. В целом же в S-системе облако виртуальных квантов будет иметь форму эллипсоида вращения, вытянутого в направлении движения.

Представленная картина позволяет сделать качественное заключение, что указанный эллипсоид будет фактически определять ту область, где происходит взаимодействие контитуэнтов нуклона с пробной частицей (мишенью), которую для простоты считаем точечной. При этом, что особенно существенно, характер "отрыва" рожденной частицы будет зависеть от "места ее рождения". Пусть, например, эта релятивистская частица движется вперед. Очевидно, что если она родилась вблизи точки "0", то, чтобы "оторваться" от нуклона, ей нужно пройти расстояние порядка его продольного размера, то есть  $2\ell - 2\ell_0 \gamma$ \*\*\*.

Таким образом, при учете конечности размеров нуклона длина формирования вторичных релятивистских ( $\lambda \ll \ell$ ) частиц, по сути дела, будет определяться релятивистской длиной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Франк И.М. – Изв. АН СССР, сер. физ., 1942, т.6, с.3.
2. Болотовский Б.М. – Труды ФИАН, 1982, т.140, с.95.
3. Ахиезер А.И., Шульга П.Ф. – УФН, 1987, т.151, с.385.
4. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. М.: ИИЛ, 1956, §25.
5. Николаев Н.Н. – УФН, 1981, т.134, с.369.
6. Стрельцов В.Н. Сообщение ОИЯИ P2-86-470, Дубна, 1986; P2-87-135 и P2-87-223, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 ноября 1987 года.

\* По существу, эти процессы – своего рода модификация процедуры измерения релятивистской длины.

\*\* Общий характер картины сохранится и при учете нецентральных движений.

\*\*\* Учет промежуточных возможностей ("усреднение") дает коэффициент 1/2.

Стрельцов В.Н.

P2-87-812

Длина формирования и релятивистская длина

Обращается внимание на возможную связь длины формирования с релятивистской длиной. Именно рост длины формирования с увеличением энергии находится в соответствии с вытекающей из концепции релятивистской длины "формулой удлинения" для продольных размеров. Отмечается, что при учете конечности размеров элементарных частиц длина формирования может фактически определяться релятивистской длиной.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Strel'tsov V.N.

P2-87-812

Formation Length and Relativistic Length

A possible connection of formation length with relativistic length is pointed to. Namely, growth of formation length with increasing energy is in accordance with the "elongation formula" for longitudinal dimensions following from the concept of relativistic length. It is noted that taking into account the finiteness of dimensions of elementary particles the formation length could be in fact determined by relativistic length.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987