

О ПРОВЕРКЕ ПРЕДСКАЗАНИЙ КХД О СТРУЯХ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
НУКЛОНОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ "ПАМИР - АНИ"

Ю. А. Смородин

УДК 539.171.017

Рассмотрены предсказания КХД для образования струй адронов с большим поперечным импульсом во взаимодействиях нуклонов в области энергий  $10^{15}$  -  $10^{16}$  эВ. Указаны возможности проверки закона обратной пропорциональности сечения образования струй четвертой степени поперечного импульса струи в экспериментах типа "Памир - АНИ".

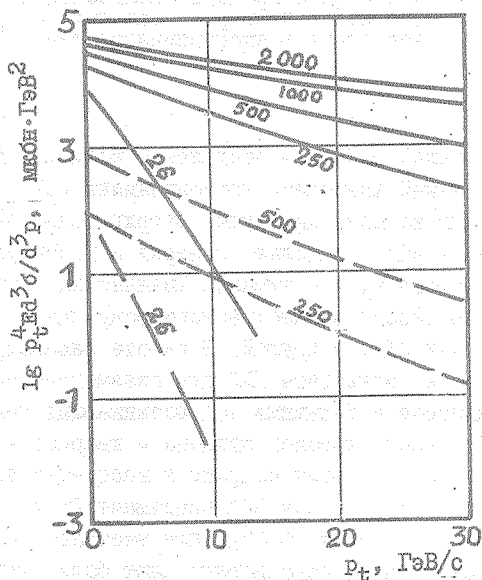
Цель настоящей работы - обсуждение возможностей сопоставления предсказаний квантовой хромодинамики (КХД) с данными опытов с нуклонами космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент "Памир - АНИ") с целью проверки и уточнения положений КХД, с одной стороны, и понимания физических причин нарушения скейлинга в процессах множественного рождения частиц при сверхвысоких энергиях /1/, с другой. В работе рассматриваются инфракрасностабильные результаты КХД для взаимодействий с образованием струй адронов с большими  $p_t$ , возникающих как результат жесткого рассеяния партонов нуклона - кварков и глюонов.

Особый интерес к этому вопросу в настоящее время обусловлен тем, что в то время как КХД принимает (для точечных частиц) зависимость сечения  $d\sigma/dp_t^2$  для жесткого рассеяния вида  $p_t^{-4}$ , эксперименты на ускорителях дают более крутой ( $p_t^{-8}$  -  $p_t^{-6}$ ) ход. Современная КХД при учете всех особенностей процесса при малых энергиях /2/ не вступает в противоречие с экспериментом, но прямое подтверждение закона  $p_t^{-4}$  опытом не получено.

При рассматриваемых энергиях эффекты, связанные с малостью

энергии, не существенны и закон  $p_T^{-4}$  должен наблюдаться в эксперименте. При более крутых зависимостях струи во взаимодействиях практически не наблюдаемы.

Оценки сечения образования струй при сверхвысоких энергиях проведены на основе работы Фейнмана, Филда и Фокса /2/, содержащей предсказания КХД для величин инвариантного сечения  $\text{вд}^3\sigma/\text{д}^3p$  для нового поколения ускорителей с энергиями нуклонов  $E_N$  в  $\sqrt{s}$ -системе 250 и 500 ГэВ. Рассчитаны сечения в зависимости от  $p_T$  при величине  $x_{||} = 0$  и зависимости сечений от  $x_{||}$  для значений  $x_{\perp} = 0,075$  и  $0,125$  для процессов  $N + N \rightarrow \pi^0 + X$  и  $N + N \rightarrow X + \text{струя}$ . Сопоставление расчетов по КХД с ускорительными данными при энергиях нуклонов  $E_N$  меньших 26 ГэВ /2/ обнаруживает согласие результатов.



Р и с. 1. Зависимость инвариантного сечения  $\text{вд}^3\sigma/\text{д}^3p$  от поперечного импульса  $p_T$  (ГэВ/с) для нуклонов с энергией  $E$  (ГэВ) при  $x_{||} = 0$ . Сплошная линия - образование струй, пунктир -

$\pi^0$ -мезонов

Таблица I

$\Delta x_{II}$	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	Сумма	$\langle x_{II} \rangle$
Процесс			$x_{I} = 0,075$					
$q + \varepsilon$	0,60	0,48	0,32	0,19	0,05	0,01	0,165	0,19
$\varepsilon + \bar{g}$	0,52	0,46	0,22	0,07	0,02	0,00	0,120	0,15
$q + \bar{q}$	0,18	0,16	0,12	0,07	0,03	0,01	0,042	0,30
Сумма	1,30	1,10	0,66	0,33	0,10	0,02	0,35	0,18
			$x_{I} = 0,125$					
Сумма	1,44	1,32	0,89	0,50	0,20	0,04	0,44	0,20

Отсылая читателя за деталями выбора теоретических вариантов и проведения расчетов к оригинальной работе, ограничимся результатами, представленными на рис. 1, и табл. 1, дающей отношение  $\text{Ed}^3\sigma/d^3p(x_{\parallel}, x_{\perp})/\text{Ed}^3\sigma/d^3p(0, x_{\perp})$ .

Компьюляция расчетов /2/ позволяет представить величину  $p_{\perp}^4 \text{Ed}^3\sigma/d^3p$  при  $x_{\parallel} = 0$  в виде зависимостей от  $x_{\perp}$  при фиксированных значениях  $p_{\perp}$ , позволяющих экстраполировать расчеты на энергии  $E_N = 1000$  ГэВ ( $E_0 = 2 \cdot 10^{15}$  эВ) и 2000 ГэВ ( $E_0 = 8 \cdot 10^{15}$  эВ), с которыми имеют дело эксперименты "Памир - АНИ".

Интересующее нас полное сечение образования струй можно теперь получить интегрированием, согласно соотношению

$$\sigma(>p_j) = \pi \int_0^{p_{\text{стр}}} dp_{\perp}^2 \int_0^1 dx_{\parallel} \text{Ed}^3\sigma/d^3p(x_{\parallel}, p_j). \quad (1)$$

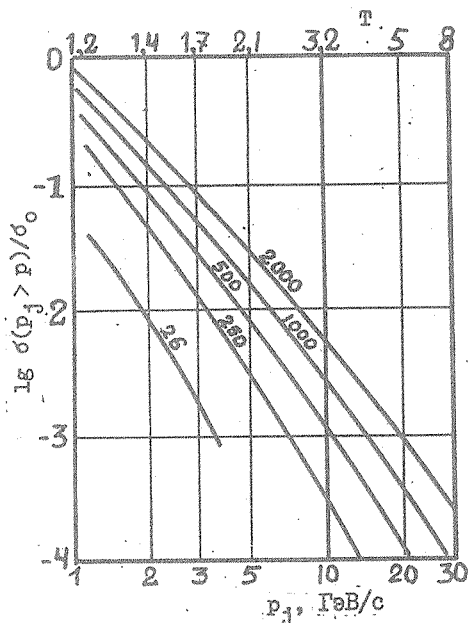
Считая, что переменные факторизуются, можно представить второй интеграл в виде  $\text{Ed}^3\sigma/d^3p(0, p_j)S$ , а во втором приближении учесть слабую зависимость  $S(x_{\perp}) = 0,23 + 2,5 x_{\perp}$ , следующую из работы /5/ для области  $x_{\perp} \leq 0,1$ , которая и дает подавляющий вклад в полное сечение. На рис. 2 представлены окончательные результаты в виде отношения сечения с образованием струй к полному сечению взаимодействия нуклонов.

Применяя оценки рис. 2 к нуклон-ядерным взаимодействиям в атмосфере, нужно иметь в виду, что доля струйных событий, по-видимому, возрастет (как  $A^{1/3} \approx 2,4$ ), так как сечение образования струй растет с  $A$  быстрее (по-видимому, как  $A$ ), чем полное сечение. При малых энергиях эксперимент /3/ дает зависимость, близкую даже к  $A^{4/3}$ .

Таким образом, согласно КХД образование струй становится при энергиях выше  $10^{15}$  эВ существенным процессом. Струи получают долю энергии порядка  $\langle x_{\parallel} \rangle \approx 15 - 20\%$ .

КХД предсказывает, что кварки и глюоны с большим  $p_{\perp}$  должны инициировать каскады партонов, и определяет /7,4/ число частиц в каскаде  $N_p$ . Для кваркового каскада число партонов  $N_p$  с долей энергии выше  $z_M = E_M/E_q$  может быть представлено формулой

$$N_p(>z_M) = 0,18/\sqrt{V} \exp(V - 2,24), \quad \text{где } V = 3,1 \sqrt{-\ln z_M}. \quad (2)$$



Р и с. 2. Отношение сечения взаимодействий с образованием струй к полному сечению при различных энергиях нуклонов (ТэВ)

Для грубых оценок в практически важной области  $0,1 > z_M > 0,0001$  можно считать  $N_p = (10z_M)^{-2/3}$ .

Последующий процесс адронизации кварк-глюонного каскада в струю адронов не может быть рассчитан КХД. Рассматривая экспериментальные данные о числе адронов в струях при аннигиляции  $e^+e^-$  при энергиях струй 1 - 16 ГэВ, можно сделать заключение /4/, что число адронов в струе  $N_a$  изменяется с энергией пропорционально числу  $N_p$ . Эмпирическое соотношение /4/ (для заряженных адронов) имеет вид

$$N_a = 1 + N_p(E_M = 0,2 \text{ ГэВ}). \quad (3)$$

Полученные с помощью формул (2) и (3) оценки полного числа заряженных адронов в средней струе ( $x_{||} = 0,15$ ) и числа адронов, регистрируемых в камере с энергетическим порогом регистрации 15 ТэВ, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Энергия $E_N$ , ГэВ	250	500	1000	2000
Полное число заряженных адронов	31	45	64	91
Число $\pi^0$	16	22	32	45
Число регистрируемых заряженных адронов	0,2	1,5	4,5	7,4

Для струйных взаимодействий характерна асимметрия разлета частиц. Величина  $T = \Sigma R_{\parallel} / \Sigma R_{\perp}$  — отношение суммы проекций расстояний между частицами  $R$  на мишенную диаграмму на плоскость вылета струи к сумме перпендикулярных проекций — может быть оценена соотношением

$$T = 1 + \pi p_{\perp} / 4 \langle p_{\perp} \rangle N_a \quad (4)$$

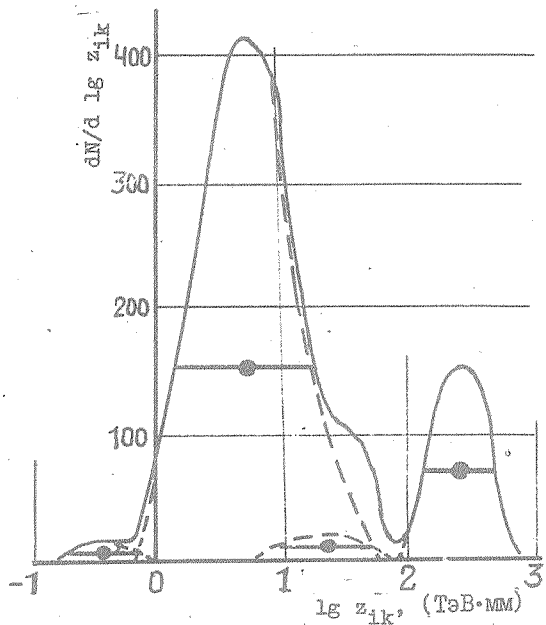
На рис. 2 рядом со значением  $p_{\perp}$  показана ожидаемая величина  $T$  для  $\sim 10$  адронов, уносящих около половины энергии струи, что примерно соответствует наблюдаемым в камере адронам. Среднее значение  $\langle T \rangle = 1,3 - 1,5$ . Таково же и объясненное струям увеличение среднего поперечного импульса адронов при энергиях  $> 10^{15}$  эВ. Эта величина близка к результатам эксперимента "Памир" /1/.

Ядерно-каскадный процесс в атмосфере смазывает асимметрию. Экспериментальные возможности наблюдать на высоте Памира ядерно-электронные каскады с малым числом  $n$  взаимодействий нуклона в атмосфере выше камеры, при отборе по энергии лидирующего нуклона  $E_L$ , согласно /5/, даны в табл. 3, где сравниваются варианты КХД и скейлинга (СК). Точность и надежность эксклюзивного анализа таких событий существенно растет при дополнении рентгенэмульсионной камеры установкой ШАЛ (эксперимент "АНИ"), измеряющей энергию  $E_0$ , указанную в табл. 3.

Таким образом, изучение образования струй в интервале энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ возможно при экспозициях 5 - 10 тыс.  $m^2 \cdot год$ . Установить закон  $p_{\perp}^{-4}$  можно уже и при меньшей статистике.

Таблица 3

Энергия $E_1$ , ГэВ	Число событий на взаимодействие, $1000 \text{ м}^2 \cdot \text{год}$	$n = 0$		$n = 1$		$n = 2$		$n > 2$
		Доля событий	$E_0$	Доля событий	$E_0$	Доля событий	$E_0$	
100	КД СК	34%	100	38%	300	18%	1000	0
		9%	100	22%	200	26%	400	43%
300	КД СК	48%	300	37%	1000	15%	4000	0
		9%	300	22%	600	25%	1200	44%
1000	КД СК	60%	1000	32%	4000	8%	2000	0
		8%	1000	21%	2000	25%	4000	46%



Р и с. 3. Распределение частиц в событии № P7804 по величине парного поперечного импульса  $z_{ik}$  (ТэВ·мм)

Для анализа взаимодействий с образованием струй, наряду с исследованием асимметрии, представляется информативным также изучение распределений событий по величинам парных потоков энергии адронов  $K_{ij} = \sin Q_{ij} E_i E_j / (\Sigma E)^2$ , предположенное в /6/. В /6/ показано, что распределение  $dN/dK$  инфракрасностабильно и может быть рассчитано в рамках КХД. (Величина  $K_{ij}$  близка к используемой при анализе семейств  $\gamma$ -квантов величине  $z_{ik} = R_{ik} E_i E_k / (E_i + E_k) / 7/$ ).

На рис. 3 для примера показаны мишенная диаграмма и  $dN/d \lg z_{ik}$  для события № P7804, обнаруженного таджикской группой, с ярко проявляющейся струйной структурой. Регистрация нуклона с энергией около половины от  $E_0$  оправдывает, согласно последней таблице, интерпретацию события № P7804 как единственного



взаимодействия первичного нуклона с образованием двух почти компланарных с адронем струй, балансирующих поперечные импульсы около 5 ГэВ/c /8/.

Таблица 4

Процесс	Число пар	$\langle \lg z_{ik} \rangle$	$D(\lg z_{ik})$
Электромагнитное размножение	42	-0,37	0,17
Рассеяние $\pi^0$ -мезонов в струе	1788	0,69	0,37
Рассеяние $\pi^0$ относительно нуклона	61	1,30	0,39
Рассеяния струя - струя	310	2,27	0,20

Вклад в распределение  $dN/d \lg z_{ik}$  различных процессов указан в табл. 4.

Поступила в редакцию  
17 июня 1981 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Collaboration Pamir, Chakaltay, Fuji, Preprint ICR-86-81-2, Tokyo (1981); Nuclear Phys., B191, p. 1, (1981).
2. R. P. Feinman, R. D. Field, G. C. Fox, Phys. Rev., D18, 3320 (1978).
3. S. Bromberg et al., Report, Fermilab Conference 77/62-exr., (1977).
4. Я. И. Азимов, Ю. Л. Докшицер, В. А. Хозе, УФН, 132, 443 (1980).
5. Ю. А. Смородин, Краткие сообщения по физике ФИАН № 12, 3 (1981).
6. Ю. Л. Докшицер, ЭТФ, 71, 1216 (1977); Phys. Rep., 58C, 269 (1980).
7. A. V. Aranasenko, L. T. Baradzei, Yu. A. Smorodin, Proc. ICCR, Tokyo, 1974, p. 27.
8. L. T. Baradzei, I. B. Bobojanov, N. E. Gubar, Proc. ICCR, Kyoto, 1979, v. 2, p. 279.