

Москва 2006



Р.А.Мухамедшин Институт ядерных исследований РАН

01.04.23

Феноменологические ограничения на модель неупругих взаимодействий адронов с ядрами при энергиях выше 10¹⁵ эВ по данным рентген-эмульсионных камер

- Исследование мягких и полужестких процессов множественной генерации наиболее энергичных частиц во взаимодействиях адронов с легкими ядрами при E>10¹⁶ эВ (√s ≥ 4 ТэВ) пока возможно лишь в космических лучах
- Анализируются характеристики компонент ядерноэлектромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере (ШАЛ, ү-*h* семейства, группы мюонов).
- Первоначальная концепция неупругого *p-N*¹⁴ взаимодействия (Г.Т. Зацепин 1949, Г.В.Ватагин 1949):
 - эффект лидирования \Rightarrow лидер уносит ~0,5 $E_0 \approx (1-K_{inel})E_0$
 - сечение σ_{inel} и K_{inel} слабо зависят от энергии
- 1969: Скейлинг (F), автомодельность (ММТ), предельная фрагментация (ВСҮҮ)

- Современная (наиболее популярная) концепция мягких и полужестких *p*-N¹⁴ взаимодействий (в т.ч. по данным РЭК):
 - модель кварк-глюонных струн (МКГС)
 - медленный рост сечения с энергией
 - эффект лидирования и медленный рост с энергией К_{inel} (вплоть до ~0,85 при Е₀ ≥10¹⁶ эВ (по данным РЭК):
- Число КГС моделей и их версий постоянно растет: QGSJET (98, 01, II), SIBYLL (1.7, 2.1), DPMJET, VENUS, NeXuS (1 – 3), EPOS.....
- Ни одна из моделей не описывает все результаты в ШАЛ (даже в рамках одного эксперимента!)
- Некоторые результаты этими моделями игнорируются

Эксперименты с РЭК

- более чувствительны к характеристикам взаимодействий и, следовательно, моделям
- дают возможность откинуть некоторые модели

Цель диссертации

- Исследование свойств адрон-ядерных взаимодействий в фрагментационной области при энергиях E₀ ≥ 10¹⁶ эВ (√s ≥ 4 ТэВ) на основе сравнительного анализа экспериментальных данных РЭК и результатов моделирования;
- разработка феноменологической модели взаимодействий при этих энергиях, способной дать одновременное описание наиболее широкого круга результатов нескольких экспериментов в единых рамках, что значительно повышает надежность выводов; определение феноменологических ограничений на характеристики взаимодействий, необходимых для разработки строгой теории процессов;
- выработка предложений по проверке разработанной модели.

Введение



Введение

Необходимость моделирования

- Большой объем экспериментальных данных
- Сильные флуктуации в
 - атмосфере
 - РЭК
- Сильное поглощение э малая вероятность регистрации
- Флуктуации дают вклад в любую характеристику
- Сильная выборка в зависимости от критериев отбора
- Для любого нетривиального результата надо считать флуктуационный фон
- Необходима программа моделирования методом Монте-Карло, воспроизводящая максимально возможно широкую совокупность экспериментальных данных и теоретических предсказаний

Для эксперимента «Памир»: коды *MSF* и *MC0* моделирования ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере

К<mark>од</mark> MSF

- Код MSF (1976) был одной из первых программ, учитывающей нарушение скейлинга в пионизационной области
- Использовался для исследования широкого круга проблем в эксперименте «Памир» (характеристики гамма- и адронных семейств, гало и т.д.) (в том числе, в НИИЯФ МГУ)
- Основные характеристики:
 - скейлинг в фрагментационной области (x_F 20,1) (доминир.идея)
 - K_{inel} = 0,5
 - σ_{inel} = f(E0)
- Результаты, полученные Сотрудничеством «Памир», в том числе с использованием кода MSF, дали толчок развитию моделей КГС (Кайдалов, Тер-Мартиросян, Шабельский)

Код МСО

- Код *МСО* (1990) был первым кодом моделирования сильных взаимодействий при развитии ЯЭК, учитывающим одновременно
 - модель кварк-глюонных струн (Шабельский, КТ-М 1988) ⇒ рост σ_{inel} и *K*_{inel}
 - модель полужестких струй (министруй) (ГЛР 1983): Q_T ≥ 2 ГэВ/с
 ⇒ при E₀~10¹⁶ эВ ~50% частиц рождается через этот канал
 - ускорительные данные: генерация частиц (вкл. странные, чармированные, резонансы), КХД струй; дифракционные процессы
- основная программа для Сотрудничества «ПАМИР»
- близок к коду QGSJET 98, разработанному на несколько лет позже

Код MQ

- Код MQ (Дунаевский 1990) использовался Сотрудничеством «ПАМИР»
- очень близок к *МСО*, но характеризуется
 - высокой (~0,7) вероятностью неупругой перезарядки $\pi \pm A \to \pi^0 + X$..
 - более быстрым ростом K_{inel} (до ~0,85 при E_0 ~10¹⁶ эВ в $p \rightarrow p$ +Х...)
 - отсутствием генерации КХД-струй

Коэффициент неупругости



Сравнение экспериментальных и расчетных данных при $\langle E_0 \rangle \le 5 \cdot 10^{15}$ эВ

Электромагнитная компонента: E₂ ≈ 0,01 E0

Тип данных	$\beta_{\gamma} (\geq 5 \text{ T} \circ B)$	Лит.
Расчет МСО	2.11 ± 0.03	
	2.07 ± 0.06	[84]
Эксперимент	2.00 ± 0.08	[82]
	2.00 ± 0.05	[83]

По сравнению с *MC0* (и экспериментом) *MSF* дает:

- более высокие интенсивности
- более пологие спектры

- Расчетные интегральные спектры немного круче экспериментальных спектров, но!
- часть пятен потемнения на пленке создается не одиночными γ-квантами, а узкими ЭМ каскадами из воздуха
- переоценка энергии и ужесточение измеряемого спектра ($\Delta\beta \lesssim 0,15$), т.е. $\beta_{real} \approx 2,15 \rightarrow \beta_{meas} \sim 2,0$

МСО: Расчетные спектры по Е, согласуются с экспериментальными

Сравнение экспериментальных и расчетных данных при $\langle E_{0} \rangle \le 5 \cdot 10^{15}$ эВ



Сравнение экспериментальных и расчетных данных при $\langle E_{n} \rangle \leq 5 \cdot 10^{15}$ эВ

Гамма-адронные семейства: Σ(E_γ+E_h^(γ)) ≈ 0,1 〈E0〉 (группы генетически связанных частиц (γ/e±, h) с E ≳ 5 ТэВ)

Тип	Интенсивно	Лит.	
данных	полная	вертикальная	
	$({ m M}^2{f \cdot}{ m год})^{-1}$	$({ m M}^2{ m \cdot}{ m rod}{ m \cdot}{ m cp})^{-1}$	
Эксперимент	0.38 ± 0.10	0.67 ± 0.15	[10]
MC0	0.37 ± 0.02	0.70 ± 0.08	adan 1938

MC0 согласуется с экспериментом по интенсивности множественности γ и h

Тип		$\langle n'_{\gamma} \rangle$	$\langle n_h angle$	$W_n(n_h=0)$	Лит.
данных	РЭК				
Эксперимент	Pb	$10.6 \pm .6^{\star}$	$2.2 \pm .3$	$0.20 \pm .07$	[10]
MC0 $\left\{ \begin{array}{c} K_{\gamma}^{1} \\ K^{2} \end{array} \right.$		$10.7 \pm .3^{\star}$	$2.0 \pm .2$ 2.6 ± 2	$0.18 \pm .03$	
	С	10.0 + 2*	$2.0 \pm .2$ 0.02 + 1 [‡]	$0.54 \pm 0.3^{\ddagger}$	
MC0		$9.8 \pm .2^{*}$	$0.92 \pm .1^{\sharp}$ $0.90 \pm .1^{\sharp}$	$0.54 \pm .03^{4}$ $0.48 \pm .04^{\sharp}$	[80]

* E_{thr}= 4ТэВ; [#] E_{thr} = 10 ТэВ

MSF завышает интенсивность по сравнению с экспериментом

Сравнение экспериментальных и расчетных данных при $\langle E_n \rangle \le 5 \cdot 10^{15}$ эВ

Корреляции между ЭМ и адронной компонентами в *γ*-h семействах

Тип		$\langle Q_\gamma angle$	$W_Q(Q_\gamma \ge 0.9)$	Лит.	G
данных	РЭК				\boldsymbol{N}
Эксперимент	Pb	$0.83 \pm .06$	$0.44 \pm .09$	[10]	Э
$egin{array}{c} {\sf MC0} & \left\{ egin{array}{c} K_\gamma^1 \ K_\gamma^2 \end{array} ight. \end{array} ight.$		$0.83 \pm .06 \\ 0.82 \pm .01$	$0.40 \pm .04$		
Эксперимент	С		$0.63 \pm .04^{\star}$		Ьп
MQ			$0.65\pm.03^{\star}$	[80]	

 $Q_{\gamma} = \Sigma E_{\gamma} / (\Sigma E_{\gamma} + \Sigma E_{h}^{\gamma})$ *MC0* согласуется с *экспериментом* по корреляциям между γ и *h* поперечным характеристикам

Пространственно-энергетические характеристики у-h семейств

Тип	Тип	$\langle \overline{R_{\gamma}} angle$	$\langle \overline{E_{\gamma}R_{\gamma}} \rangle$	$\langle \overline{R_h} angle$	$\langle \overline{E_h R_h} \rangle$	Лит.
данных	РЭК	$\mathbf{M}\mathbf{M}$	ТэВ•мм	$\mathbf{M}\mathbf{M}$	ТэВ•мм	
Эксп-т	Pb	20 ± 4	273 ± 47	26 ± 5	375 ± 70	[10]
$MCO \int K_{\gamma}^{1}$		91 ± 1	260 ± 18	27 ± 2	350 ± 30	
$\begin{pmatrix} & \mathcal{K}_{\gamma}^2 \\ & \end{pmatrix}$			203 ± 10	32 ± 2	404 ± 35	
Эксп-т	\mathbf{C}	$20 \pm 1^{\star}$		$23\pm2^{\sharp}$		
MQ		$23\pm1^{\star}$		$23\pm2^{\sharp}$		[80]

* Е_{thr}= 4ТэВ; [#] Е_{thr} = 10 ТэВ

Доля энергии в адронной компоненте в *γ*-h семействах



 $\langle \mathsf{E}_{v} \mathsf{R}_{v} \rangle \leq 300 \text{ T} \Im \mathsf{B} \cdot \mathsf{CM}; \langle \mathsf{E}_{h}^{(\gamma)} \mathsf{R}_{h}^{(\gamma)} \rangle \leq 300 \text{ T} \Im \mathsf{B} \cdot \mathsf{CM}$

Экспериментальные события с наибольшей долей адронной компоненты ($q_{\rm b}$ > 0,9) не описываются всеми современными моделями

Результаты сравнения эксперимента и расчета при $\langle E_n \rangle \le 5 \cdot 10^{15}$ эВ

- Модели типа *MSF* (сохранение скейлинга в фрагментационной области) предсказывают
 - слишком большие интенсивности всех одиночных компонент и γ-h семейств
 - слишком жесткие спектры ЭМ и адронной компонент
- Модели типа *кварк-глюонных струн* (*MC0*) хорошо описывают данные эксперимента «Памир» по
 - одиночным адронам;
 - ЭМ компоненте;
 - ү-h семействам,

относящиеся к $\langle E_0 \rangle \lesssim 5 \cdot 10^{15}$ эВ

 Т.о. имеется модель *MCO*, проверенная при <E₀> ≤ 5 · 10¹⁵ эВ, которую можно использовать для исследований области более высоких энергий

Анализ азимутальных характеристик

Азимутальные особенности гамма-адронных семейств

- В экспериментах с РЭК обнаружены:
- Азимутальная анизотропия частиц в семействах с энергией ΣE_y ≥ 30 ТэВ (Памир)
- Двуцентровые («бинокулярные») события с энергией ΣE_γ ≥ 200 ТэВ (Памир, Чакалтая, Канбала)
- Выстроенность «энергетически выделенных центров» (ЭВЦ) в семействах с энергий $\Sigma E_{\gamma} \gtrsim 700$ ТэВ ($\langle E_0 \rangle \gtrsim 10^{16}$ эВ)





"Памир" : **а)** 4- γ-кластерное семество; **б)** Pb-6: λ₄=0.95; **в)** Pb-28: λ₄=0.85. **г)** *JF2af2* (*"Concorde"*); **д)** *Страна* (аэростат). Цифры – энергия в ТэВ



$$\lambda_N = \frac{\sum\limits_{\substack{i \neq j \neq k}}^N cos 2\varphi_{ij}^k}{N(N-1)(N-2)}$$

- Экспериментальные данные по выстроенности разнокалиберные (частицы, группы частиц, гало)
- Надо выделять изолированные потоки энергии





$$z_{ik} = R_{ik} \left(\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_k}\right)^{-1} \sim \boldsymbol{p}_t$$

• ЭВЦ = изолированные кластеры генетически связанных частиц ($\gamma/e^{\pm}, h$), выделяемые «декаскадированием» = процедурой объединения і-й и *k*-й частиц в группе (с $Z_{ik} < Z_C$) • ⟨p_t⟩ ∝ Z_C ~1, ~3, ~20 ТэВ·см соответствует объединению частиц в «исходный» γ -квант, π^0 -мезон и адрон (уровень

ЭВЦ = группы, инициированные γ-квантами: Z_c ~ 1 ТэВ·см π⁰-мезонами: Z_c ~ 3 ТэВ·см взаимодействиями адронов: Z_c ~ 20 ТэВ·см

Экспериментальная ситуация

Эксперимент «Памир» (ΣЕ_γ ≥ 700 TeV, λ₄ ≥0.8)
•0.43±0.13 в Pb-PЭК (6 из 14 при 1.0 ожидаемом)
•0.27±0.09 в C- PЭК (9 из 35 при 2.1 ожидаемом)
0.06 – ожидаемый фон:

Эксперимент Kanbala ($\Sigma E_{\gamma} \ge 500 \text{ TeV}, \lambda_3 \ge 0.8$)

• 0.50±0.20 in Fe-PЭК (3 из 6 при 1.2 ожидаемом) 0.21 – ожидаемый фон Xue L. *et al*. 1999

Только два стратосферных γ -*h* семейства с $\Sigma E_{\gamma} \gtrsim 1000 \text{ TeV}$ Оба предельно выстроены:

- $\lambda_4 (\gamma) = 0.998 (JF2af2, Concorde)$
- λ₄ (h) = 0.99 (*Страна*, аэростат)

Флуктуации ? Магнитное поле ?

Коэффициент регрессии 38 квантов: β₃₈(γ) = 0.992

Электрические поля?

Сильные взаимодействия?

Разнокалиберные экспериментальные данные (*"ПАМИР"*, *Kanbala*, *Concorde*, аэростат)

Замечание

- До сих пор существуют два противоположных мнения о происхождении экспериментально наблюдаемой выстроенности:
- выстроенность есть результат тривиальных флуктуаций ⇒ для опровержения требуется хорошая статистическая обеспеченность расчетных результатов
- выстроенность может быть объяснена КХД-струями ⇒ требуется модель с генерацией КХД струй (*MC0*)

Роль флуктуаций в явлении выстроенности



Распределения наборов по числу выстроенных событий в каждом из наборов

Из 11 тысяч искусственных наборов событий, нет ни одного, подобного экспериментальным!

Выстроенность и флуктуации

 При изучении явления выстроенности любое событие может принадлежать только к одному из двух типов:
 выстроенное или невыстроенное

Биномиальное распределение

Вероятность получить *k* выстроенных событий в наборе из *n* событий:

$$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{(n-k)}, \quad \text{где} \quad \begin{array}{l} k = N_{fam} \, (\lambda_4 \ge 0, 8), \, n = N_{tot}, \\ q = 1 - p \, \text{ и } p = \boldsymbol{F} \, (\lambda_4 \ge 0, 8) \end{array}$$

Выстроенность и флуктуации

Экспери- мент	Критерий отбора	Ожидаемое значение (для 1 события - вероятность)	Наблю- даемое значе- ние	Ожида- емое стандарт. откло- нение (о)	Отклоне- ние от ожидаем. значения (в о)	Вероят- ность наблюдать экспер. данные
Памир-Pb	λ ₄ ≥0.8	1.0 из 14	6	1.0	5	0.9 · 10 - 4
Памир- С	λ ₄ ≥0.8	2.1 из 35	9	1.5	4,6	1.5 · 10 ⁻⁴
Kanbala	λ ₃ ≥0.8	1.2 из 6	3	1.2	1.5	$900\cdot10^{-4}$
«Страна»	λ ₄ ≥0.99	0.0029±0.0002	1	0.05	-	29 · 10 ⁻⁴
«JF2af2»	λ ₄ ≥0.998	0.0006±0.0001	1	0.015	-	6 · 10 ⁻⁴
	λ ₃₈ ≥0.95	<< 10 ⁻⁹	1	-	-	<< 10 ⁻⁹

Вероятность регистрации всего набора экспериментальных выстроенных событий (*Памир*, *Kanbala, cmpamocферa*): W_{fluct} << 0,9 · 10⁻⁴ × 1,5 · 10⁻⁴ × 9 · 10⁻² × 3 · 10⁻³ × 10⁻⁹ << 10⁻²⁰

Источником феномена выстроенности не могут быть флуктуации

Роль электромагнитных полей

- Магнитное поле Земли
 - реально не влияет на выстроенность семейств на уровне гор
 - •немного усиливает выстроенность в стратосфере, но для $L \lesssim 1$ м $\Delta F(\lambda_4 > 0,8) < 0,01$
- Электрические грозовые поля (расчет: Е_{стіt} ≈100 кВ/м, ∆U ≈1 ГВ)
 - •почти не влияют на выстроенность адронов на высоте гор: $\Delta F(\lambda_4 > 0,8) \approx 0,03;$
 - увеличивает выстроенность в ЭМ каскадах от γ-квантов: F(λ₄>0,8) ≈ 0,16; Ho!
 - подобные поля образуются крайне редко (если вообще образуются! Для Памира Е_{стіт} ≈ 50 кВ/м)

Источником феномена выстроенности не могут быть

- флуктуации
- магнитное поле Земли
- электрические грозовые поля

Источник выстроенности – адронные взаимодействия

Существует процесс компланарной генерации частиц (КГЧ)

Об интерпретации выстроенности и КГЧ

<u>Кинематика</u>

- кинематические эффекты в дифракционных процессах (СморСмир 90, Zhu 90, Capdevielle 01);
 «Новая» физика
- новое сильное взаимодействие при энергиях √s ≥ 4 ТэВ и генерация бозонов и адронов, включающих новые кварки высшей цветовой симметрии (White 94);
 <u>Передача больших Q</u>,
- генерация глюонных КХД-струй (Halzen 90);
- полужесткая двойная дифракционная неупругая диссоциация (натяжение и разрыв кварк-глюонной струны между полужестко рассеянным кварком-конституентом и кварками-спектаторами налетающего адрона (Ройзен 94)

Кинематика вращения

- Рождение лидирующего резонанса с очень высоким спином (Мух 99, В.Чуд 01)
- высокий угловой момент кварк-глюонной струны (Wibig 04)
- вращение с очень высоким спином невзаимодействующей части налетающего ядра;
- закручивание взаимодействующего адрона и компланарный разлет вторичных частиц как следствие релятивистского изменения свойств адрона при высоких энергиях (Г.Т.Зац 94)

Эвристические модели компланарной генерации частиц

- Базовая модель МСО
- *ALG* компланарная генерация всех вторичных частиц с традиционным значением «р,»
- *EMD* электромагнитная диссоциация и развал налетающих ядер в электрическом поле ядер воздуха (⇒ усиление влияния магнитного поля Земли)
- *ISD* дифракционная диссоциация с увеличенным в 10 раз сечением
- К2М существенное увеличение дисперсии распределения по К_{inel} и его постепенная трансформация в двугорбовое (максимумы при K_{inel} ~ 0 и K_{inel} ~ 1, Г.Т.Зац)
- *PNP* неупругие (фотоядерные) взаимодействия *ү*-квантов
- ROT вращение с очень большим значением спина невзаимодействующей части налетающего ядра с последующим компланарным развалом

Выстроенность и модели взаимодействия

- SHDID полужесткая двойная дифракционная неупругая диссоциация, протекающая через натяжение кварк-глюонной струны между полужестко рассеянным быстрым кварком и кварками-спектаторами налетающего адрона и последующий разрыв струны с образованием вторичных частиц (Ройзен 94).
- SHDQ новое сильное взаимодействие при √s ≥ 4 ТэВ и генерация бозонов и адронов с новыми кварками высшей цветовой симметрии (White 94).
- X гипотетическая длиннопробежная компонента, взаимодействующая с малым сечением неупругого взаимодействия σ^{X-air}_{inel} ≈ 0,2σ^{p-air}_{inel} через компланарную генерацию вторичных частиц.
- МКГЧ упрощенная Модель Компланарной Генерации

Предварительные выводы (на основе эвристических моделей)

- наблюдаемый эффект выстроенности не может быть объяснен
 - •кинематическими эффектами во взаимодействиях адронов
 - КХД взаимодействиями адронов
 - •КГЧ взаимодействиями адронов с $\langle p_t \rangle \lesssim 1$ ГэВ/с
- Фазовое пространство компланарных событий в плоскости компланарности не меньше, чем несколько ГэВ/с
- •В Лаб-системе д.б. специфическая корреляция между E (или p_L) и $\langle p_t \rangle$ частиц: бо́льше p_t меньше E
- Каскадное развитие быстро разрушает компланарность
- Частицы с повышенной проникающей способностью (т.е. λ_{compl} > λ_{int} -ai) обладают высокой потенциальной эффективностью для создания выстроенных событий.

Выстроенность и модели взаимодействия



Нужна специфическая корреляция: выше р_t − ниже р_L a) КХД струи: Sin θ_i ≈ const ⇒ неподходящая корреляция ⇒ 2 отдельных кластера ⇒ нет наблюдаемой выстроенности b) SHDID (Ройзен 1994) разрыв натянутой кварк-глюонной струны в дифракционном кластере: ⇒ необходимая корреляция ⇒ выстроенность есть с) система-лидер с высоким спином

 система-лидер с высоким спином
 ⇒ подходящая корреляция (для наиболее энергичных частиц)
 ⇒ выстроенность есть

d) Угловой момент КГС (Wibig 04)
 ⇒ необходимая корреляция
 ⇒ выстроенность есть

Выстроенность и модели взаимодействия

<u>КХД струи</u>: Лохтин и др. 2005 *РҮТНІА* и √s = 14 ТэВ (LHC) ⇒ Вывод: Выстроенность 3-х (!) КЛАСТЕРОВ (близкая к эксперименту) только (!) I. при $E_{3,4}^{jet} \ge 3$ ТэВ, т.е. $E_{3,4}^{jet} \sim E_1$ ($\sigma \ll \sigma_{inel}$)



 в ускорительных экспериментах, где расстояние от точки взаимодействия до уровня наблюдения, т.е.толщина мишени ∆х ~0 (в экспериментах с РЭК ∆х > 500 г/см²)

Но: 1. Нет выстроенности а) 4 и более кластеров; б) частиц

2. С ростом Δx резко падает выстроенность

Угловой момент КГС (Wibig 2004) $t_0 - | \sim \Delta b$ и $\omega \sim \text{const} (\Delta b \ll |b/2|$ | $\sim \text{const}$ и $\omega \sim 1/\Delta b$ ($\Delta b \sim |b/2|$ (v = c) сохранение углового момента $t_1 -$ возникает волна; изменяется распределение p_t



МКГЧ = Модель Компланарной Генерации Частиц ^{#,*}

- частицы (π и K) рождаются компланарно с нормальным (p_t)
 относительно плоскости компланарности
- множественность $\langle n_s \rangle \approx 10;$
- <p_^{copl}> ≈1– 2,3 ГэВ/с в плоскости компланарности

Параметры взаимодействия относятся к фрагментационной области
 Примитивная (!) эвристическая модель для изучения факторов, связанных с возможностью наблюдения выстроенности

Зависимость F(λ₄≥0,8) от расстояния до точки взаимодействия



 глубины в атмосфере
 расстояния до уровня наблюдения
 параметра декаскадирования Z_c
 Если на уровне гор F(λ₄ ≥ 0,8) ≥ 0,2, то σ_{ecre}^{p-air} ~ σ_{incl}^{p-air}

F(λ₄≥0.8) зависит от

Выстроенность может изучаться только в • высокогорных и стратосферных экспериментах с высоким разрешением (∆х ≤ 1см) • на коллайдерах

Выстроенность – экспериментальные данные и расчет

Зависимость доли выстроенных семейств $F(\lambda_4 \ge 0,8)$ от Z_C



Выстроенность – экспериментальные данные и расчет

Зависимость доли выстроенных семейств $F(\lambda_a \ge 0,8)$ от ΣE_{λ}



Δ Эксперимент: $F(\lambda_4 z 0.8)$ зависит от ΣE_{ν}

- □ МКГЧ объясняет эффект
- МСО не объясняет эффект

Выстроенность – экспериментальные данные и расчет



Феноменологические ограничения на модель сильных взаимодействий при *E*₀ ≥ 10¹⁶ эВ

Модель сильных взаимодействий при *E*₀ ≃ 10¹⁶ эВ (√s ≥ 4 ТэВ) должна удовлетворять следующим требованиям

- должен проявляться канал компланарной генерации частиц (КГЧ), характеризующийся процессами с большими поперечными импульсами (<pt ≥ 2 ГэВ/с) наиболее энергичных частиц в плоскости компланарности
- сечение КГЧ-процесса σ^{p-air}_{compl} должно быть сравнимым с неупругим сечением σ^{p-air}_{inel} при энергиях E₀ ≥ 10¹⁶ эВ
- необходима специфическая корреляция между продольными и поперечными импульсами компланарно генерируемых частиц d Лаб-системе: больше *p*₁ – меньше *p*₁
- продольные характеристики вторичных частиц и К_{inel} не должны сильно отличаться от предсказаний МКГС.

Методические результаты

- На основе МКГС взаимодействия адронов и приближения А теории ЭМ каскадов создан код *МСО* для моделирования адронных взаимодействий, который первым из подобных кодов включил генерацию полужестких и КХД струй, странных и чармированных частиц, мезонных и барионных резонансов
- На основе кода *MC0* создан программный пакет *SIMULNEC* для моделирования ЯЭК в атмосфере и получения характеристик его компонент (семейств γ-квантов, адронов, мюонов, одиночных частиц) в области энергий до ~10¹⁸ эВ.
- Создан программный пакет SPHINX для моделирования ЯЭК в слоистом веществе (в приближении В теории ЭМ каскадов с учетом эффекта ЛПМ) в диапазоне энергий от ~10⁷ до ~10¹⁵ эВ.
- Предложены методы повышения эффективности генерации ЯЭК в атмосфере (для определенных задач в экспериментах с РЭК).

Физические результаты

- На основе КГС-подобной модели был рассчитан наиболее широкий круг характеристик космических лучей, измеряемых с помощью РЭК Сотрудничества «Памир».
- Сделан вывод о том, что характеристики сильного взаимодействия адронов с ядрами воздуха, ответственные за создание γ-h семейств и других компонент космических лучей, соответствующих области E₀ ≤ 5·10¹⁵ эВ, в целом, хорошо описываются в рамках моделей типа МКГС
- На основе расчетов сделан вывод, что если K_{inel} доля энергии, уносимая всеми частицами, кроме наиболее энергичного адрона (независимо от его типа), то при E₀ ~10¹⁶ эВ 0,5 < K_{inel} ≤ 0,6, т.е. его значение
 - близко к оценке Г.Т.Зацепина, 1949;
 - противоречит глюонным моделям с уменьшающимся K_{inel}

Основные результаты, представленные к защите

- Впервые показано, что наблюдаемый эффект выстроенности наиболее энергичных структур *γ*-*h* семейств не объясняется
 - флуктуациями развития ЯЭК
 - •атмосферными ЭМ полями
 - •кинематикой обычных взаимодействий адронов
 - в рамках стандартных сечений КХД-процессов
 - компланарными взаимодействиями адронов с $\langle p_{_{f}}\rangle$ ${\lesssim}1$ ГэВ/с
- Впервые проведен детальный анализ зависимости наблюдаемой выстроенности от широкого круга параметров взаимодействия и каскадного развития
- Впервые показано, что каскадное развитие быстро разрушает выстроенность

- Впервые показано, что для наблюдения экспериментальной выстроенности необходима специфическая корреляция между продольными и поперечными импульсами компланарно генерируемых частиц
- Впервые показано, что наблюдаемый эффект выстроенности в экспериментальных событиях может быть объяснен только проявлением при E₀ ≈ 10¹⁶ эВ (√s ≥ 4 ТэВ) канала компланарной генерации частиц (КГЧ) с ⟨p_t⟩ ≥ 2 ГэВ/с
- Впервые показано, что во взаимодействиях протонов сечение процесса КГЧ σ^{*p*-air}_{compl} должно быть сравнимым с полным неупругим сечением σ^{*p*-air}_{inel} при энергиях E₀ ≥ 10¹⁶ эВ.

- Представляемая диссертация подводит итоги сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных, проводившегося автором в качестве члена Сотрудничеством «Памир».
- Постановка задач, решаемых в диссертации, была сделана автором либо лично (разработка общедоступного программного обеспечения, новых методов повышения эффективности моделирования ЯЭК, анализ влияния различных факторов на выстроенность), либо в результате совместных обсуждений в рамках Сотрудничества «Памир».
- Автор участвовал в получении экспериментального материала, в течение ряда лет являясь руководителем эмульсионной группы ИЯИ РАН и участвуя в работе Памирской экспедиции.

4. Результаты, представленные к защите, получены лично автором.

Основные результаты диссертации докладывались на

- Международных Конференциях по космическим лучам: Москва, 1987; Дублин, 1991; Калгари, 1993; Рим, 1995; Дурбан, 1997; Гамбург, 2001; Пуне, 2005
- Международных симпозиумах по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий: Находка, 1980; Лодзь, 1988; Токио, 1994; Лхаса, 1994; Гран-Сассо, 1998; Кампинас, 2000; Пилос, 2004)
- Российских конференциях по космическим лучам
- научных семинарах ИЯИ РАН, ФИАН, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, МИФИ

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано

- 1) в 26 статьях;
- 2) включая 9 статей в реферируемых журналах.

Спасибо за внимание!

- В диссертации было бы полезно часть материала вынести в приложения, например, п. 1.4 о переходах между системами отсчета, п. 1.10 о компьютерной организации моделирования.
- Автор согласен с этим замечанием, поскольку действительно это могло бы улучшить восприятие материала

- Не приведено достаточно подробное сравнение характеристик взаимодействий в моделях автора с другими моделями, используемыми мировым сообществом в данной области исследований, в частности, с используемыми в пакете CORSIKA
- В ходе работы сравнения проводились, но в диссертации, действительно, это не нашло должного отражения.
- В целом, характеристики кода *MCO*, на базе которого получены основные выводы диссертации, близки к параметрам основных моделей пакета *CORSIKA*
- Ниже приведены два графика для сравнения результатов *MC0* с расчетами, проведенными по различным моделям в рамках пакета *CORSIKA*, и экспериментальными данными по
 - спектру мюонов и
 - спектру адронов,

отражающими наиболее характерные начальную и завершающую стадии развития каскадов





 Т.о. эффективные характеристики кода *MC0*, на базе которого получены основные выводы диссертации, находятся в области вариаций параметров основных моделей, используемых в пакете *CORSIKA*

В. Требует дополнительного комментария вопрос о возможной зависимости оценки фоновой доли выстроенных событий от используемой в расчетах модели взаимодействия. От этого зависит вероятность наблюдения выстроенных событий в результате

•	фоновая доля выстроенных гамма-семейств $F(\lambda_4 \ge 0,8)$ (а та	кже
	выстроенных событий в ШАЛ и взаимодействиях):	
	данная диссертация МСО:	
	0,059±0,003	
	Дунаевский (ФИАН), <i>М</i> Q:	0,08
	±0,02	
	Галкин и др. (НИИЯФ), <i>QGSJET</i> 98:	0,06
	T. Antoni <i>et al</i> . (KASCADE, адроны ШАЛ, CORSIKA): 0,06	
	Лохтин и др. (НИИЯФ), <i>РҮТНІА</i>	
	(реалистичные условия наблюдения):	0,06
•	JN.Capdevielle <i>et al</i> . (γ-семейства), <i>HDPM</i> :	0,08
	Но! При анализе не было перехода в плоскость, перпендику	/лярную
	к оси каскада. Для наклонных событий автоматически появ	пяется
	дополнительная вытянутость	

 $-\Delta -\Delta C$

- При анализе выстроенности в суперсемействе JF2af2, наблюдаемом в стратосфере, приведен только коэффициент регрессии β₃₈ для 38 наиболее энергичных частиц, а критерий λ₃₈ для определения выстроенности лишь оценен, что оставляет не совсем ясное впечатление о ситуации с этим событием
- К сожалению, не удалось получить первичные данные от проф. J.-N.Capdevielle, несмотря на неоднократные обращения и его обещания это сделать. Поэтому пришлось ограничиться весьма достоверной оценкой с большим запасом на основе расчетов проф. J.-N.Capdevielle, показавших сильную корреляцию между параметрами β и λ

 Следовало бы уделить больше внимания обзору работ по выстроенности других авторов, в частности, группы НИИЯФ МГУ, где рассматривались проблемы связи выстроенности и больших импульсов, проблемы случайного фона и т.д.

Автор приносит свои извинения за недостаточно полное освещение вклада коллектива НИИЯФ МГУ в исследование проблемы выстроенности гамма-адронных семейств и получение важнейших результатов, среди которых особо выделяются следующие:

- формулировка концепции энергетически выделенных центров (ЭВЦ)
- обнаружение очень высокой доли выстроенных гамма-семейств с ΣE_γ > 700 ТэВ в свинцовых камерах: F (λ₄>0,8) = 0,43
- зависимость степени выстроенности γ-h семейств от числа адронов, входящих в их состав
- обнаружение очень высокой степени выстроенности уникального события «Страна»

Ответы на замечания д.ф.-м.н. Л.Г.Деденко

- Для расчетов используется спектр частиц ПКИ, предложенный С.И. Никольским ... имеются и другие точки зрения как на состав, так и на наклоны спектров различных ядер в области энергий порядка и выше 10¹⁶ эВ. Это обстоятельство следует учитывать
 - Несомненно, следует учитывать другие варианты спектра ПКИ
 - γ-h семейства чувствительны, в первую очередь, к некоторой эффективной интенсивности протонов в достаточно широкой области ПКИ (~10¹⁵ – 10¹⁶ эВ). В этом отношении т.н. спектр ПКИ Никольского мало отличается от других аппроксимаций.
 - автором использовался также т.н. спектр ПКИ Ерлыкина, который практически совпадает с одной из совр. аппроксимаций Gaisser & Honda (дает одинаковые результаты в потоках µ и h)
 - Спектр ПКИ *КАSCADE* с очень быстрым вымиранием компонент при *E*₀>Z · 3 · 10¹⁵ эВ сильно противоречит данным РЭК и не заслуживают серьезного внимания (Свешникова Л.Г, … Мухамедшин Р. и др. Изв. РАН, сер. физ., 2005, т.59, № 3, с.384)
 - Выводы диссертации слабо зависят от вида спектра ПКИ

- Для учета кулоновского рассеяния электронов и позитронов в атмосфере используется распределение Ферми, но опускаются корреляции между углом отклонения и соответствующей координатой. Представляется, что использование распределений, учитывающих эту корреляцию, существенно и может повысить надежность проводимого анализа.
 - Учет корреляций действительно может повысить надежность проводимого анализа
 - С другой стороны, поскольку угол рассеяния θ ~ 1/E, а энергии частиц очень высоки (> n · TэB), то эффект многократного рассеяния (в данном случае!) не слишком силен сам по себе (поперечные характеристики γ-h семейств определяются, в первую очередь, ядерными p_t~ 0,4 ГэB/с), а упоминаемая корреляция представляет еще более слабый эффект

Ответы на замечания д.ф.-м.н. Л.Г.Деденко

- Моделирование процедуры измерения почернений в программе SPHINX описано не вполне ясно. В частности, кривая зависимости почернения от размера ячейки приведена без учета возможных ошибок ...Неясны последствия этой неопределенности для проводимого в дальнейшем анализа экспериментальных данных.
 - В настоящее время в рамках работы по объединению программ SPHINX и ECSim (НИИЯФ) проводится детальный анализ этой проблемы, что позволит решить поставленную в диссертации проблему.

Ответы на замечания д.ф.-м.н. Л.Г.Деденко

- Методы повышения эффективности моделирования электронноядерных каскадов ... важны для проведения намеченных исследований ... Предлагается отбрасывать частицы с малыми энергиями, если они находятся на больших расстояниях от уровня наблюдения...(это) позволяет сократить время вычислений, но необходимо провести анализ, стоит ли на этом экономить..
 - Действительно, в настоящее время необходимость экономии счетного времени за счет подобных процедур в экспериментах, рассматриваемых в диссертации, не стоит так остро, как лет десять назад. С другой стороны, расчеты каскадов от космических лучей сверхвысоких энергий иногда проводятся на грани возможности компьютеров; возможно, в этом случае некоторые из рассматриваемых в диссертации идей могут найти применение

Ответы на замечания д.ф.-м.н. А.А.Петрухина

- Рассматриваемые в первых двух главах программы MC0 и SPHINX фактически являются специализированными аналогами широко используемых программ CORSIKA и GEANT, поэтому сопоставление результатов расчетов по этим парам программ, хотя бы для отдельных случаев (точек), явилось бы хорошей дополнительной проверкой корректности разработанных моделей и программ.
- 2. В диссертации ... затронута проблема измерения почернений, по которым ... определяются энерговыделения в ... слое РЭК. ... Влияние точности измерения на результаты как эксперимента, так и моделирования необходимо было рассмотреть, так как ... "измеренное" полное потемнение может почти в три раза изменяться в зависимости от размера ячейки /_{cell} для пятен потемнения...

Ответы на замечания д.ф.-м.н. А.А.Петрухина

- Несомненно, сопоставление результатов расчетов, получаемых по различным программам является хорошей дополнительной проверкой корректности разработанных моделей и программ
- Характеристики кода MC0 находятся в области вариаций параметров основных моделей, используемых в пакете CORSIKA
- В настоящее время проводится работа по объединению программ SPHINX и ECSim (основанной на GEANT). После завершения работы все полученные в диссертации результаты будут проверены с помощью новой программы, в частности, будет изучено влияние точности измерений на различные результаты как эксперимента, так и моделирования

Ответы на замечания д.ф.-м.н. А.А.Петрухина

- Автор не использовал прекрасную возможность проверки своей модели по мюонной компоненте космических лучей, хотя на стр.111 он прямо пишет: "Любая модель ... должна, в первую очередь, описывать спектры одиночных частиц, то есть электромагнитную, адронную и мюонную (!) компоненты"
- Сравнение с расчетными (по пакету *CORSIKA*) спектрами мюонов приводилось в ответе на замечания ведущей организации
- Совместно с А.Цябуком и Ю.Стенькиным (ИЯИ РАН) в ряде работ было показано, что влияние КГЧ на характеристики групп мюонов, регистрируемых на БПСТ, пренебрежимо мало по причине
 - малой вероятности распада компланарно-генерированных пионов высоких энергий
 - высокой фоновой выстроенности групп мюонов от МП Земли)

Ответы на замечания д.ф.-м.н. И.И.Ройзена

Результаты моделирования не сравниваются с экспериментальными данными при 10 < *p*_t < 60 ГэВ/с, тогда как именно в этой области используемая модель мини-струй, скорее всего, является неадекватной



Предсказания *МСО* • ниже UA2 при E_{tr} >10 ГэВ • ближе к UA2, цем КХЛ при

- ближе к UA2, чем КХД при E_{tr}<30 ГэВ (из-за министруй)
- стремятся к КХД при Е_{tr} → 30 ГэВ (выход на КХД режим)
- •выше КХД при всех Е,,

большими р, ?

КХД не объясняет данные UA2
Определенные модельные ухищрения могут сблизить теорию и эксперимент
косвенное указание на дополнительный процесс с

Ответы на замечания д.ф.-м.н. И.И.Ройзена

- 2. Пренебрегается кронин-эффектом при описании взаимодействия ядер
 - Кронин-эффект (увеличение выхода вторичных частиц на ядрах при *p*_t ≥ 2 ГэВ/с) эффективно проявляется
 - в центральных столкновениях ядер
 - в центральной кинематической области (η ~ 0)
 - составляет $\lesssim 10\%$
 - γ-h семейства чувствительны, в первую очередь, к эффективной интенсивности протонов
 - Неучет кронин-эффекта не должен сказаться на основных выводах диссертации

Ответы на замечания д.ф.-м.н. И.И.Ройзена

- Отсутствие в необходимом контексте необходимых ссылок на теоретические работы И.В.Андреева по «кентаврам» и ядро-ядерному взаимодействию
 - Автор приносит извинения глубокоуважаемому Игорю Васильевичу Андрееву, на монографию которого имеется ссылка в разделе диссертации, посвященном моделированию КХД струй
 - И.В.Андреев первым предложил теоретическое объяснение наблюдению в РЭК т.н. «кентавров» (ливней, состоящих, в основном, из адронов) – взаимодействием, в котором из-за нарушения изотопической инвариантности генерация π⁰ подавляется в пользу генерации π[±]

Основные результаты, представленные к защите

- Общедоступное программное обеспечение для моделирования ЯЭК в атмосфере на основе МКГС взаимодействия адронов и ускорительных данных, первым из подобных кодов включившее генерацию КХД струй, странных и чармированных частиц, барионных и мезонных резонансов.
- Общедоступное программное обеспечение для компьютерного моделирования ЯЭК в слоистом веществе и процедур обработки данных, получаемых в РЭК, в области энергий до ~ 10¹⁵ эВ.
- Методы повышения эффективности моделирования генерации
 ЯЭК в атмосфере применительно к определённым задачам.
- Результаты расчетов широкого круга характеристик космического излучения, измеряемых в экспериментах Сотрудничества «Памир».
- Вывод, что характеристики сильного взаимодействия адронов с ядрами воздуха в области энергий E₀ ≤ 5 · 10¹⁵ эВ в целом хорошо описываются в рамках модели кварк-глюонных струн.

Основные результаты, представленные к защите

- Вывод, что если определить коэффициент неупругости K_{inel} как доли энергии, уносимой всеми частицами, кроме самого энергичного адрона, то при E₀ ~10¹⁶ эВ 0,5 < K_{inel} ≤ 0,6.
- Результаты сравнительного анализа наиболее широкого набора экспериментальных данных и результатов моделирования явления выстроенности наиболее энергичных структур ЯЭК.
- Вывод, что эффект выстроенности не объясняется

 а) флуктуациями; б) магнитным полем Земли и электрическими полями; в) в рамках КХД; г) генерацией частиц с поперечным импульсом < p_t > < 1 ГэВ/с в плоскости компланарности.
- 9. Вывод, что развитие ЯЭК быстро разрушает его компланарность.
- Вывод, что при E₀ ≥10¹⁶ эВ проявляется новый канал, реализующийся в виде компланарной генерации частиц (КГЧ).
- Вывод, что сечение КГЧ, обусловленной взаимодействиями протонов, при E₀ ≥ 10¹⁶ эВ КГЧ сравнимо с полным неупругим сечением.

Научная новизна

- Произведено детальное, более широкое, чем было сделано до настоящего времени, сравнение различных характеристик ЯЭК в рамках единой модели, с учетом процессов регистрации.
- Показано, что модель кварк-глюонных струн хорошо описывает сравнительно широкий круг данных РЭК, но К_{inel} растет медленнее, чем получено в предыдущих работах по данным РЭК.
- Рассмотрено влияние ряда факторов на азимутальные характеристики γ-h семейств и показана недостоверность выводов ряда работ о причинах появления азимутальных эффектов.
- Исследованы некоторые теоретические модели применительно к появлению процесса компланарной генерации частиц при сверхвысоких энергиях; показано, что данные РЭК чувствительны к анализируемым новым процессам и произведено их сравнение с предсказаниями теорий.

Научная новизна

- 6. Показано, что развитие ЯЭК быстро разрушает компланарность.
- Предложена феноменологическая картина характеристик фрагментационной области адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях (*E*₀ ≥ 10¹⁵ эВ), описывающая наиболее широкий круг экспериментальных данных по сравнению с другими существующими в данной области исследований моделями.
- Сделан вывод, что эффект выстроенности может быть объяснен только, если при E₀ ≥ 10¹⁵ эВ проявляется новый канал, реализующийся в виде компланарной генерации частиц (КГЧ).
- Впервые показано, что сечение КГЧ, обусловленной взаимодействиями протонов, при E₀ ≥ 10¹⁶ эВ сечение КГЧ сравнимо с полным неупругим сечением.

- Разработано общедоступное программное обеспечение для моделирования ЯЭК в атмосфере, наиболее полно среди аналогичных программ аккумулирующее предсказания модели кварк-глюонных струн, КХД и ускорительные данные, которое может быть применено для астрофизических и ядернофизических исследований.
- Разработано общедоступное программное обеспечение для моделирования ЯЭК в слоистом веществе и процедур обработки данных, получаемых в РЭК, при энергиях до ~ 10¹⁵ эВ, которое может быть применено в ряде экспериментов в космических лучах
- Предложены новые методы повышения эффективности моделирования электронно-фотонных каскадов, которые могут быть применены в различных исследованиях в космических лучах.

- Разработанные автором генераторы адрон-ядерных взаимодействий MSF и MC0 в течение многих лет использовались, в первую очередь, Сотрудничеством «Памир», а также в ОИВМ НИИЯФ МГУ, ФТИ АН Уз, в Университетах Васеда и Кинки (Япония), Лодзинском университете (Польша).
- Материалы, содержащиеся в диссертации, могут быть использованы в ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ, МИФИ, ИФ АН Гр, ФТИ АН Уз, Лодзинском Университете (Польша).