

Феноменологические ограничения
на модель неупругих взаимодействий
адронов с ядрами при энергиях
выше 10^{15} эВ по данным
рентген-эмульсионных камер

01.04.23



Р.А.Мухамедшин
Институт ядерных исследований РАН

Москва 2006



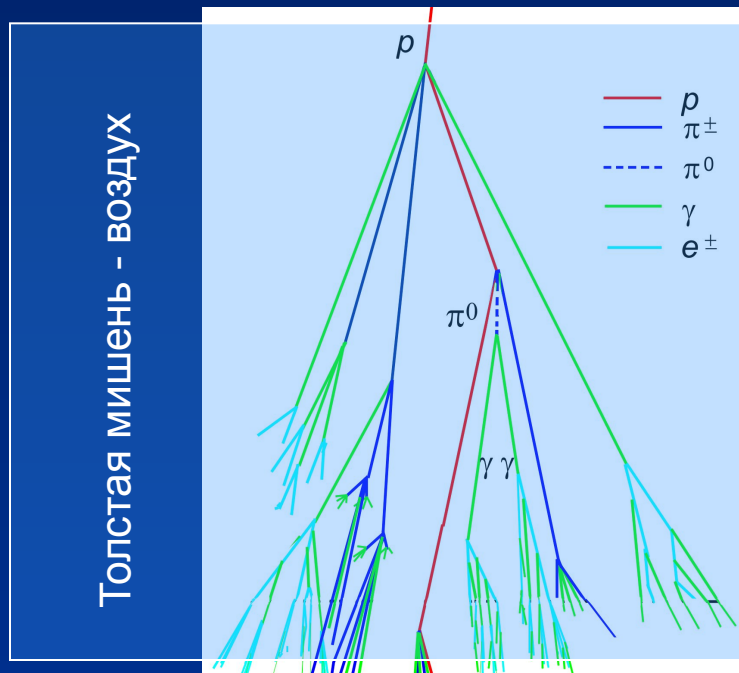
- Исследование мягких и полужестких процессов множественной генерации наиболее энергичных частиц во взаимодействиях адронов с легкими ядрами при $E > 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ) пока возможно лишь в космических лучах
- Анализируются характеристики компонент ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере (ШАЛ, γ - h семейства, группы мюонов).
- Первоначальная концепция неупругого p - N^{14} взаимодействия (Г.Т. Зацепин 1949, Г.В.Ватагин 1949):
 - эффект лидирования \Rightarrow лидер уносит $\sim 0,5 E_0 \approx (1 - K_{inel}) E_0$
 - сечение σ_{inel} и K_{inel} слабо зависят от энергии
- 1969: Скейлинг (F), автомодельность (ММТ), предельная фрагментация (ВСУУ)

- Современная (наиболее популярная) концепция мягких и полужестких $p-N^{14}$ взаимодействий (в т.ч. по данным РЭК):
 - модель кварк-глюонных струн (МКГС)
 - медленный рост сечения с энергией
 - эффект лидирования и медленный рост с энергией K_{inel} (вплоть до $\sim 0,85$ при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ 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

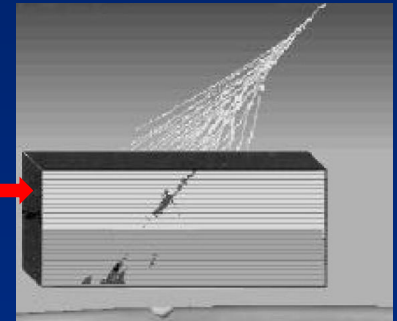
- Исследование свойств адрон-ядерных взаимодействий в фрагментационной области при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ) на основе сравнительного анализа экспериментальных данных РЭК и результатов моделирования;
- разработка феноменологической модели взаимодействий при этих энергиях, 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

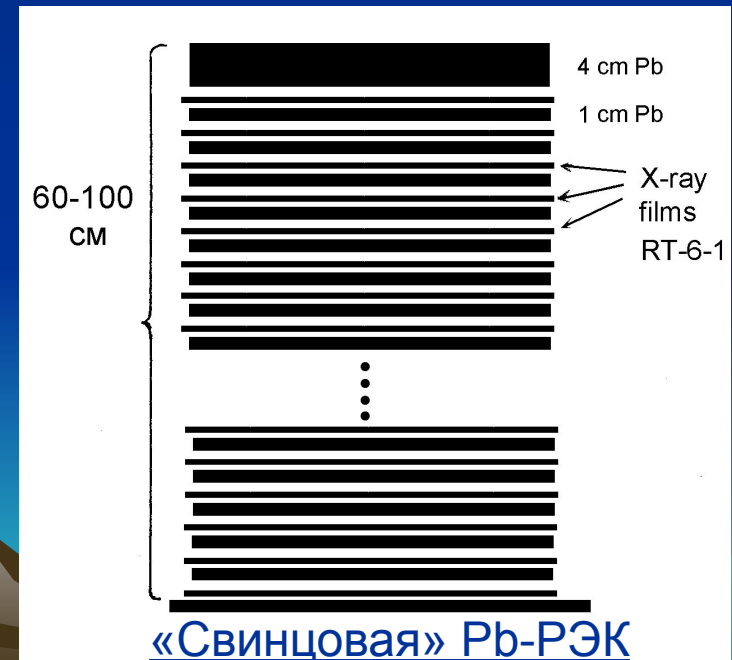
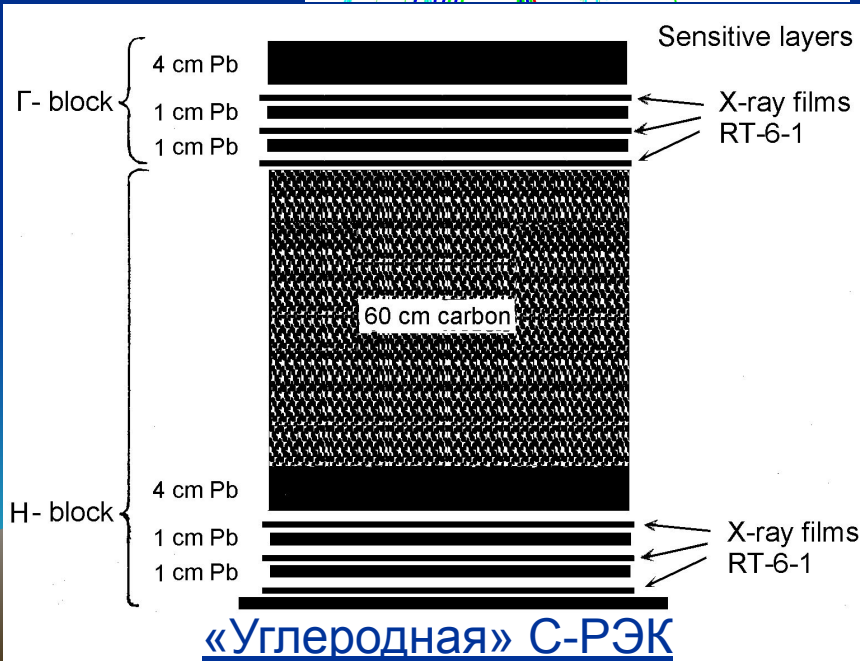


РЭК на аэростатах и самолетах

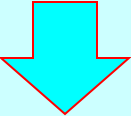


Пространственное разрешение $\lesssim 50 \mu\text{m}$

РЭК Сотрудничества «Памир»



Необходимость моделирования

- Большой объем экспериментальных данных
 - Сильные флуктуации в
 - атмосфере
 - РЭК
 - Сильное поглощение \Rightarrow 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 *MCO* моделирования ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере

Код *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 ($x_F \gtrsim 0,1$) (доминир.идея)
 - $K_{inel} = 0,5$
 - $\sigma_{inel} = f(E_0)$
- Результаты, полученные Сотрудничеством «Памир», в том числе с использованием кода *MSF*, дали толчок развитию моделей КГС (Кайдалов, Тер-Мартirosян, 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) \Rightarrow рост σ_{inel} и K_{inel}
 - модель полужестких струй (министруй) (ГЛР 1983): $Q_T \gtrsim 2$ ГэВ/с \Rightarrow при $E_0 \sim 10^{16}$ эВ $\sim 50\%$ 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 *MCO*, но характеризуется
 - высокой ($\sim 0,7$) вероятностью неупругой перезарядки $\pi^{\pm}A \rightarrow \pi^0 + X..$
 - более быстрым ростом K_{inel} (до $\sim 0,85$ при $E_0 \sim 10^{16}$ эВ в $p \rightarrow p + X...$)
 - отсутствием генерации КХД-струй

Коэффициент неупругости

Тип взаимодействия	Модель $E_0, \text{ТэВ}$	MC0				MQ	
		0.1	1	10^2	10^4	10^2	10^4
pN^{14}	K_{inel}^{ident}	0.62	0.66	0.73	0.76	0.80	0.84
	K_{inel}^{simil}	0.54	0.56	0.62	0.65	0.71	0.78
	K_{inel}^{leader}	0.48	0.50	0.56	0.59		
	K_γ	0.17	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21
	K_{π^\pm}	0.25	0.25	0.26	0.26	0.31	0.36
	K_s	0.12	0.10	0.10	0.10		

MSF

0,50
0,50
0,45

$$\langle K_{inel}^{p \rightarrow leader} \rangle \leq \langle K_{inel}^{p \rightarrow nucleon} \rangle \leq \langle K_{inel}^{p \rightarrow p} \rangle$$

$$K_{inel} = \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{E_0 - m_0}$$

- $\langle K_{inel} \rangle_{MSF} < \langle K_{inel} \rangle_{MC0} < \langle K_{inel} \rangle_{MQ}$
- $\langle K_{inel} \rangle$ зависит от определения $leader$
- $\langle K_{inel} \rangle \equiv \langle K_{inel}^{leader} \rangle \lesssim 0,6$ при $E_0 \sim 10^{16}$ эВ (близко к значению Г.Т.Зацепина 1949)

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

Электромагнитная компонента: $E_\gamma \approx 0,01 E_0$

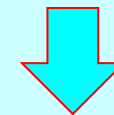
Тип данных	$\beta_\gamma (\geq 5 \text{ ТэВ})$	Лит.
Расчет <i>МСО</i>	2.11 ± 0.03	
Эксперимент	2.07 ± 0.06	[84]
	2.00 ± 0.08	[82]
	2.00 ± 0.05	[83]

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

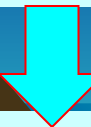
- более высокие интенсивности
- более пологие спектры

- 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.
 $\beta_{\text{real}} \approx 2,15 \rightarrow \beta_{\text{meas}} \sim 2,0$



МСО : Расчетные спектры по E_γ согласуются с экспериментальными

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

Адронная компонента: $E_h^\gamma \approx 0,01 \langle E_0 \rangle$

- Спектры в С-РЭК в среднем положе спектров в Рb-РЭК
 - Расчетный суммарный спектр над РЭК круче экспериментальных спектров
- НО!**
- Спектры адронов $I \sim E^{-\beta}$, падающих на РЭК, круче спектров измеряемых

E_{thr} , ТэВ	$\beta_h(E_h^\gamma \geq E_{thr})$	Тип камеры	Лит.	
Эксперимент	5.0	1.96 ± 0.06	Pb	[84]
	6.3	2.01 ± 0.08	Pb	[10]
	5.0	2.03 ± 0.08	Pb/Fe	[82]
	5.0	2.00 ± 0.10	Pb	[83]
	20.0	1.90 ± 0.15	C	[88]
	7.0	1.90 ± 0.10	C	[91]

Тип адрона	I_h (%)	β измеряемые			
		$E_h \geq 20$ ТэВ	$E_h^\gamma \geq 3$ ТэВ	$E_h^\gamma \geq 8$ ТэВ	$E_h^\gamma \geq 20$ ТэВ
все	100	2.08 ± 0.01	1.69 ± 0.02	1.85 ± 0.01	1.95 ± 0.01
нуклоны	60	2.10 ± 0.01	1.61 ± 0.02	1.83 ± 0.01	1.92 ± 0.01
Λ/Σ	2	1.42 ± 0.02	1.14 ± 0.02	1.25 ± 0.05	1.30 ± 0.05
пионы	25	2.22 ± 0.01	1.76 ± 0.02	1.95 ± 0.02	2.25 ± 0.03
каоны	13	2.03 ± 0.01	1.54 ± 0.01	1.78 ± 0.02	1.84 ± 0.03

MC0: Расчетные спектры по E_h^γ согласуются с экспериментальными

MSF: интенсивности - выше (по сравнению с **MC0**)
 спектры - положе и экспериментом)

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

Гамма-адронные семейства: $\Sigma(E_\gamma + E_n^{(\gamma)}) \approx 0,1 \langle E_0 \rangle$
 (группы генетически связанных частиц (γ/e^\pm , h) с $E \gtrsim 5$ ТэВ)

Тип данных	Интенсивность $I(\Sigma E_\gamma \geq 100 \text{ ТэВ})$		Лит.
	полная ($\text{м}^2 \cdot \text{год}$) ⁻¹	вертикальная ($\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$) ⁻¹	
Эксперимент	0.38 ± 0.10	0.67 ± 0.15	[10]
<i>МСО</i>	0.37 ± 0.02	0.70 ± 0.08	

МСО согласуется с экспериментом по интенсивности множественности γ и h

Тип данных		РЭК	$\langle n'_\gamma \rangle$	$\langle n_h \rangle$	$W_n(n_h = 0)$	Лит.
Эксперимент						
<i>МСО</i>	$\left\{ \begin{array}{l} K_\gamma^1 \\ K_\gamma^2 \end{array} \right.$		$10.7 \pm .3^*$	$2.0 \pm .2$	$0.18 \pm .03$	
				$2.6 \pm .2$		
Эксперимент		C	$10.0 \pm .2^*$	$0.92 \pm .1^\#$	$0.54 \pm .03^\#$	
<i>МСО</i>			$9.8 \pm .2^*$	$0.90 \pm .1^\#$	$0.48 \pm .04^\#$	[80]

* $E_{\text{thr}} = 4 \text{ ТэВ}$; # $E_{\text{thr}} = 10 \text{ ТэВ}$

MSF завышает интенсивность по сравнению с экспериментом

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

Корреляции между ЭМ и адронной компонентами в γ -h семействах

Тип		$\langle Q_\gamma \rangle$	$W_Q(Q_\gamma \geq 0.9)$	Лит.
данных	РЭК			
Эксперимент <i>МСО</i>	Рb $\left\{ \begin{array}{l} K_\gamma^1 \\ K_\gamma^2 \end{array} \right.$	$0.83 \pm .06$	$0.44 \pm .09$	[10]
		$0.83 \pm .06$	$0.40 \pm .04$	
		$0.82 \pm .01$		
Эксперимент MQ	С		$0.63 \pm .04^*$ $0.65 \pm .03^*$	[80]

$$Q_\gamma = \Sigma E_\gamma / (\Sigma E_\gamma + \Sigma E_h^\gamma)$$

МСО согласуется с **экспериментом**

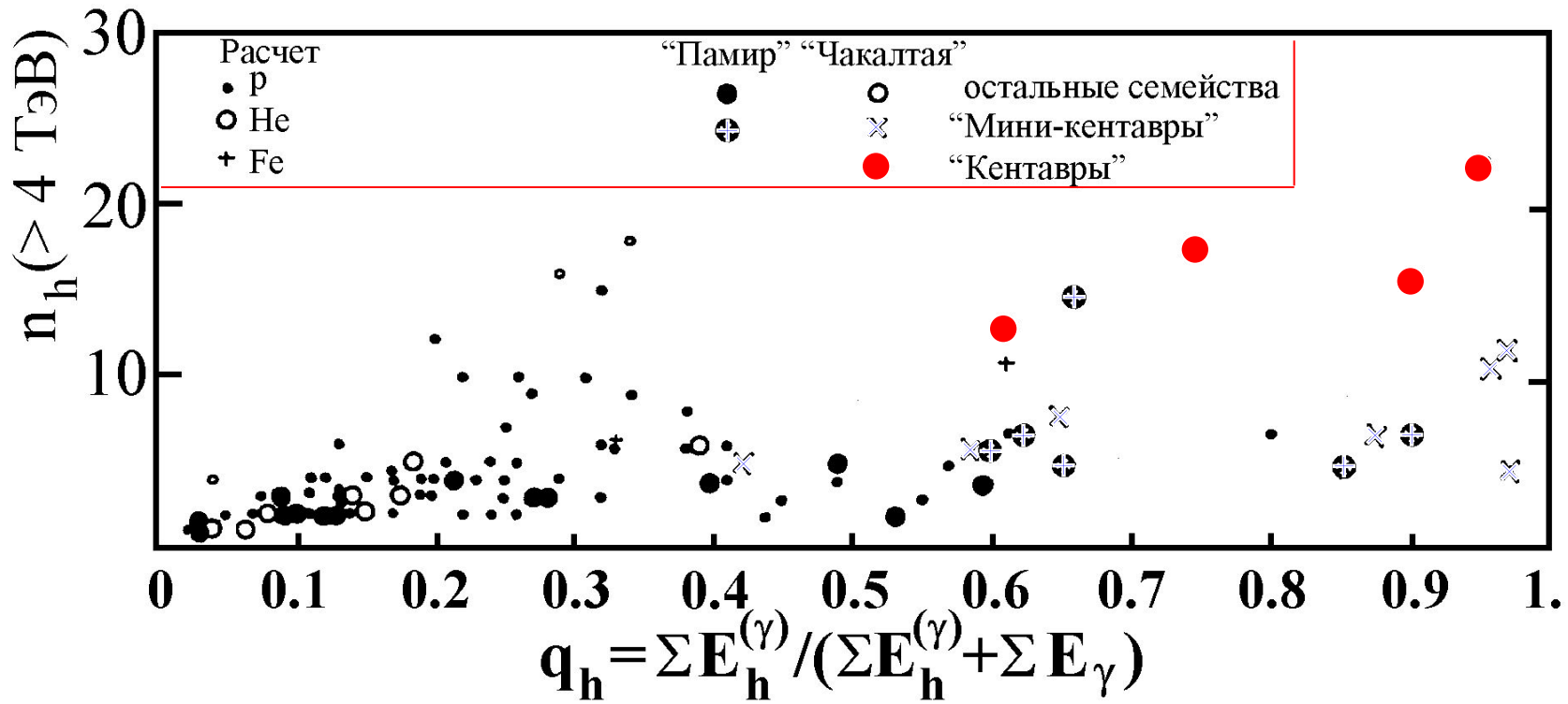
- по корреляциям между γ и h
- поперечным характеристикам

Пространственно-энергетические характеристики γ -h семейств

Тип данных	Тип РЭК	$\langle R_\gamma \rangle$ мм	$\langle E_\gamma R_\gamma \rangle$ ТэВ·мм	$\langle R_h \rangle$ мм	$\langle E_h R_h \rangle$ ТэВ·мм	Лит.
Эксп-т <i>МСО</i>	Рb $\left\{ \begin{array}{l} K_\gamma^1 \\ K_\gamma^2 \end{array} \right.$	20 ± 4	273 ± 47	26 ± 5	375 ± 70	[10]
		21 ± 1	269 ± 18	27 ± 2	350 ± 30	
				32 ± 2	404 ± 35	
Эксп-т MQ	С	$20 \pm 1^*$ $23 \pm 1^*$		$23 \pm 2^\#$ $23 \pm 2^\#$		[80]

* $E_{thr} = 4 \text{ ТэВ}$; # $E_{thr} = 10 \text{ ТэВ}$

Доля энергии в адронной компоненте в γ -h семействах



$$\langle E_\gamma R_\gamma \rangle \leq 300 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}; \quad \langle E_h^{(\gamma)} R_h^{(\gamma)} \rangle \leq 300 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$$

Экспериментальные события с наибольшей долей адронной компоненты ($q_h > 0,9$) не описываются всеми современными моделями

- 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 (MCO)* хорошо описывают данные эксперимента «Памир» по
 - одиночным адронам;
 - ЭМ компоненте;
 - γ - h семействам,относящиеся к $\langle E_0 \rangle \lesssim 5 \cdot 10^{15}$ эВ
- Т.о. имеется модель *MCO*, проверенная при $\langle E_0 \rangle \lesssim 5 \cdot 10^{15}$ эВ, которую можно использовать для исследований области более высоких энергий

Азимутальные особенности гамма-адронных семейств

В экспериментах с РЭК обнаружены:

- Азимутальная анизотропия частиц в семействах с энергией $\Sigma E_\gamma \gtrsim 30$ ТэВ (Памир)
- Двухцентровые («бинокулярные») события с энергией $\Sigma E_\gamma \gtrsim 200$ 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)

КХД:

← объясняет

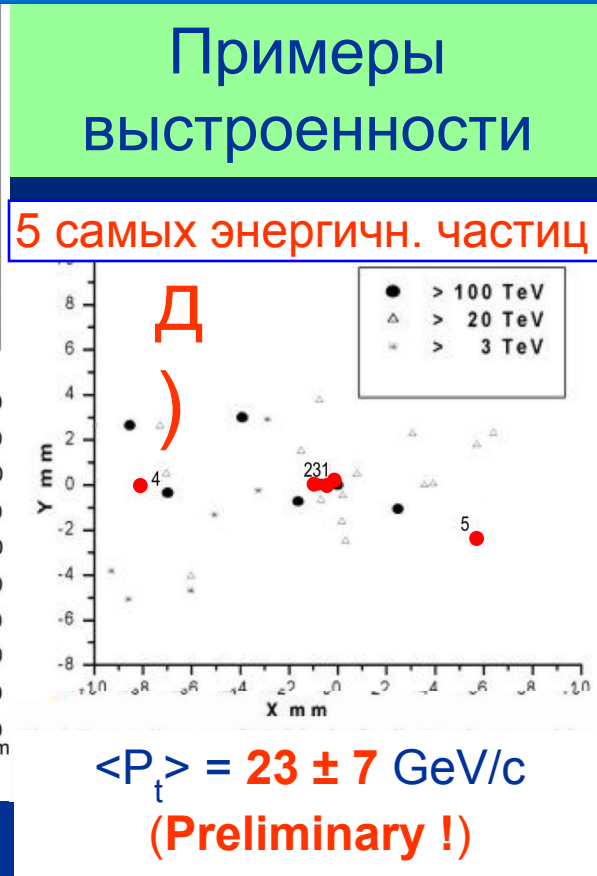
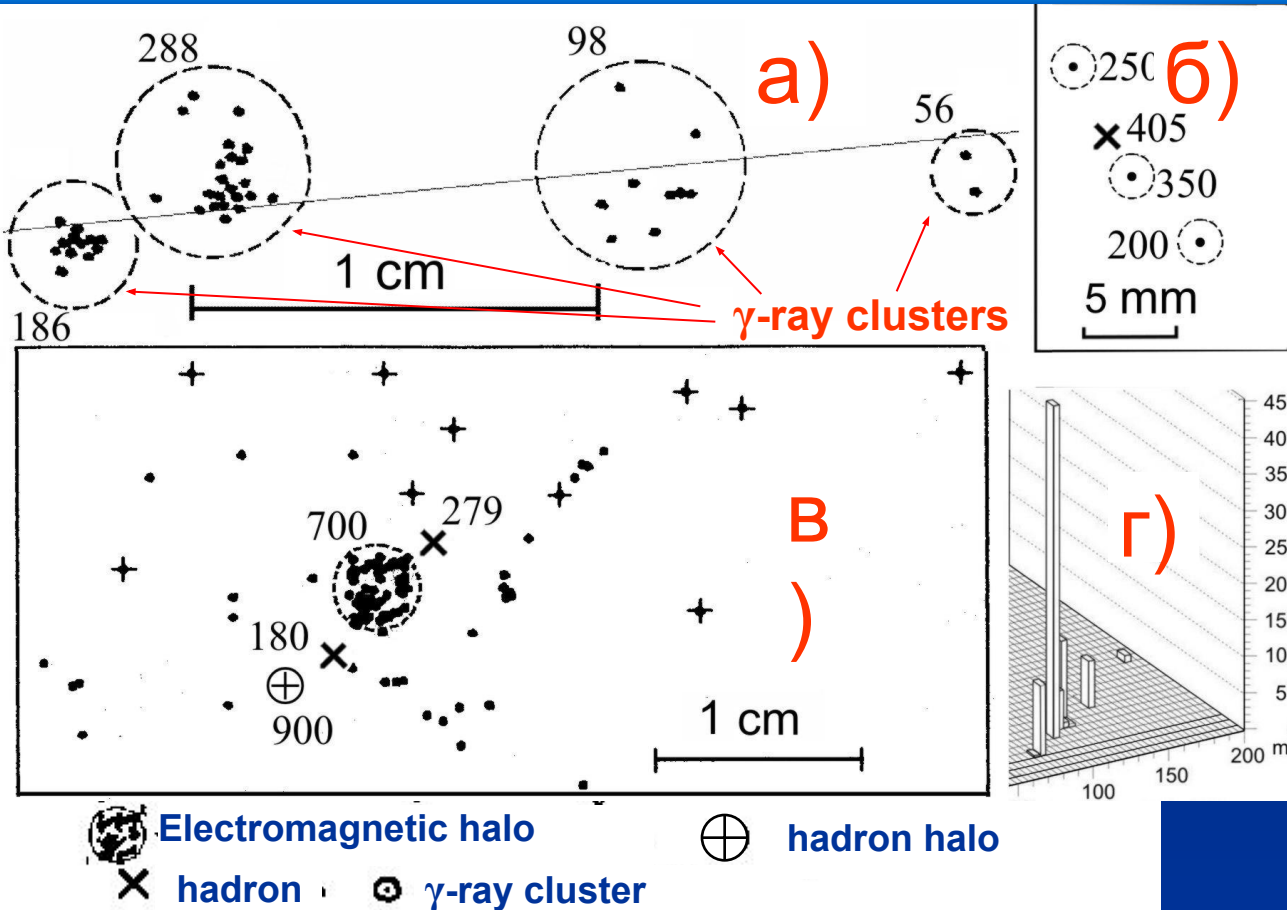
← объясняет (?) (Памир);
не объясняет (Канбала и Чакалтая)

← не объясняет ! (Памир)

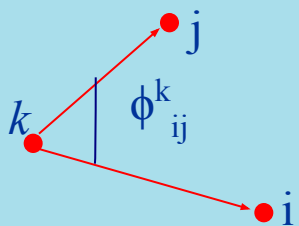
экспериментальные
данные



Выстроенность



“Памир” : **а)** 4- γ -кластерное семейство; **б)** Pb-6: $\lambda_4=0.95$; **в)** Pb-28: $\lambda_4=0.85$.
г) JF2af2 (“Concorde”); **д)** Страна (аэростат). Цифры – энергия в ТэВ

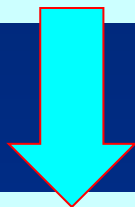


$-1/(N-1) \leq \lambda_N \leq 1,0$
 Выстроенные события: $\lambda_N \geq \lambda_{fix}$
 Обычно: $\lambda_4 \geq 0,8$

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

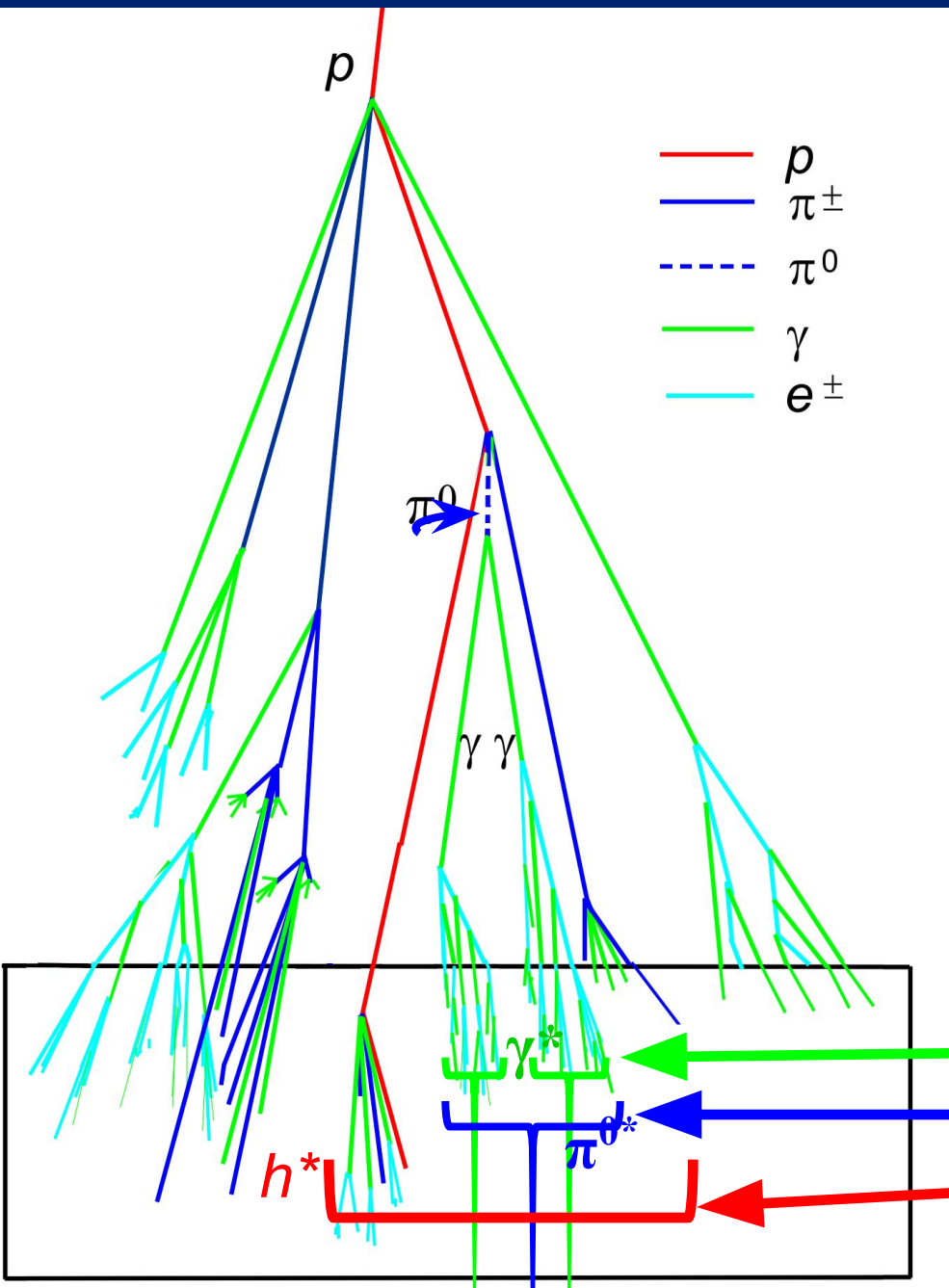
Выстроенность

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



- т.н. «энергетически выделенные центры» (ЭВЦ) (НИИЯФ)

Выстроенность



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

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

ЭВЦ = группы, инициированные

γ -квантами: $Z_C \sim 1$ ТэВ·см

π^0 -мезонами: $Z_C \sim 3$ ТэВ·см

взаимодействиями адронов:

$Z_C \sim 20$ ТэВ·см

Экспериментальная ситуация

Эксперимент «*Памир*» ($\Sigma E_\gamma \geq 700 \text{ TeV}$, $\lambda_4 \geq 0.8$)

- 0.43 ± 0.13 в Pb-РЭК (6 из 14 при 1.0 ожидаемом)
 - 0.27 ± 0.09 в C- РЭК (9 из 35 при 2.1 ожидаемом)
- 0.06 – ожидаемый фон:

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

- 0.50 ± 0.20 in Fe-РЭК (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)
- $\lambda_4(h) = 0.99$ (*Страна*, аэростат)

Коэффициент регрессии
38 квантов: $\beta_{38}(\gamma) = 0.992$

Флуктуации ?

Магнитное поле ?

Электрические поля?

Сильные взаимодействия?

Разнокалиберные экспериментальные данные (“ПАМИР”, Kanbala, Concorde, аэростат)

Замечание

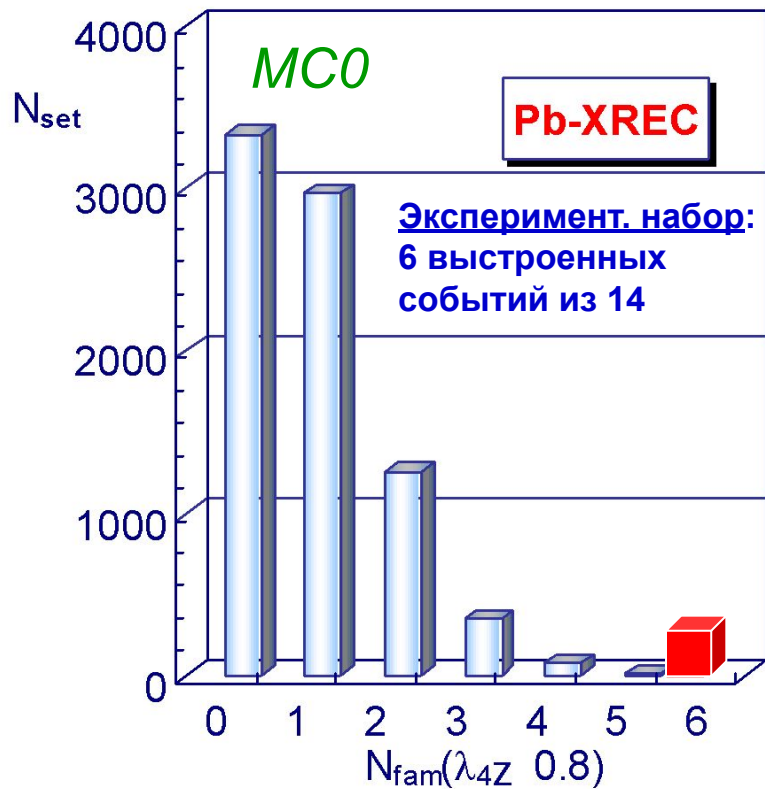
До сих пор существуют два противоположных мнения о происхождении экспериментально наблюдаемой выстроенности:

- выстроенность есть результат тривиальных флуктуаций \Rightarrow для опровержения требуется хорошая статистическая обеспеченность расчетных результатов
- выстроенность может быть объяснена КХД-струями \Rightarrow требуется модель с генерацией КХД струй (МСО)



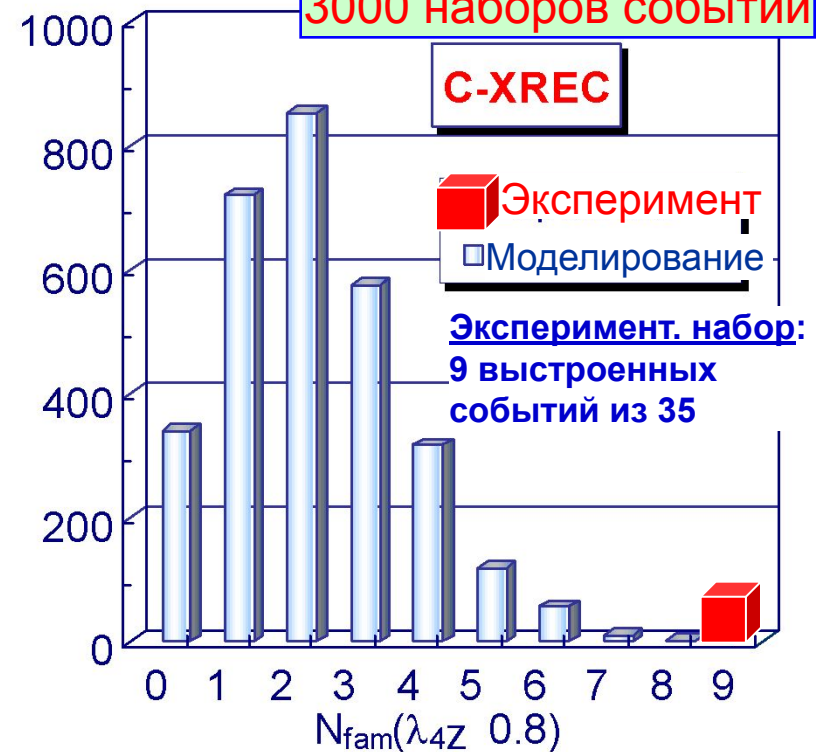
Роль флуктуаций в явлении выстроенности

8000 наборов событий



Эксперимент «Памир»

3000 наборов событий

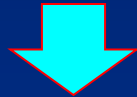


Распределения наборов по числу выстроенных событий в каждом из наборов

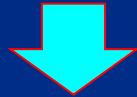
Из 11 тысяч искусственных наборов событий, нет ни одного, подобного экспериментальным!

Выстроенность и флуктуации

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



Биномиальное распределение



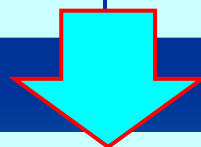
Вероятность получить k выстроенных событий в наборе из n событий:

$$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{(n-k)}, \quad \text{где} \quad k = N_{fam}(\lambda_4 \geq 0,8), \quad n = N_{tot},$$

$q = 1 - p$ и $p = \mathbf{F}(\lambda_4 \geq 0,8)$

Выстроенность и флуктуации

Эксперимент	Критерий отбора	Ожидаемое значение (для 1 события - вероятность)	Наблюдаемое значение	Ожидаемое стандарт. отклонение (σ)	Отклонение от ожидаем. значения (в σ)	Вероятность наблюдать эксперим. данные
Памир-Pb	$\lambda_4 \geq 0.8$	1.0 из 14	6	1.0	5	$0.9 \cdot 10^{-4}$
Памир-С	$\lambda_4 \geq 0.8$	2.1 из 35	9	1.5	4,6	$1.5 \cdot 10^{-4}$
<i>Kanbala</i>	$\lambda_3 \geq 0.8$	1.2 из 6	3	1.2	1.5	$900 \cdot 10^{-4}$
«Страна»	$\lambda_4 \geq 0.99$	0.0029 ± 0.0002	1	0.05	-	$29 \cdot 10^{-4}$
« <i>JF2af2</i> »	$\lambda_4 \geq 0.998$	0.0006 ± 0.0001	1	0.015	-	$6 \cdot 10^{-4}$
	$\lambda_{38} \geq 0.95$	$\ll 10^{-9}$	1	-	-	$\ll 10^{-9}$



Вероятность регистрации всего набора экспериментальных выстроенных событий (*Памир, Kanbala, стратосфера*):

$$W_{\text{fluct}} \ll 0,9 \cdot 10^{-4} \times 1,5 \cdot 10^{-4} \times 9 \cdot 10^{-2} \times 3 \cdot 10^{-3} \times 10^{-9} \ll 10^{-20}$$

Источником феномена выстроенности не могут быть флуктуации

Роль электромагнитных полей

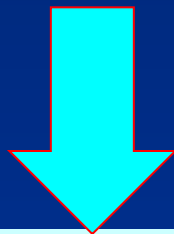
- **Магнитное поле Земли**
 - реально не влияет на выстроенность семейств на уровне гор
 - немного усиливает выстроенность в стратосфере, но для $L \lesssim 1$ м $\Delta F(\lambda_4 > 0,8) < 0,01$
- **Электрические грозовые поля** (расчет: $E_{\text{crit}} \approx 100$ кВ/м, $\Delta U \approx 1$ ГВ)
 - 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: $F(\lambda_4 > 0,8) \approx 0,16$;
 - **Но!**
 - подобные поля образуются крайне редко (если вообще образуются! Для Памира $E_{\text{crit}} \approx 50$ кВ/м)



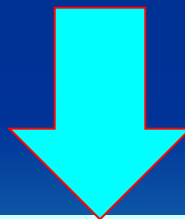
Выстроенность

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

Кинематика

- кинематические эффекты в дифракционных процессах (СморСмир 90, Zhu 90, Cardevielle 01);

«Новая» физика

- новое сильное взаимодействие при энергиях $\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ и генерация бозонов и адронов, включающих новые кварки высшей цветовой симметрии (White 94);

Передача больших Q_t

- 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 $\langle p_t \rangle$
- *EMD* – электромагнитная диссоциация и развал налетающих ядер в электрическом поле ядер воздуха (\Rightarrow усиление влияния магнитного поля Земли)
- *ISD* – дифракционная диссоциация с увеличенным в 10 раз сечением
- *K2M* – существенное увеличение дисперсии распределения по K_{inel} и его постепенная трансформация в двугорбовое (максимумы при $K_{inel} \sim 0$ и $K_{inel} \sim 1$, Г.Т.Зац)
- *PNP* – неупругие (фотоядерные) взаимодействия γ -квантов
- *ROT* – вращение с очень большим значением спина невзаимодействующей части налетающего ядра с последующим компланарным развалом

Выстроенность и модели взаимодействия

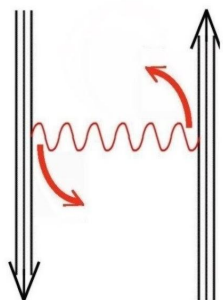
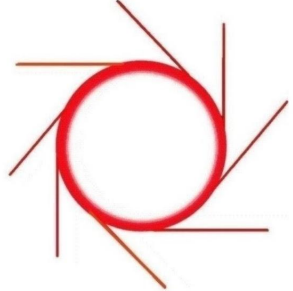
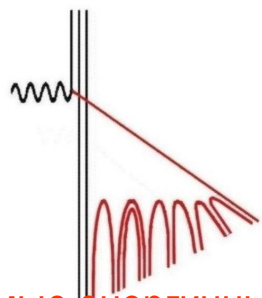
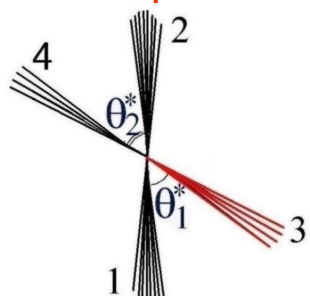
- *SHDID* – полужесткая двойная дифракционная неупругая диссоциация, протекающая через натяжение кварк-глюонной струны между полужестко рассеянным быстрым кварком и кварками-спектаторами налетающего адрона и последующий разрыв струны с образованием вторичных частиц (Ройзен 94).
- *SHDQ* – новое сильное взаимодействие при $\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ и генерация бозонов и адронов с новыми кварками высшей цветовой симметрии (White 94).
- *X* – гипотетическая длиннопробежная компонента, взаимодействующая с малым сечением неупругого взаимодействия $\sigma_{\text{inel}}^{X\text{-air}} \approx 0,2\sigma_{\text{inel}}^{p\text{-air}}$ 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: больше p_t – меньше E
- Каскадное развитие быстро разрушает компланарность
- Частицы с повышенной проникающей способностью (т.е. $\lambda_{\text{compl}} > \lambda_{\text{inf } p\text{-air}}$) обладают высокой потенциальной эффективностью для создания выстроенных событий.

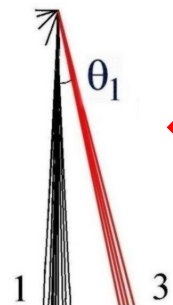
Выстроенность и модели взаимодействия

СЦМ

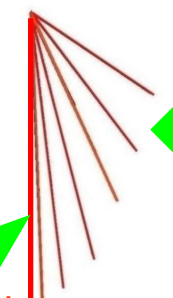


Лаб

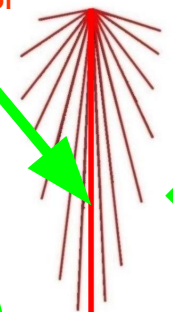
a)



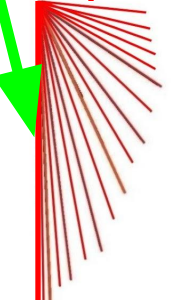
b)



c)



d)



Нужна специфическая корреляция:

выше p_t – ниже p_L

a) КХД струи: $\text{Sin } \theta_i \approx \text{const}$

⇒ неподходящая корреляция

⇒ 2 отдельных кластера

⇒ **нет** наблюдаемой выстроенности

b) *SHDID* (Ройзен 1994) –

разрыв натянутой кварк-глюонной струны в дифракционном кластере:

⇒ необходимая корреляция

⇒ выстроенность **есть**

c) 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

КХД струи: Лохтин и др. 2005

РУТНIA и $\sqrt{s} = 14$ ТэВ (LHC) \Rightarrow **Вывод:**

Выстроенность 3-х (!) **КЛАСТЕРОВ**

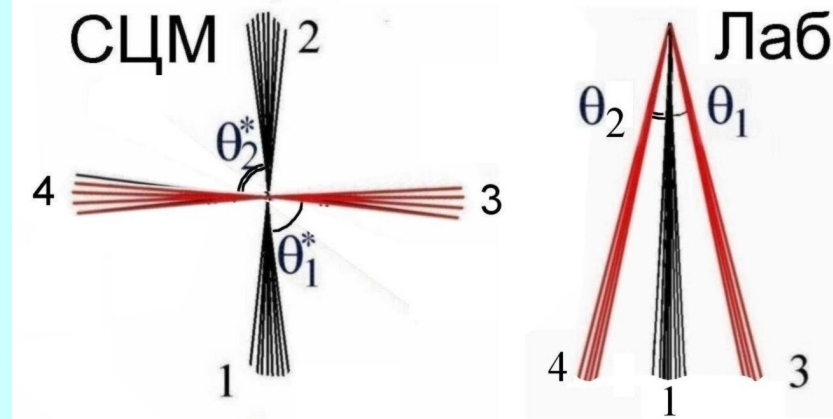
(близкая к эксперименту) только (!)

1. при $E_{3,4}^{jet} \geq 3$ ТэВ, т.е. $E_{3,4}^{jet} \sim E_1$
($\sigma \ll \sigma_{inel}$)

2. в ускорительных экспериментах, где расстояние от **ТОЧКИ**
взаимодействия до **уровня наблюдения**, т.е. толщина мишени $\Delta x \sim 0$
(в экспериментах с РЭК $\Delta x > 500$ 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)

$t_0 - l \sim \Delta b$ и $\omega \sim \text{const}$ ($\Delta b \ll |b/2|$)

$l \sim \text{const}$ 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 ^{#,*}

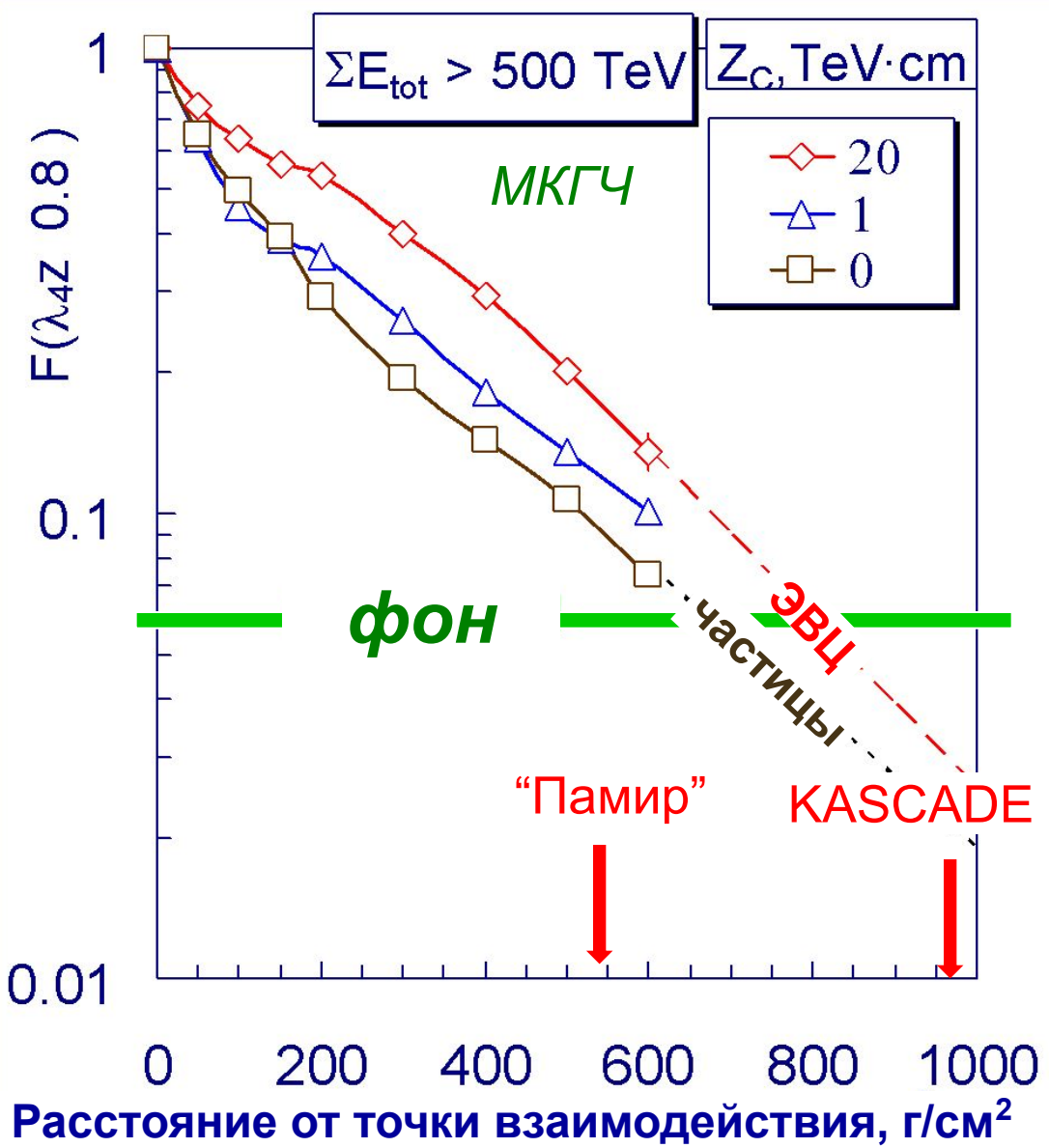
- частицы (π и K) рождаются компланарно с нормальным $\langle p_t \rangle$ относительно плоскости компланарности
- множественность $\langle n_s \rangle \approx 10$;
- $\langle p_T^{\text{corl}} \rangle \approx 1 - 2,3$ ГэВ/с в плоскости компланарности

[#] Параметры взаимодействия относятся к фрагментационной области

^{*} Примитивная (!) эвристическая модель для изучения факторов, связанных с возможностью наблюдения выстроенности



Зависимость $F(\lambda_4 \geq 0,8)$ от расстояния до точки взаимодействия



$F(\lambda_4 \geq 0.8)$ зависит от

- глубины в атмосфере
- расстояния до уровня наблюдения
- параметра декаскадирования Z_c

Если на уровне гор $F(\lambda_4 \geq 0,8) \geq 0,2$, то

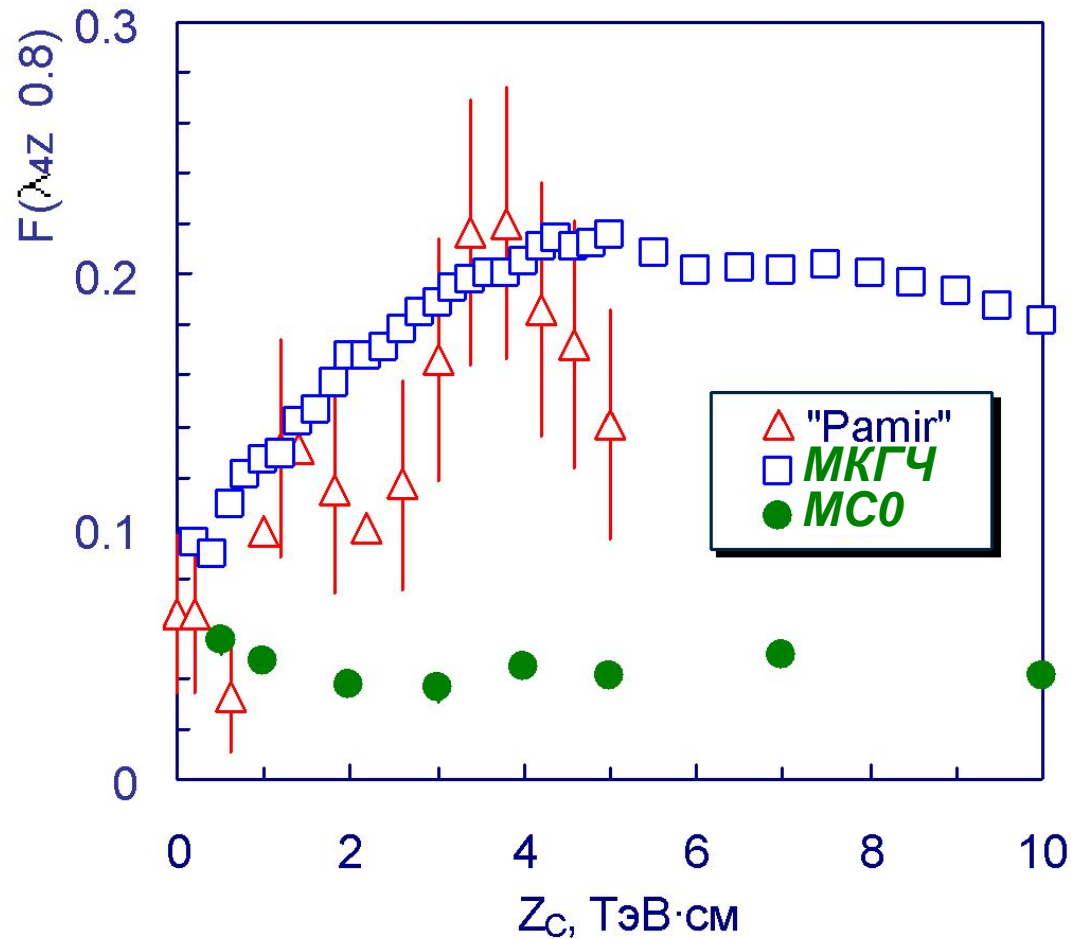
$$\sigma_{\text{coll}}^{p\text{-air}} \sim \sigma_{\text{inel}}^{p\text{-air}}$$

Выстроенность может изучаться только в

- высокогорных и стратосферных экспериментах с высоким разрешением ($\Delta x \lesssim 1 \text{ см}$)
- на коллайдерах

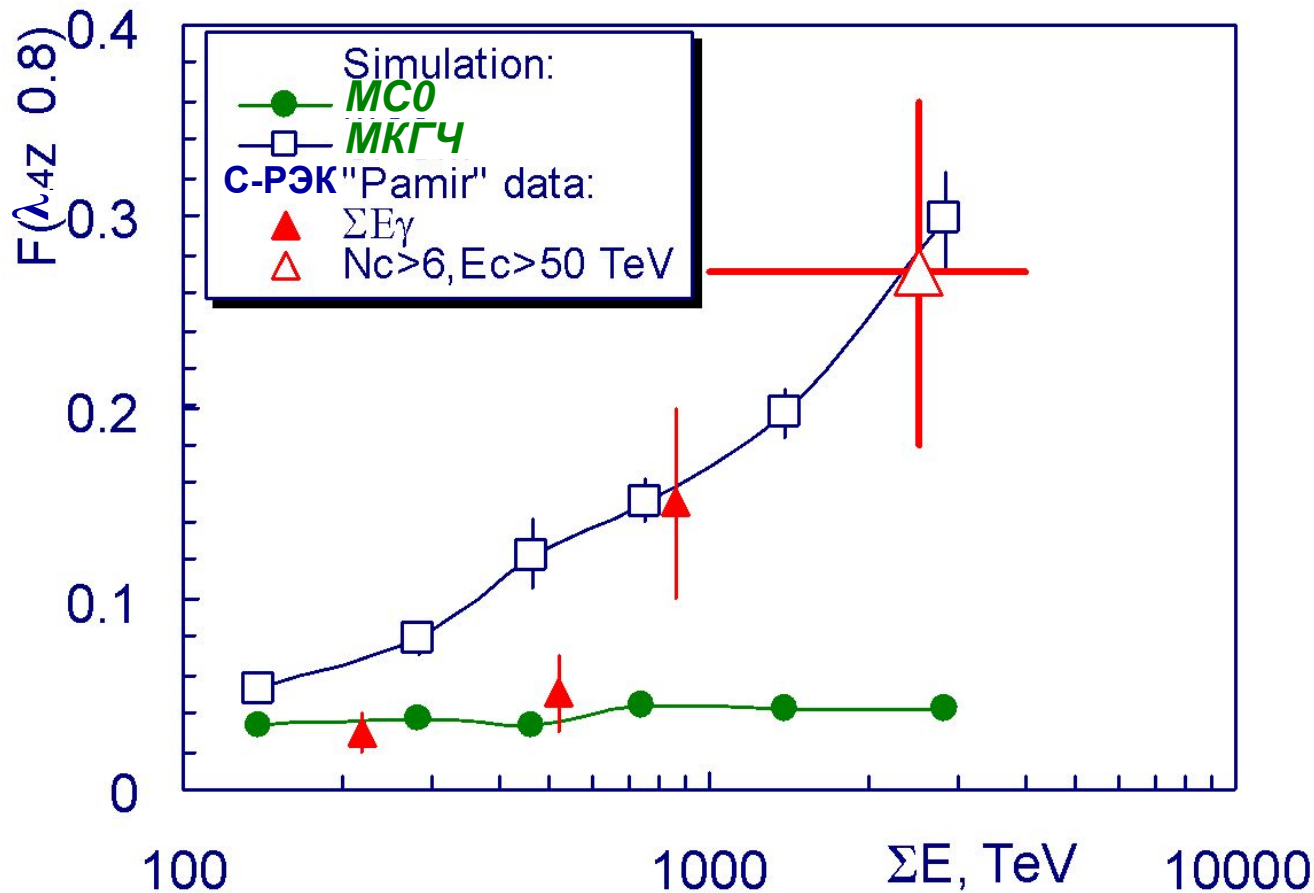
Выстроенность – экспериментальные данные и расчет

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



- $F(\lambda_4 \geq 0.8)$ зависит от Z_C
- «Памир» – максимум при $Z_C \approx 4$ ТэВ·см
- МКГЧ объясняет эффект
- МСО не объясняет эффект

Зависимость доли выстроенных семейств $F(\lambda_4 \geq 0,8)$ от ΣE_γ

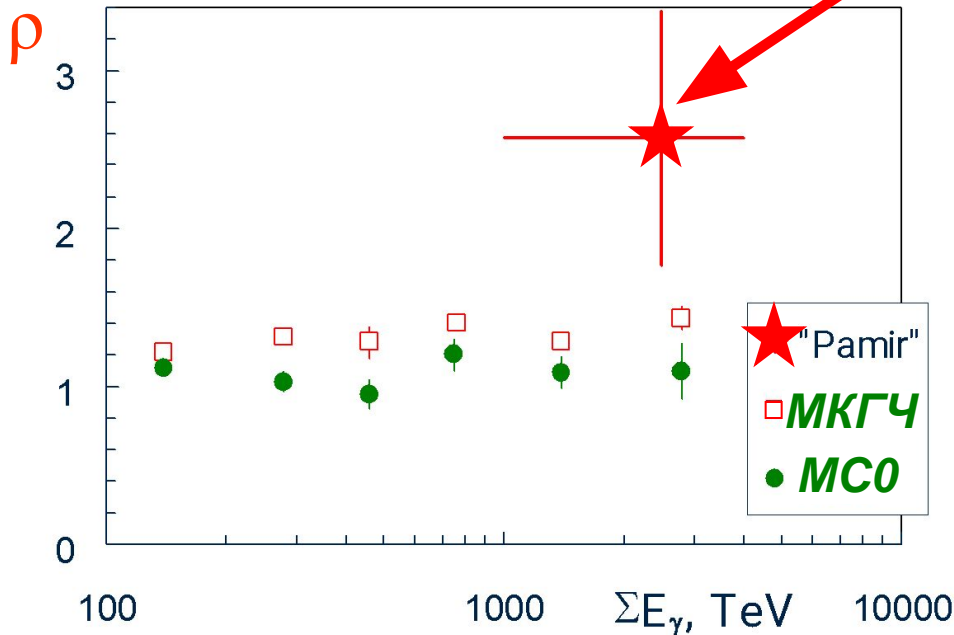
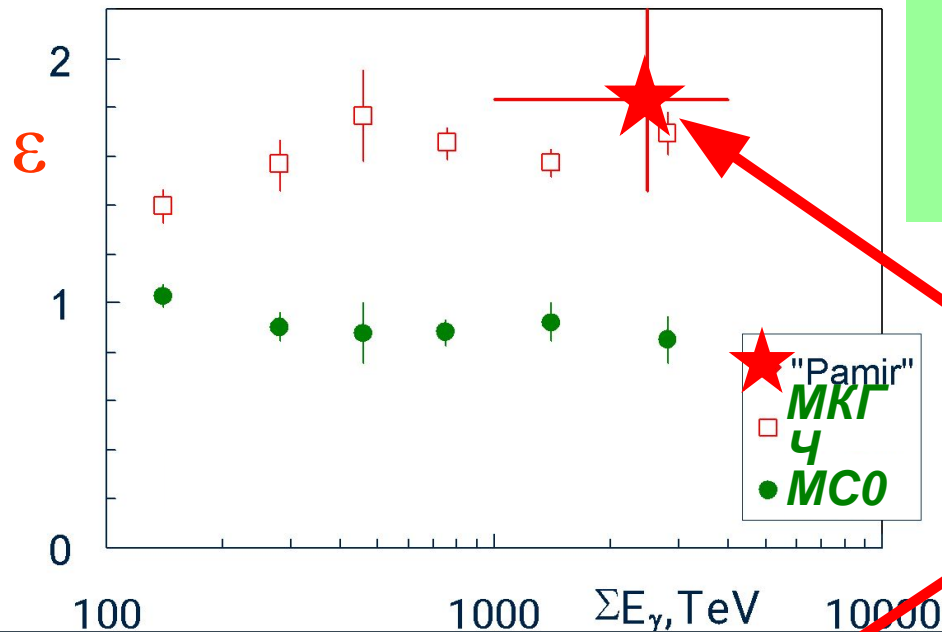


▲ △ Эксперимент: $F(\lambda_4 \geq 0.8)$ зависит от ΣE_γ

□ *МКГЧ* объясняет эффект

• *MC0* не объясняет эффект

Выстроенность – экспериментальные данные и расчет



Отношение значений $\langle ER \rangle$ & $\langle R \rangle$
в выстроенных и
невыстроенных событиях

«Памир» (Borisov *et al* 2001) *

$$\varepsilon = 1.83 \pm 0.37$$

$$\rho = 2.57 \pm 0.81$$

$$\varepsilon = \frac{\langle \overline{ER} \rangle (\lambda_4 \geq 0.8)}{\langle \overline{ER} \rangle (\lambda_4 < 0.8)}$$

$$\rho = \frac{\langle \overline{R} \rangle (\lambda_4 \geq 0.8)}{\langle \overline{R} \rangle (\lambda_4 < 0.8)}$$

$\langle ER \rangle_{4 \text{ выстр}} > \langle ER \rangle_{4 \text{ невыстр}}$
 $\langle R \rangle_{4 \text{ выстр}} > \langle R \rangle_{4 \text{ невыстр}}$

* $N_c \geq 6, E_c \geq 50 \text{ ТэВ}$

- КГЧ меняет поперечные характеристики
выстроенных γ - h семейств

Феноменологические ограничения на модель сильных взаимодействий при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ

Модель сильных взаимодействий при $E_0 \approx 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ) должна удовлетворять следующим требованиям

- должен проявляться канал компланарной генерации частиц (КГЧ), характеризующийся процессами с большими поперечными импульсами ($\langle p_t \rangle \gtrsim 2$ ГэВ/с) наиболее энергичных частиц в плоскости компланарности
- сечение КГЧ-процесса $\sigma_{\text{compl}}^{p\text{-air}}$ должно быть сравнимым с неупругим сечением $\sigma_{\text{inel}}^{p\text{-air}}$ при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ
- необходима специфическая корреляция между продольными и поперечными импульсами компланарно генерируемых частиц в Лаб-системе: больше p_t – меньше p_L
- продольные характеристики вторичных частиц и K_{inel} не должны сильно отличаться от предсказаний МКГС.

Методические результаты

- На основе МКГС взаимодействия адронов и приближения А теории ЭМ каскадов создан код *MCO* 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 *MCO* 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 $\sim 10^{18}$ 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 $\sim 10^7$ до $\sim 10^{15}$ 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 $E_0 \lesssim 5 \cdot 10^{15}$ 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 $E_0 \sim 10^{16}$ эВ $0,5 < K_{inel} \lesssim 0,6$, 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 $\langle p_t \rangle \lesssim 1$ 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



Основные результаты, представленные к защите

- 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 $E_0 \approx 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} \gtrsim 4$ ТэВ) канала компланарной генерации частиц (КГЧ) с $\langle p_t \rangle \gtrsim 2$ ГэВ/с
- Впервые показано, что во взаимодействиях протонов сечение процесса КГЧ $\sigma_{\text{compl}}^{p\text{-air}}$ должно быть сравнимым с полным неупругим сечением $\sigma_{\text{inel}}^{p\text{-air}}$ при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ.

Личный вклад

1. Представляемая диссертация подводит итоги сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных, проводившегося автором в качестве члена Сотрудничества «Памир».
2. 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».
3. 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.



Апробация работы

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!



Ответы на замечания ведущей организации НИИЯФ МГУ

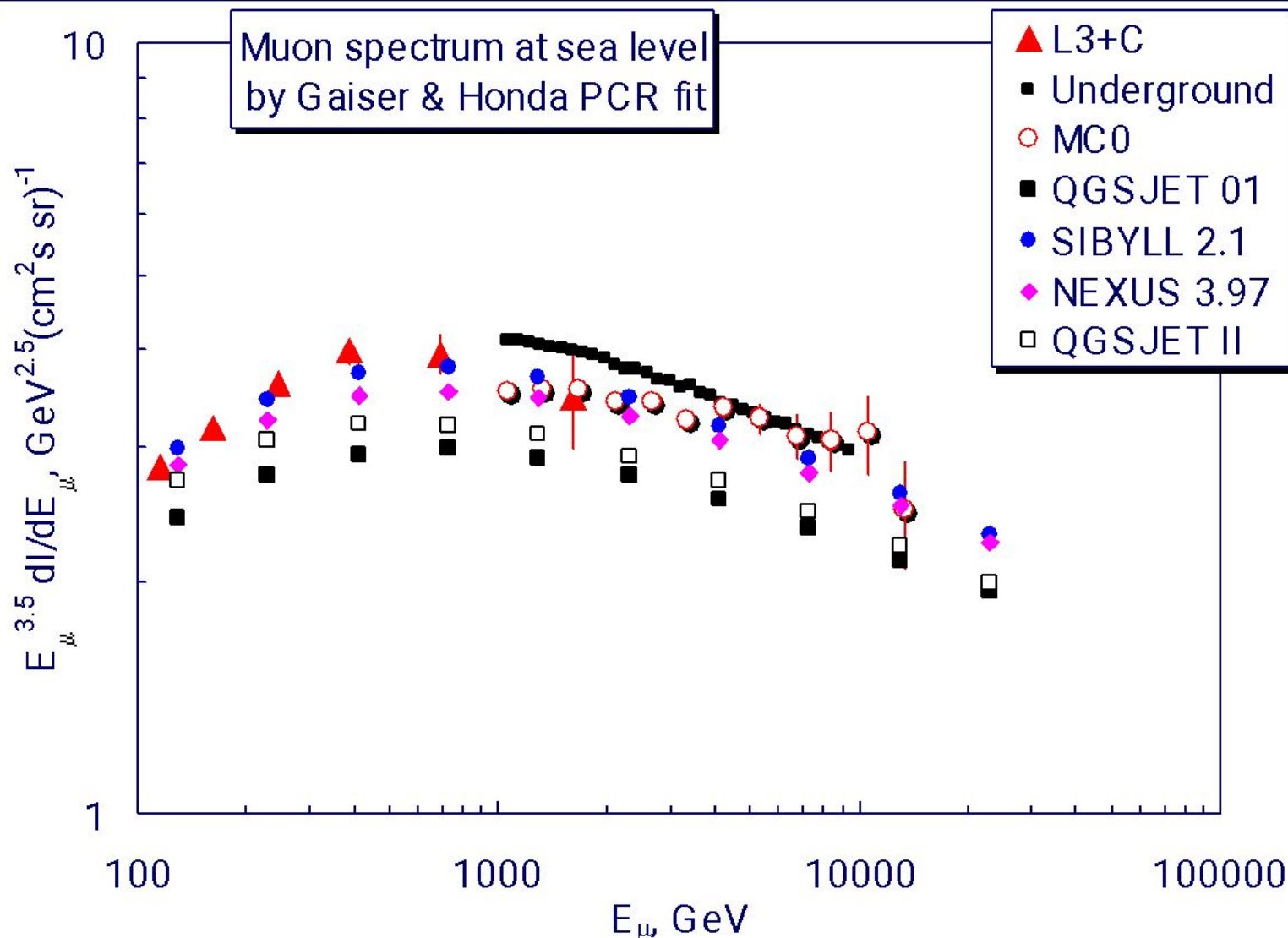
1. В диссертации было бы полезно часть материала вынести в приложения, например, п. 1.4 о переходах между системами отсчета, п. 1.10 о компьютерной организации моделирования.
- Автор согласен с этим замечанием, поскольку действительно это могло бы улучшить восприятие материала



2. 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 *MC0*, 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

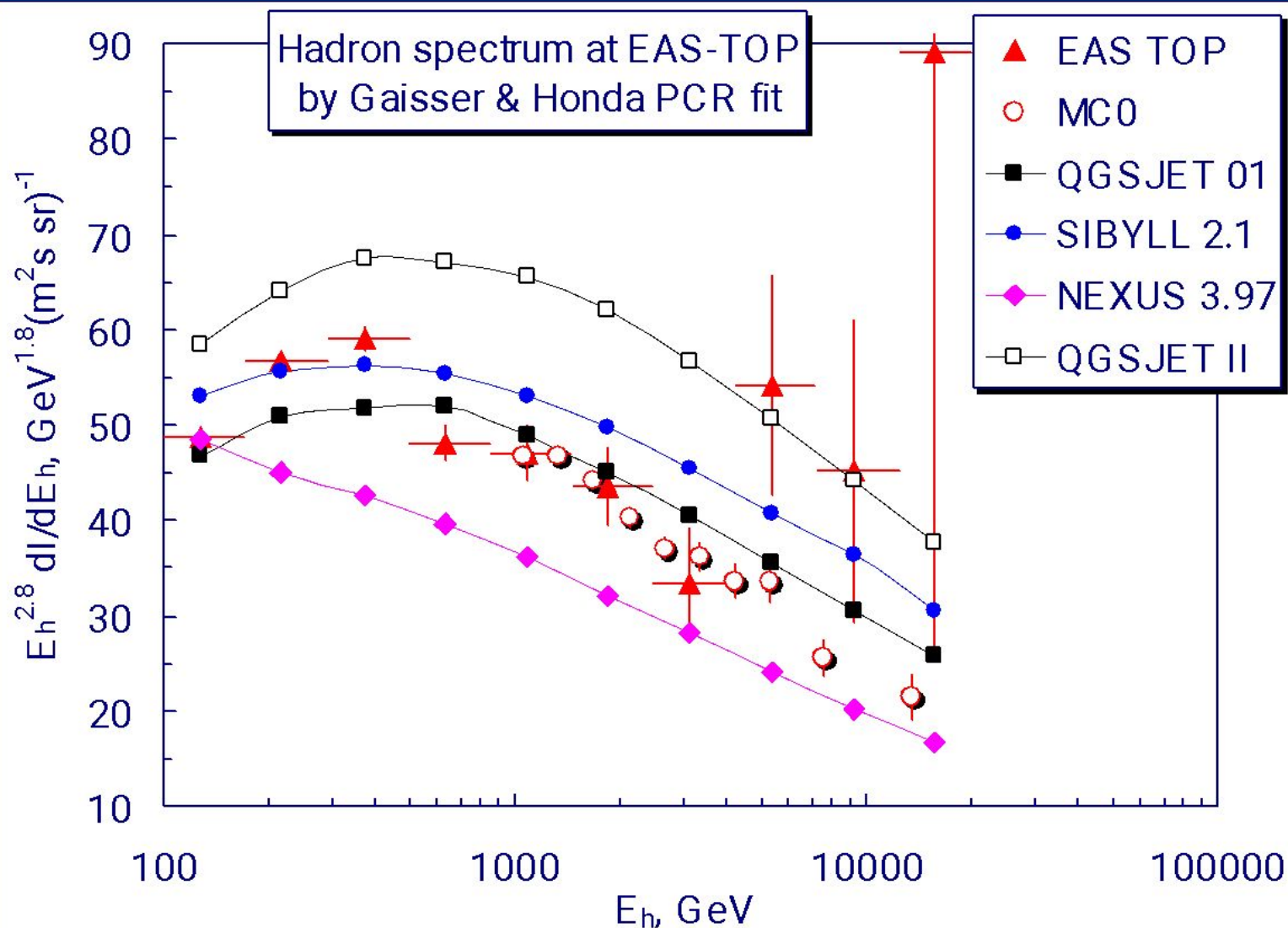
Спектр мюонов на уровне моря (Gaisser & Honda PCR fit)



Предсказания • близко к экспериментальным данным L3+C

MC0 • рядом с NEXUS 3.97 и SIBYLL 2.1

Спектр адронов на уровне 820 г/см² (Gaisser & Honda PCR fit)



- Предсказания
- близко к эксперименту EAS-TOP;
 - MC0* • между QGSJET 01 и NEXUS 3.97, но немного круче

Ответы на замечания ведущей организации НИИЯФ МГУ

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



3. Требуется дополнительный комментарий в вопросе 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 $F(\lambda_4 \geq 0,8)$ (а также выстроенных событий в ШАЛ и взаимодействиях):
данная диссертация **МСО:**
 $0,059 \pm 0,003$
Дунаевский (ФИАН), **MQ:** 0,08 $\pm 0,02$
Галкин и др. (НИИЯФ), **QGSJET 98:** 0,06
Т. Antoni *et al.* (KASCADE, адроны ШАЛ, **CORSIKA**): 0,06
Лохтин и др. (НИИЯФ), **PYTHIA**
(реалистичные условия наблюдения): 0,06
- J.-N. Cardevielle *et al.* (γ -семейства), **HDPM** : 0,08
Но! При анализе не было перехода в плоскость, перпендикулярную к оси каскада. Для наклонных событий автоматически появляется дополнительная вытянутость

• ускорительные данные (Яндарбиев дисс. НИИЯФ) : 0,06

4. При анализе выстроенности в суперсеме́йстве $JF2af2$, наблюдаемом в стратосфере, приведен только коэффициент регрессии β_{38} для 38 наиболее энергичных частиц, а критерий λ_{38} 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. Cardevielle, несмотря на неоднократные обращения и его обещания это сделать. Поэтому пришлось ограничиться весьма достоверной оценкой с большим запасом на основе расчетов проф. J.-N. Cardevielle, показавших сильную корреляцию между параметрами β и λ



5. 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 $\Sigma E_\gamma > 700$ ТэВ в свинцовых камерах: $F(\lambda_4 > 0,8) = 0,43$
- зависимость степени выстроенности γ - h семейств от числа адронов, входящих в их состав
- обнаружение очень высокой степени выстроенности уникального события «Страна»

1. 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 10^{16} 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 ($\sim 10^{15} - 10^{16}$ 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 **KASCADE** с очень быстрым вымиранием компонент при $E_0 > Z \cdot 3 \cdot 10^{15}$ 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

2. 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 $\theta \sim 1/E$, а энергии частиц очень высоки ($> n \cdot \text{ТэВ}$), то эффект многократного рассеяния (**в данном случае!**) не слишком силен сам по себе (поперечные характеристики γ - h семейств определяются, в первую очередь, ядерными $p_t \sim 0,4 \text{ ГэВ/с}$), а упоминаемая корреляция представляет еще более слабый эффект

3. 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.



4. Методы повышения эффективности моделирования электронно-ядерных 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



1. Рассматриваемые в первых двух главах программы *MCO* 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 потемнений, 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 l_{cell} для пятен потемнения...



- Несомненно, сопоставление результатов расчетов, получаемых по различным программам является хорошей дополнительной проверкой корректности разработанных моделей и программ
- Характеристики кода *MCO* 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

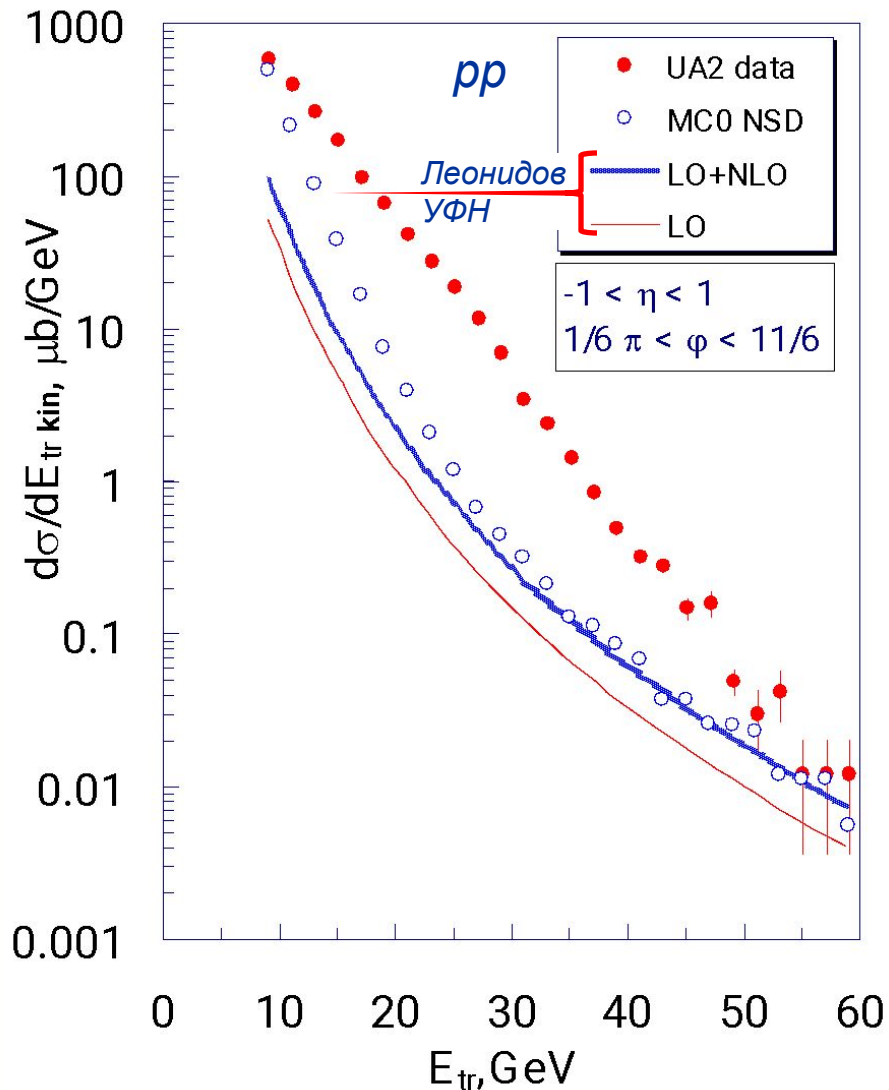


3. Автор не использовал прекрасную возможность проверки своей модели по мюонной компоненте космических лучей, хотя на стр.111 он прямо пишет: "Любая модель ... должна, в первую очередь, описывать спектры одиночных частиц, то есть электромагнитную, адронную и мюонную (!) компоненты"

- 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)

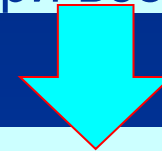


1. Результаты моделирования не сравниваются с экспериментальными данными при $10 < p_t < 60$ ГэВ/с, тогда как именно в этой области используемая модель мини-струй, скорее всего, является неадекватной



Предсказания $MC0$

- ниже UA2 при $E_{tr} > 10$ ГэВ
- ближе к UA2, чем КХД при $E_{tr} < 30$ ГэВ (из-за министруй)
- стремятся к КХД при $E_{tr} \rightarrow 30$ ГэВ (выход на КХД режим)
- выше КХД при всех E_{tr}



- КХД не объясняет данные $UA2$
- Определенные модельные ухищрения могут сблизить теорию и эксперимент
- косвенное указание на дополнительный процесс с большими p_t ?

2. Пренебрегается кронин-эффектом при описании взаимодействия ядер

- Кронин-эффект (увеличение выхода вторичных частиц на ядрах при $p_t \gtrsim 2$ ГэВ/с) эффективно проявляется
 - в центральных столкновениях ядер
 - в центральной кинематической области ($\eta \sim 0$)
 - составляет $\lesssim 10\%$
- γ -h семейства чувствительны, в первую очередь, к эффективной интенсивности протонов
- Неучет кронин-эффекта не должен сказаться на основных выводах диссертации



2. 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 π^0 подавляется в пользу генерации π^\pm

Основные результаты, представленные к защите

1. 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.
2. Общедоступное программное обеспечение для компьютерного моделирования ЯЭК в слоистом веществе и процедур обработки данных, получаемых в РЭК, в области энергий до $\sim 10^{15}$ эВ.
3. Методы повышения эффективности моделирования генерации ЯЭК в атмосфере применительно к определённым задачам.
4. Результаты расчетов широкого круга характеристик космического излучения, измеряемых в экспериментах Сотрудничества «Памир».
5. Вывод, что характеристики сильного взаимодействия адронов с ядрами воздуха в области энергий $E_0 \lesssim 5 \cdot 10^{15}$ эВ в целом хорошо описываются в рамках модели кварк-глюонных струн.

Основные результаты, представленные к защите

6. Вывод, что если определить коэффициент неупругости K_{inel} как доли энергии, уносимой всеми частицами, кроме самого энергичного адрона, то при $E_0 \sim 10^{16}$ эВ $0,5 < K_{inel} \lesssim 0,6$.
7. Результаты сравнительного анализа наиболее широкого набора экспериментальных данных и результатов моделирования явления выстроенности наиболее энергичных структур ЯЭК.
8. 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 $\langle p_t \rangle < 1$ ГэВ/с в плоскости компланарности.
9. Вывод, что развитие ЯЭК быстро разрушает его компланарность.
10. Вывод, что при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ проявляется новый канал, реализующийся в виде компланарной генерации частиц (КГЧ).
11. Вывод, что сечение КГЧ, обусловленной взаимодействиями протонов, при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ КГЧ сравнимо с полным неупругим сечением.

1. Произведено детальное, более широкое, чем было сделано до настоящего времени, сравнение различных характеристик ЯЭК в рамках единой модели, с учетом процессов регистрации.
2. Показано, что модель кварк-глюонных струн хорошо описывает сравнительно широкий круг данных РЭК, но K_{inel} растет медленнее, чем получено в предыдущих работах по данным РЭК.
3. Рассмотрено влияние ряда факторов на азимутальные характеристики γ - h семейств и показана недостоверность выводов ряда работ о причинах появления азимутальных эффектов.
4. 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.

6. Показано, что развитие ЯЭК быстро разрушает компланарность.
7. Предложена феноменологическая картина характеристик фрагментационной области адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях ($E_0 \gtrsim 10^{15}$ эВ), описывающая наиболее широкий круг экспериментальных данных по сравнению с другими существующими в данной области исследований моделями.
8. Сделан вывод, что эффект выстроенности может быть объяснен только, если при $E_0 \gtrsim 10^{15}$ эВ проявляется новый канал, реализующийся в виде компланарной генерации частиц (КГЧ).
9. Впервые показано, что сечение КГЧ, обусловленной взаимодействиями протонов, при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ сечение КГЧ сравнимо с полным неупругим сечением.



1. 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.
2. Разработано общедоступное программное обеспечение для моделирования ЯЭК в слоистом веществе и процедур обработки данных, получаемых в РЭК, при энергиях до $\sim 10^{15}$ эВ, которое может быть применено в ряде экспериментов в космических лучах
3. Предложены новые методы повышения эффективности моделирования электронно-фотонных каскадов, которые могут быть применены в различных исследованиях в космических лучах.



Практическая ценность

1. 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).
2. Материалы, содержащиеся в диссертации, могут быть использованы в ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ, МИФИ, ИФ АН Гр, ФТИ АН Уз, Лодзинском Университете (Польша).

