

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,  $\gamma$ - $h$  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  $\sigma_{inel}$  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

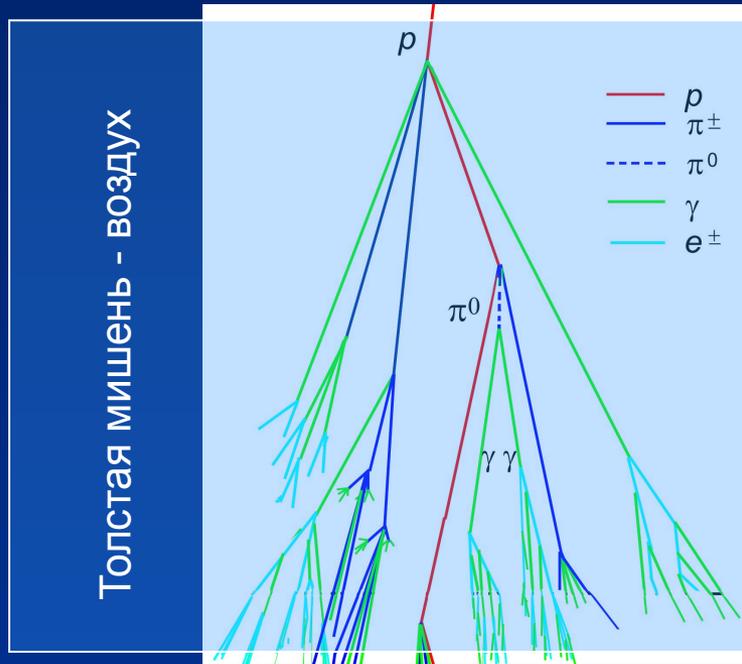
### Эксперименты с РЭК

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

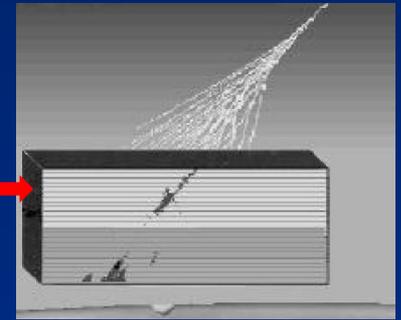
- Исследование свойств адрон-ядерных взаимодействий в фрагментационной области при энергиях  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ ( $\sqrt{s} \gtrsim 4$  ТэВ) на основе сравнительного анализа экспериментальных данных РЭК и результатов моделирования;
- разработка феноменологической модели взаимодействий при этих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

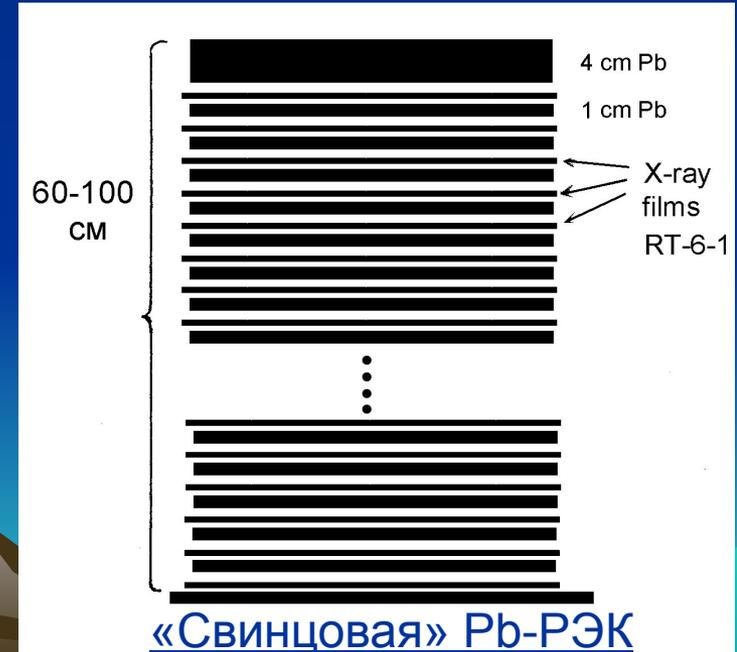
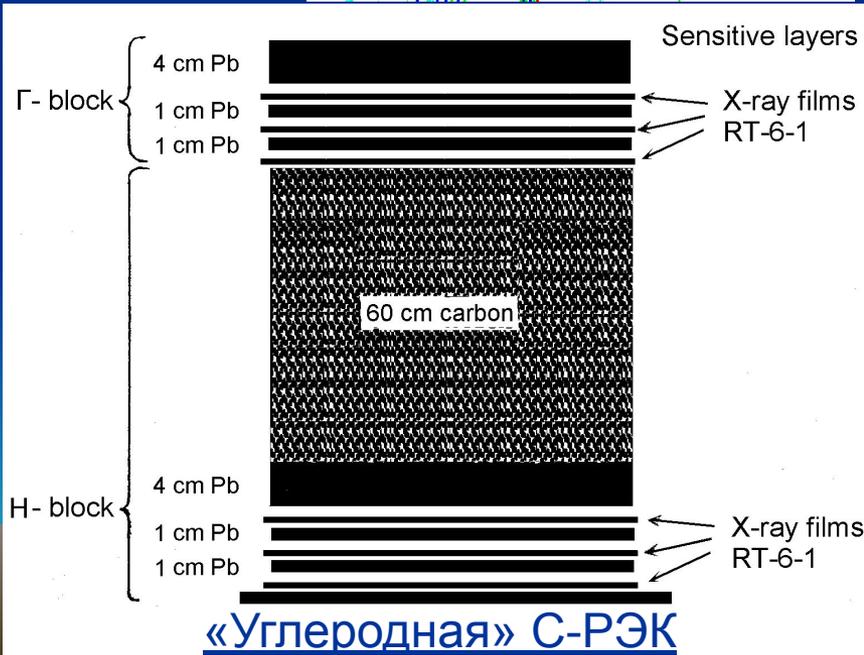


РЭК на аэростатах и самолетах

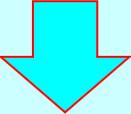


Пространственное разрешение  $\lesssim 50 \mu\text{m}$

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 MCO

- Код *MCO* (1990) был первым кодом моделирования сильных взаимодействий при развитии ЯЭК, учитывающим одновременно
  - модель кварк-глюонных струн (Шабельский, КТ-М 1988)  $\Rightarrow$  рост  $\sigma_{inel}$  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		
	$K_\gamma$	0.17	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21
	$K_{\pi^\pm}$	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:  $E_\gamma \approx 0,01 E_0$

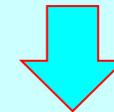
Тип данных	$\beta_\gamma (\geq 5 \text{ ТэВ})$	Лит.
Расчет <i>МСО</i>	$2.11 \pm 0.03$	
Эксперимент	$2.07 \pm 0.06$	[84]
	$2.00 \pm 0.08$	[82]
	$2.00 \pm 0.05$	[83]

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  $\gamma$ -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  $E_\gamma$  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	[89]

Тип адрона	$I_h$ (%)	$\beta$ 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  $E_h^\gamma$  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 ( $\gamma/e^\pm$ ,  $h$ ) с  $E \gtrsim 5$  ТэВ)

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

*МСО* согласуется с экспериментом по интенсивности множественности  $\gamma$  и  $h$

Тип данных		РЭК	$\langle n'_\gamma \rangle$	$\langle n_h \rangle$	$W_n(n_h = 0)$	Лит.
Эксперимент						
<i>МСО</i>	$\begin{cases} K_\gamma^1 \\ K_\gamma^2 \end{cases}$		$10.7 \pm .3^*$	$2.0 \pm .2$ $2.6 \pm .2$	$0.18 \pm .03$	
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 $\gamma$ -h семействах

Тип данных		РЭК	$\langle Q_\gamma \rangle$	$W_Q(Q_\gamma \geq 0.9)$	Лит.
Эксперимент <i>МСО</i>	{ $K_\gamma^1$ $K_\gamma^2$	Рb	$0.83 \pm .06$	$0.44 \pm .09$	[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**

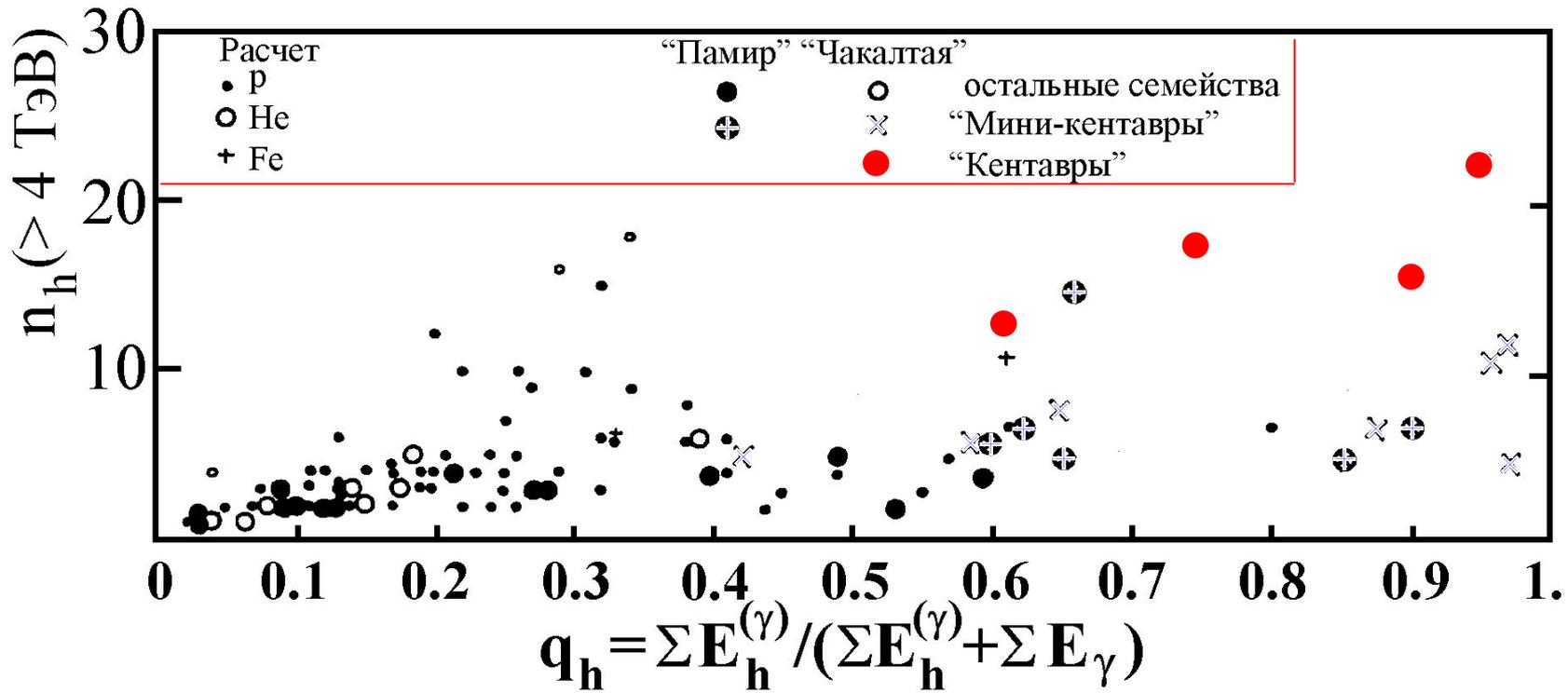
- по корреляциям между  $\gamma$  и  $h$
- поперечным характеристикам

## Пространственно-энергетические характеристики $\gamma$ -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>	{ $K_\gamma^1$ $K_\gamma^2$	Рb	$20 \pm 4$	$273 \pm 47$	$26 \pm 5$	$375 \pm 70$	[10]
			$21 \pm 1$	$269 \pm 18$	$27 \pm 2$	$350 \pm 30$	
					$32 \pm 2$	$404 \pm 35$	
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  $\gamma$ -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  $\gamma$ - $h$  семейств
  - слишком жесткие спектры ЭМ и адронной компонент
- Модели типа *кварк-глюонных струн (MCO)* хорошо описывают данные эксперимента «Памир» по
  - одиночным адронам;
  - ЭМ компоненте;
  - $\gamma$ - $h$  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

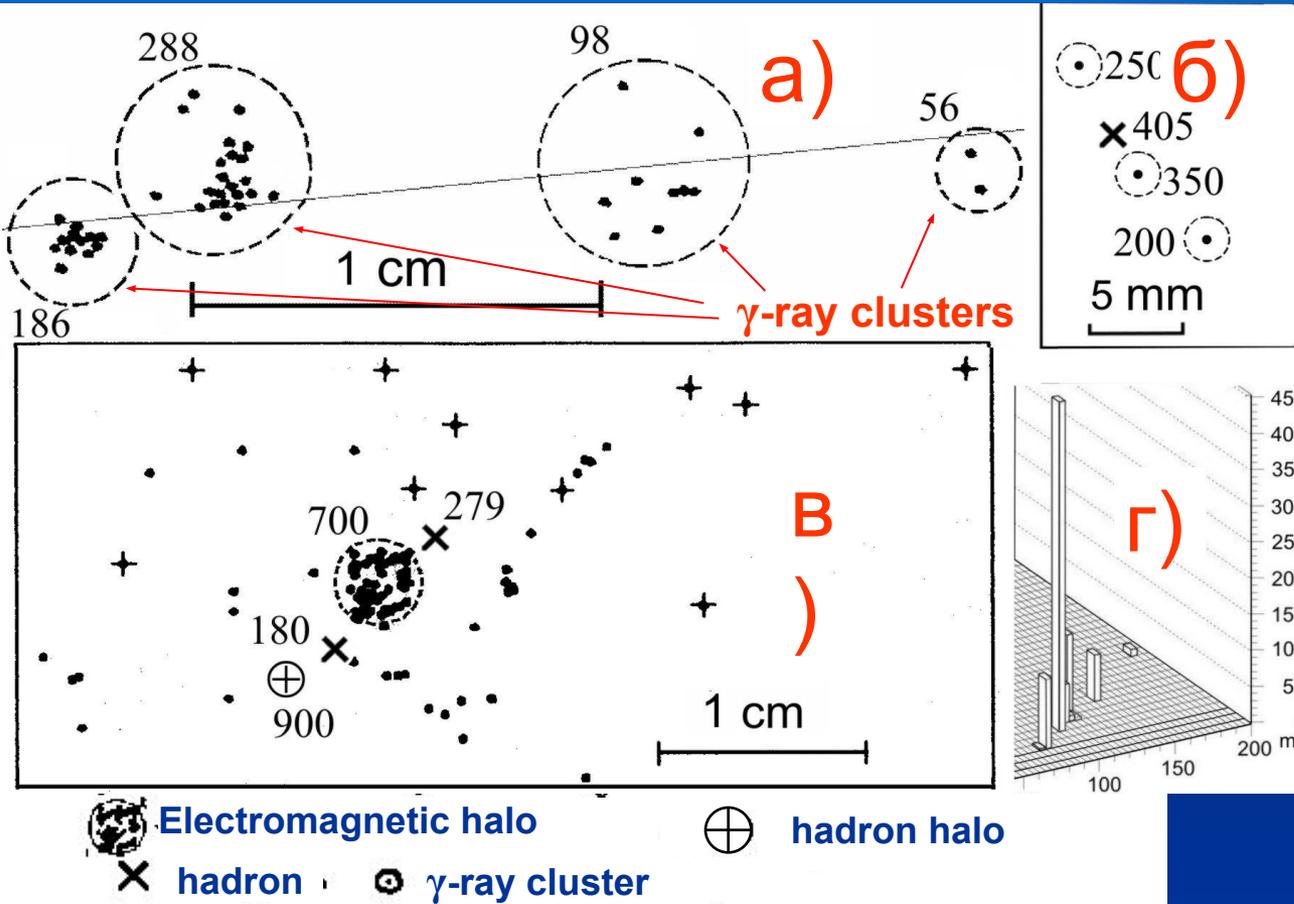
← объясняет (?) (Памир);  
не объясняет (Канбала и Чакалтая)

← не объясняет ! (Памир)

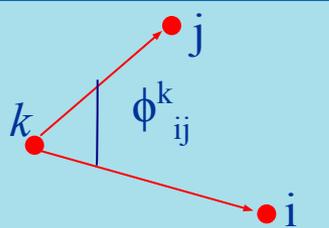
экспериментальные  
данные



# Выстроенность



“Памир” : **а)** 4-  $\gamma$ -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:  $\lambda_4 \geq 0,8$

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

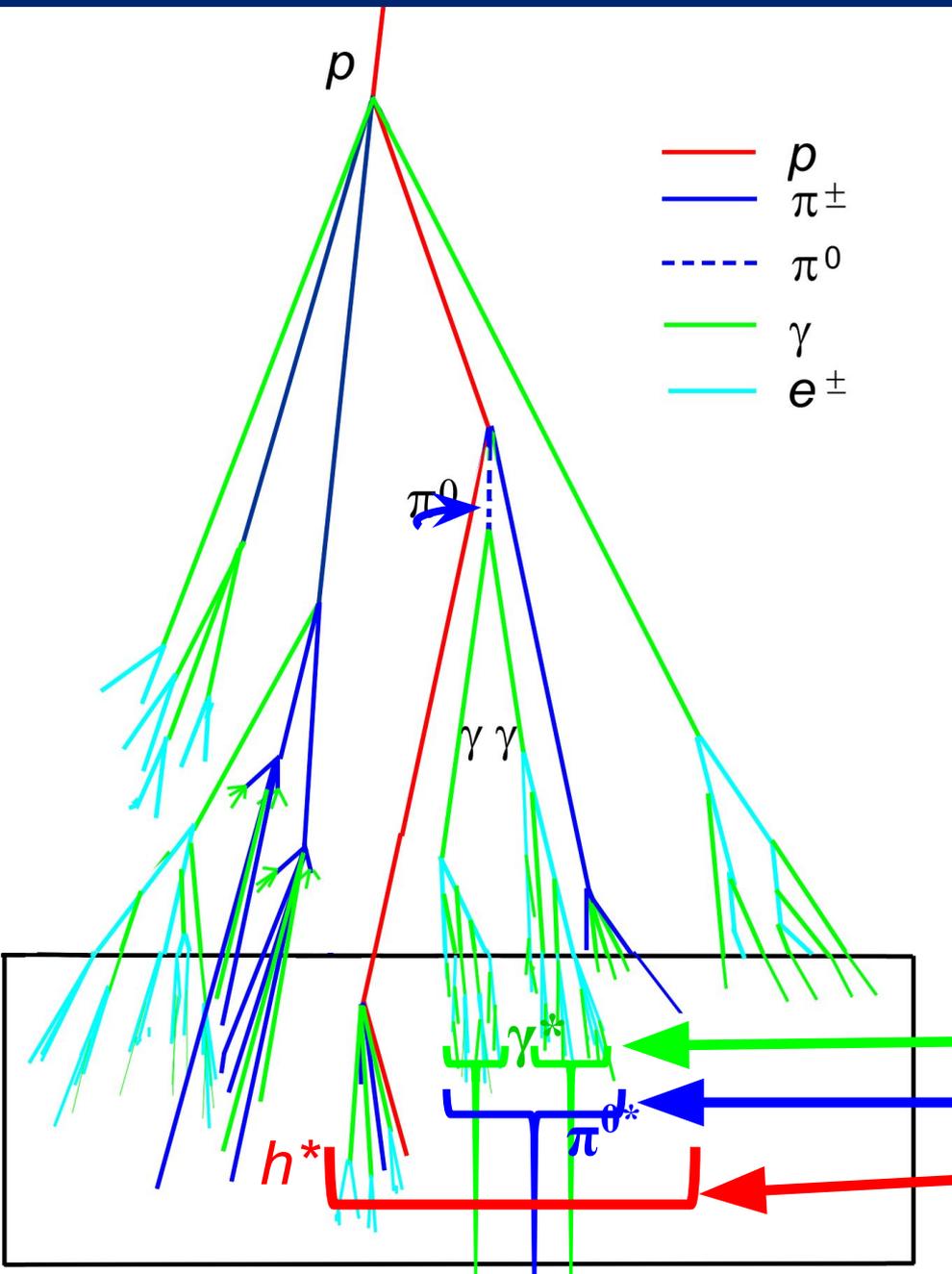
## Выстроенность

- 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»  $\gamma$ -квант,  $\pi^0$ -мезон и адрон (уровень Памира!)

ЭВЦ = группы, инициированные

$\gamma$ -квантами:  $Z_C \sim 1$  ТэВ·см

$\pi^0$ -мезонами:  $Z_C \sim 3$  ТэВ·см

взаимодействиями адронов:

$Z_C \sim 20$  ТэВ·см

## Экспериментальная ситуация

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

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

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

- $0.50 \pm 0.20$  in Fe-РЭК (3 из 6 при 1.2 ожидаемом)
- 0.21 – ожидаемый фон

Xue L. *et al.* 1999

Только **два** стратосферных  $\gamma$ - $h$  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

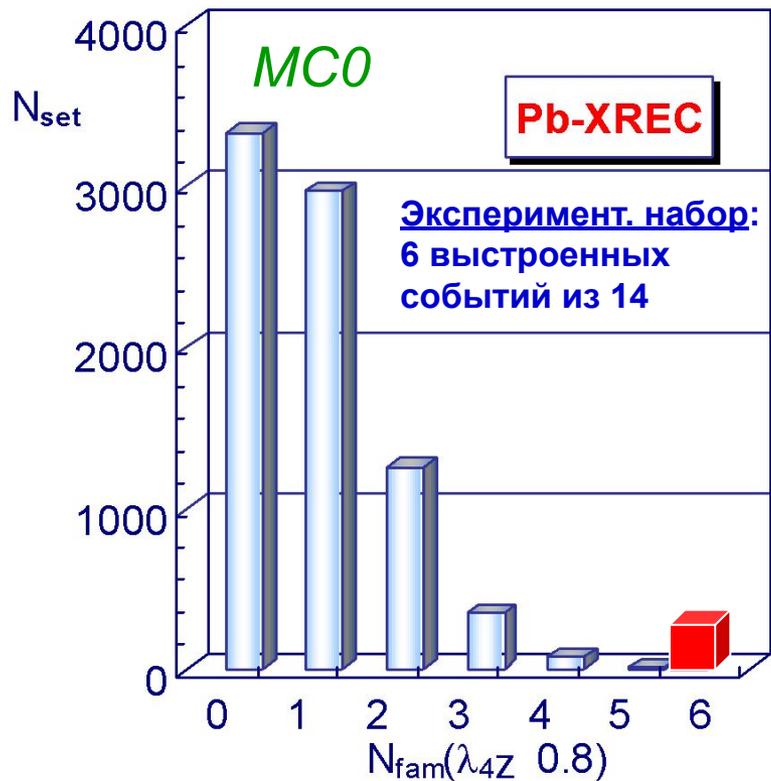
До сих пор существуют два противоположных мнения о происхождении экспериментально наблюдаемой выстроенности:

- 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)



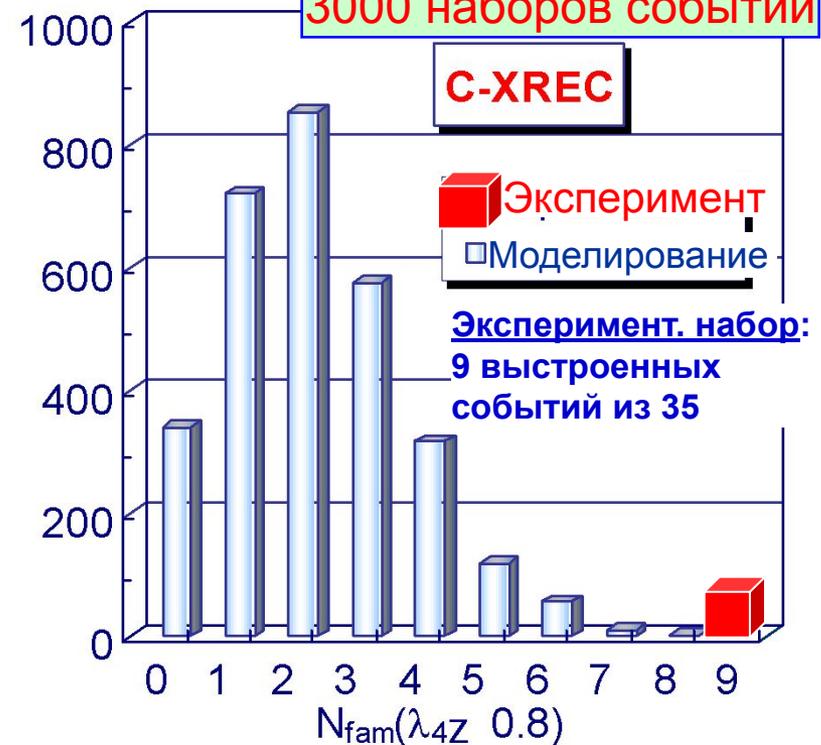
## Роль флуктуаций в явлении выстроенности

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



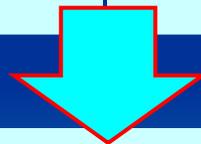
Вероятность получить  $k$  выстроенных событий в наборе из  $n$  событий:

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

$q = 1 - p$  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 ( $\sigma$ )	Отклонение от ожидаем. значения (в $\sigma$ )	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»	$\lambda_4 \geq 0.99$	$0.0029 \pm 0.0002$	1	0.05	-	$29 \cdot 10^{-4}$
«JF2af2»	$\lambda_4 \geq 0.998$	$0.0006 \pm 0.0001$	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  $\gamma$ -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)



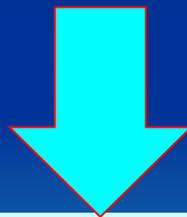
# Выстроенность

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  $\gamma$ -квантов
- *ROT* – вращение с очень большим значением спина невзаимодействующей части налетающего ядра с последующим компланарным развалом

- *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

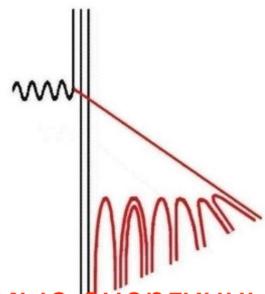
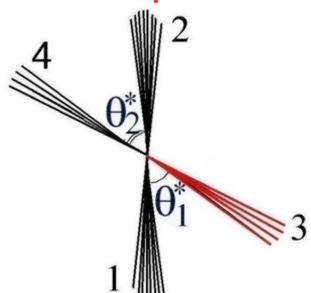
### Предварительные выводы (на основе эвристических моделей)

- 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.

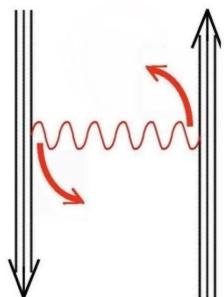
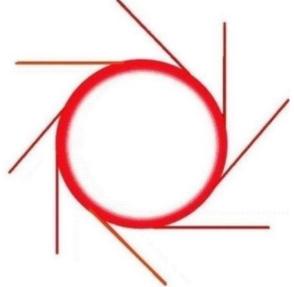


# Выстроенность и модели взаимодействия

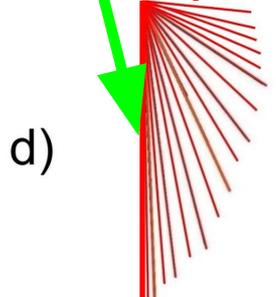
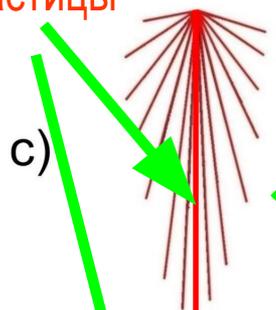
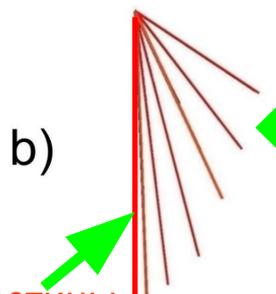
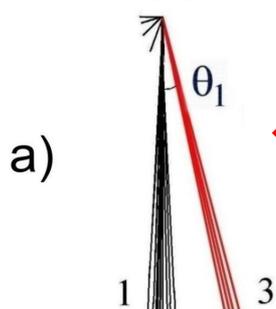
СЦМ



Самые энергичные частицы



Лаб



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**

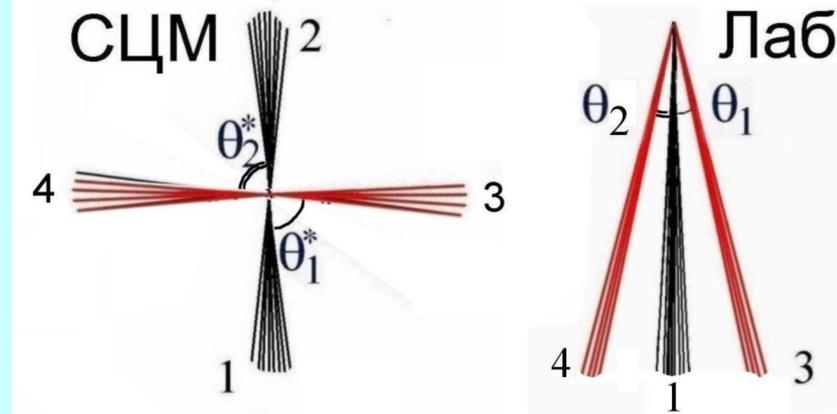
(близкая к эксперименту) только (!)

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/см<sup>2</sup>)

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

2. С ростом  $\Delta x$  **резко падает** выстроенность



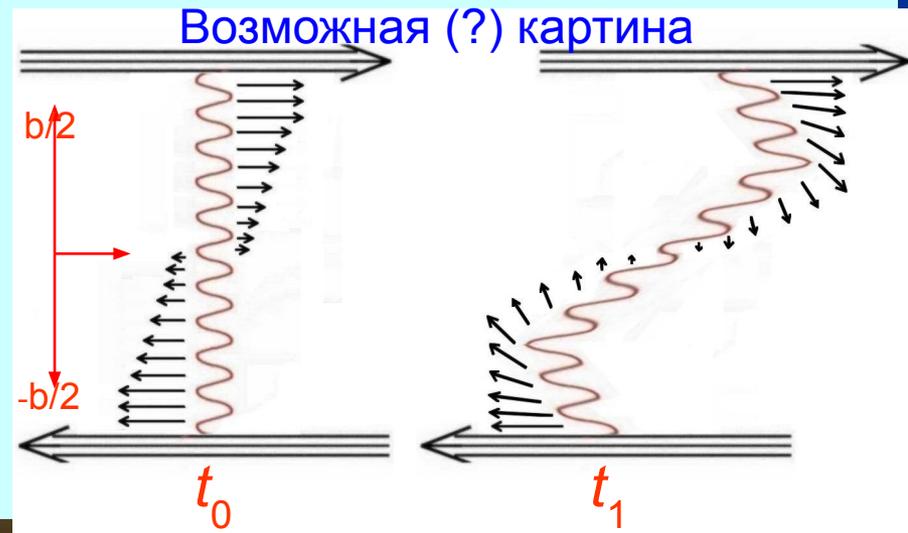
Угловой момент КГС (Wibig 2004)

$t_0 - l \sim \Delta b$  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 <sup>#,\*</sup>

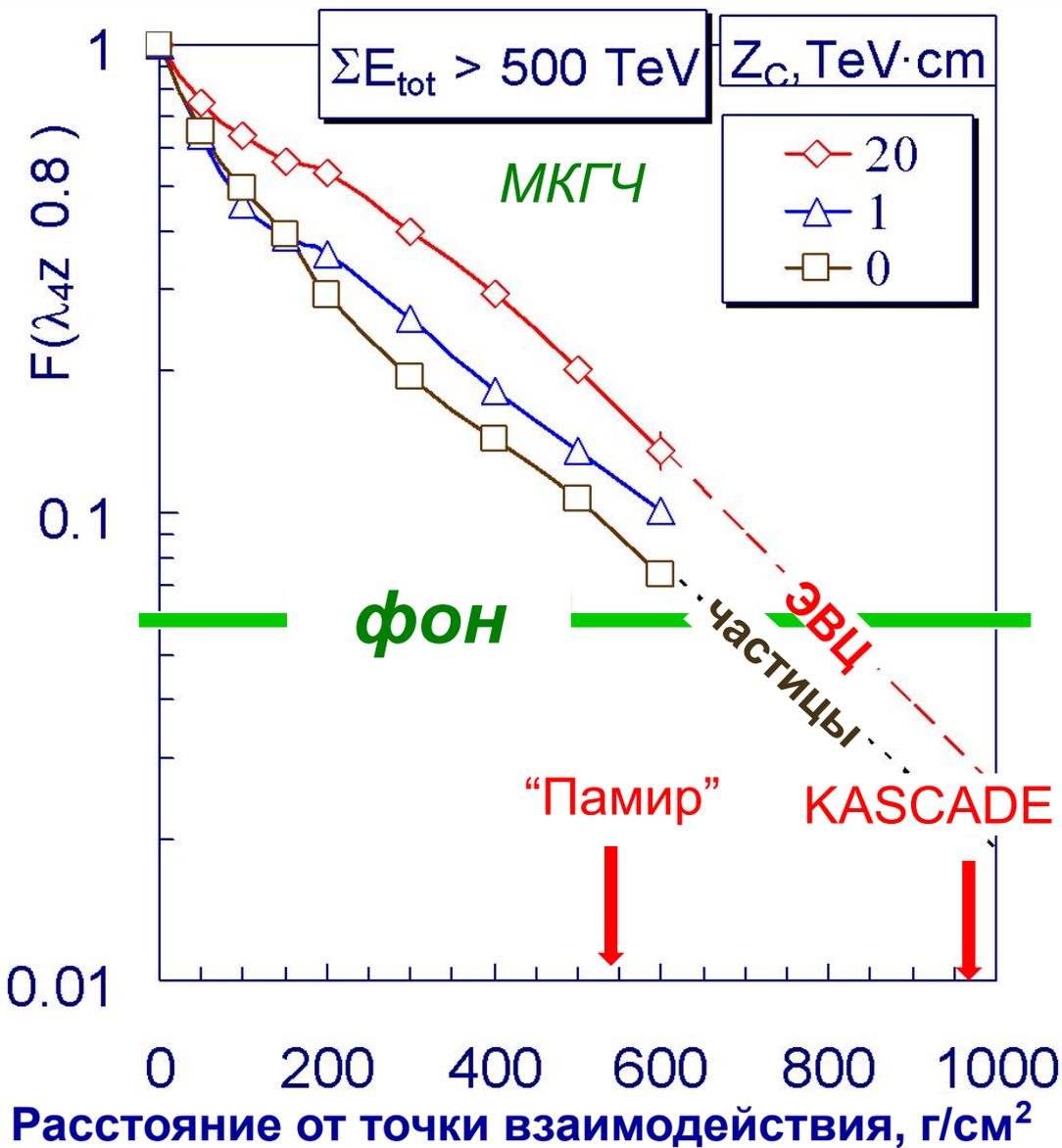
- частицы ( $\pi$  и  $K$ ) рождаются компланарно с нормальным  $\langle p_t \rangle$  относительно плоскости компланарности
- множественность  $\langle n_s \rangle \approx 10$ ;
- $\langle p_T^{\text{corl}} \rangle \approx 1 - 2,3$  ГэВ/с в плоскости компланарности

<sup>#</sup> Параметры взаимодействия относятся к фрагментационной области

<sup>\*</sup> 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  $Z_c$

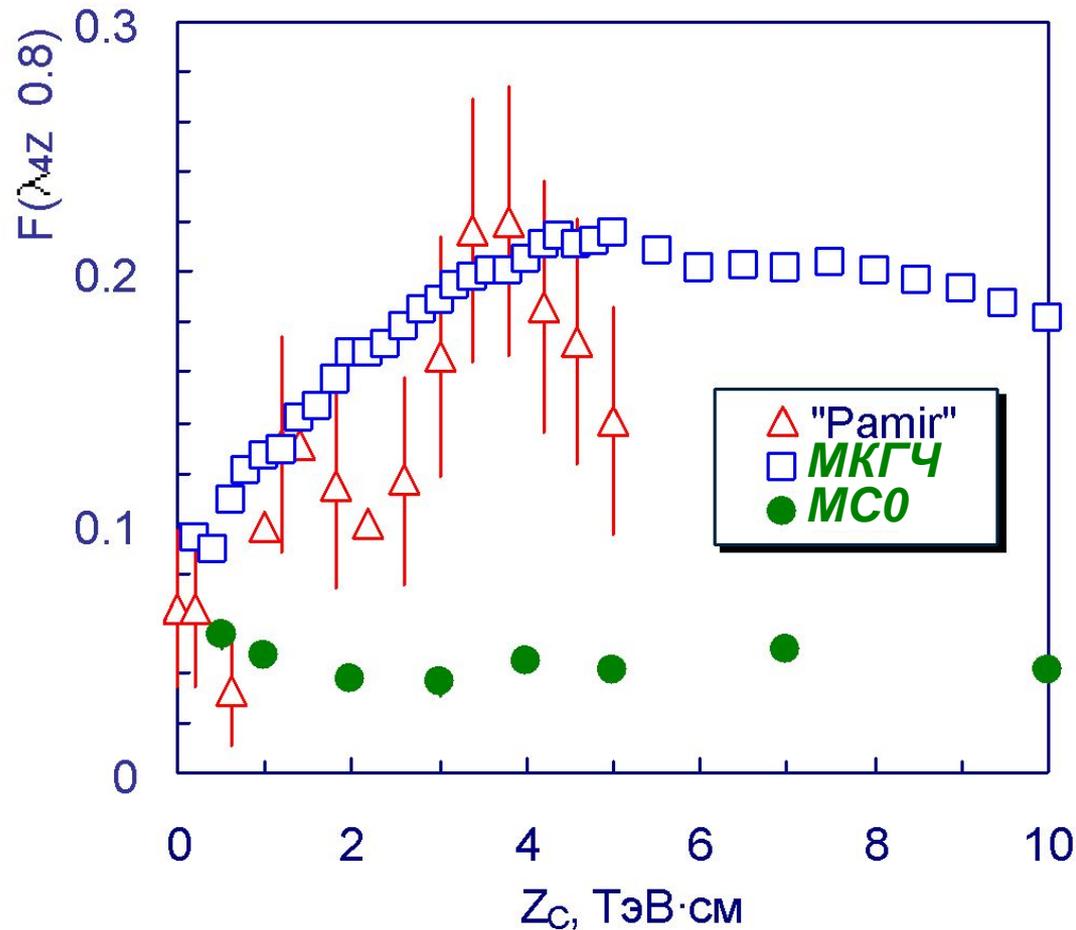
Если на уровне гор  $F(\lambda_4 \geq 0,8) \gtrsim 0,2$ , то

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

Выстроенность может изучаться только в

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

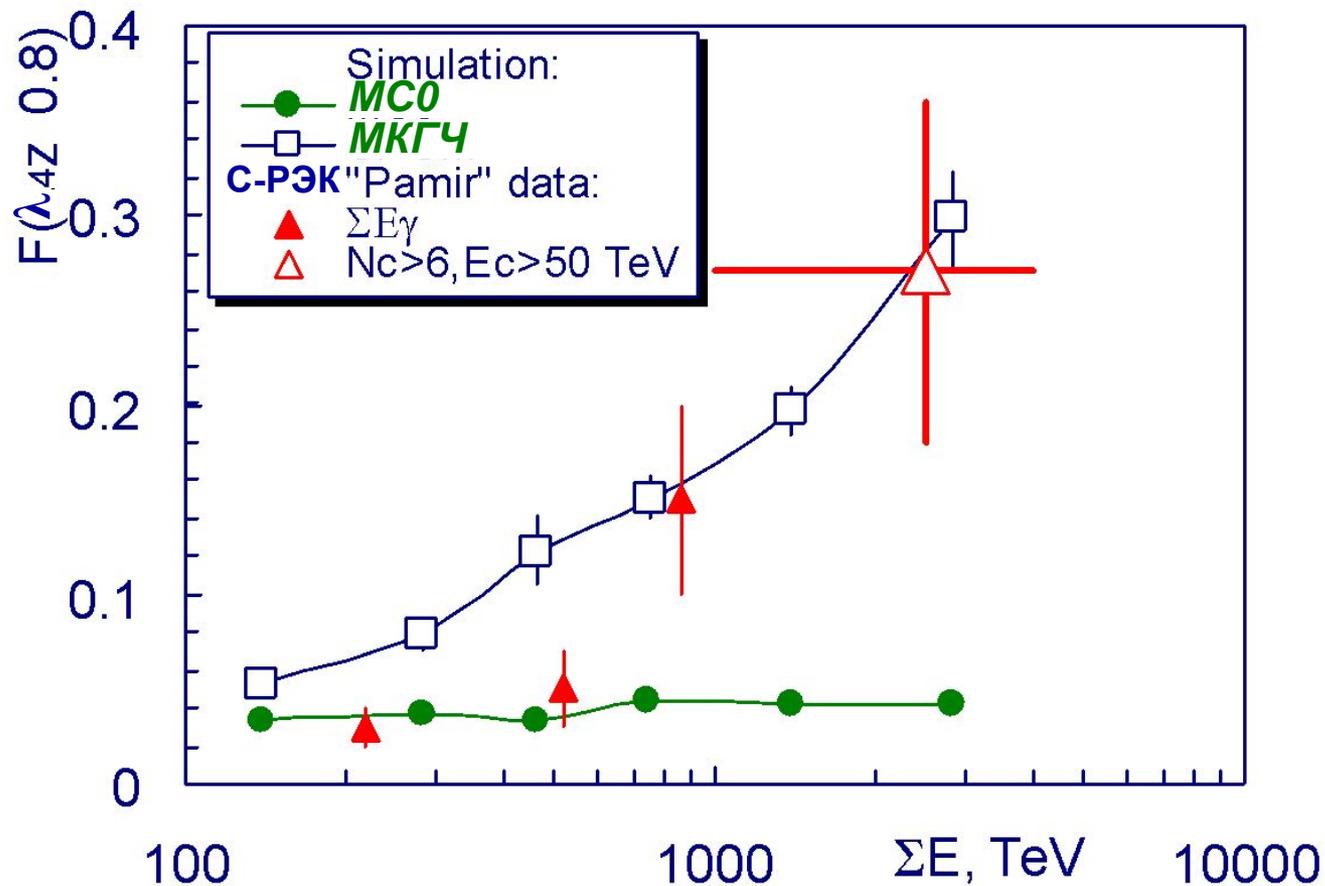
## Зависимость доли выстроенных семейств $F(\lambda_4 \geq 0,8)$ от $Z_C$



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

# Выстроенность – экспериментальные данные и расчет

Зависимость доли выстроенных семейств  $F(\lambda_4 \geq 0,8)$  от  $\Sigma E_\gamma$

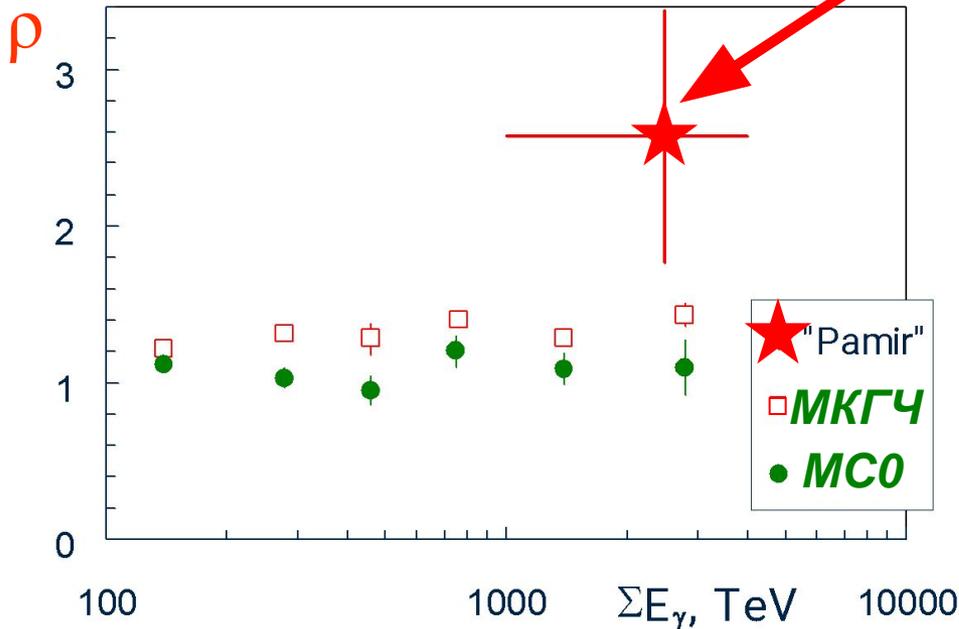
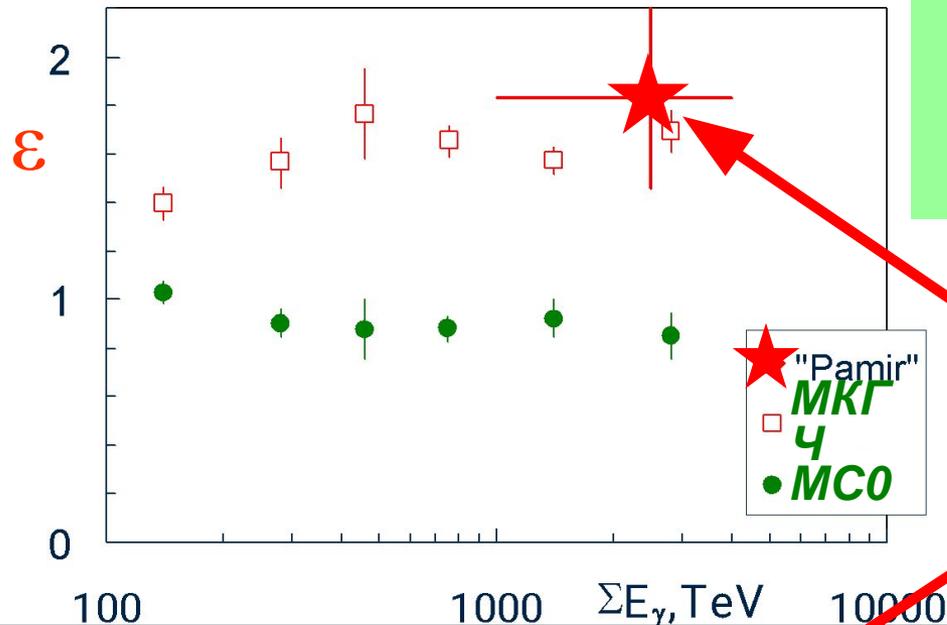


▲ △ Эксперимент:  $F(\lambda_4 \geq 0.8)$  зависит от  $\Sigma E_\gamma$

□ *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  $\gamma$ - $h$  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  $K_{\text{inel}}$  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  $\gamma$ -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  $\gamma$ - $h$  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  $\gamma$ - $h$  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

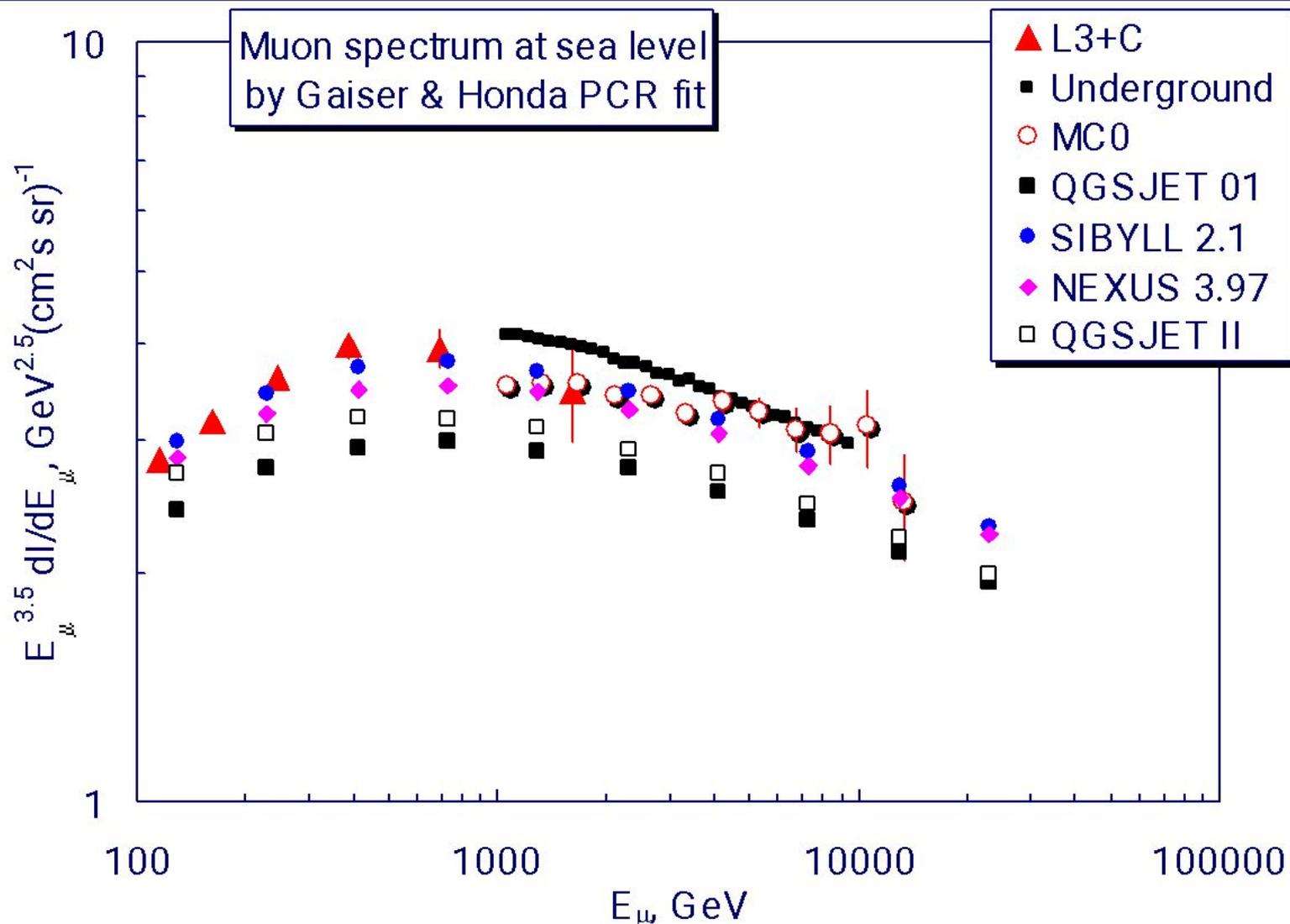
1. В диссертации было бы полезно часть материала вынести в приложения, например, п. 1.4 о переходах между системами отсчета, п. 1.10 о компьютерной организации моделирования.
- Автор согласен с этим замечанием, поскольку действительно это могло бы улучшить восприятие материала



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*

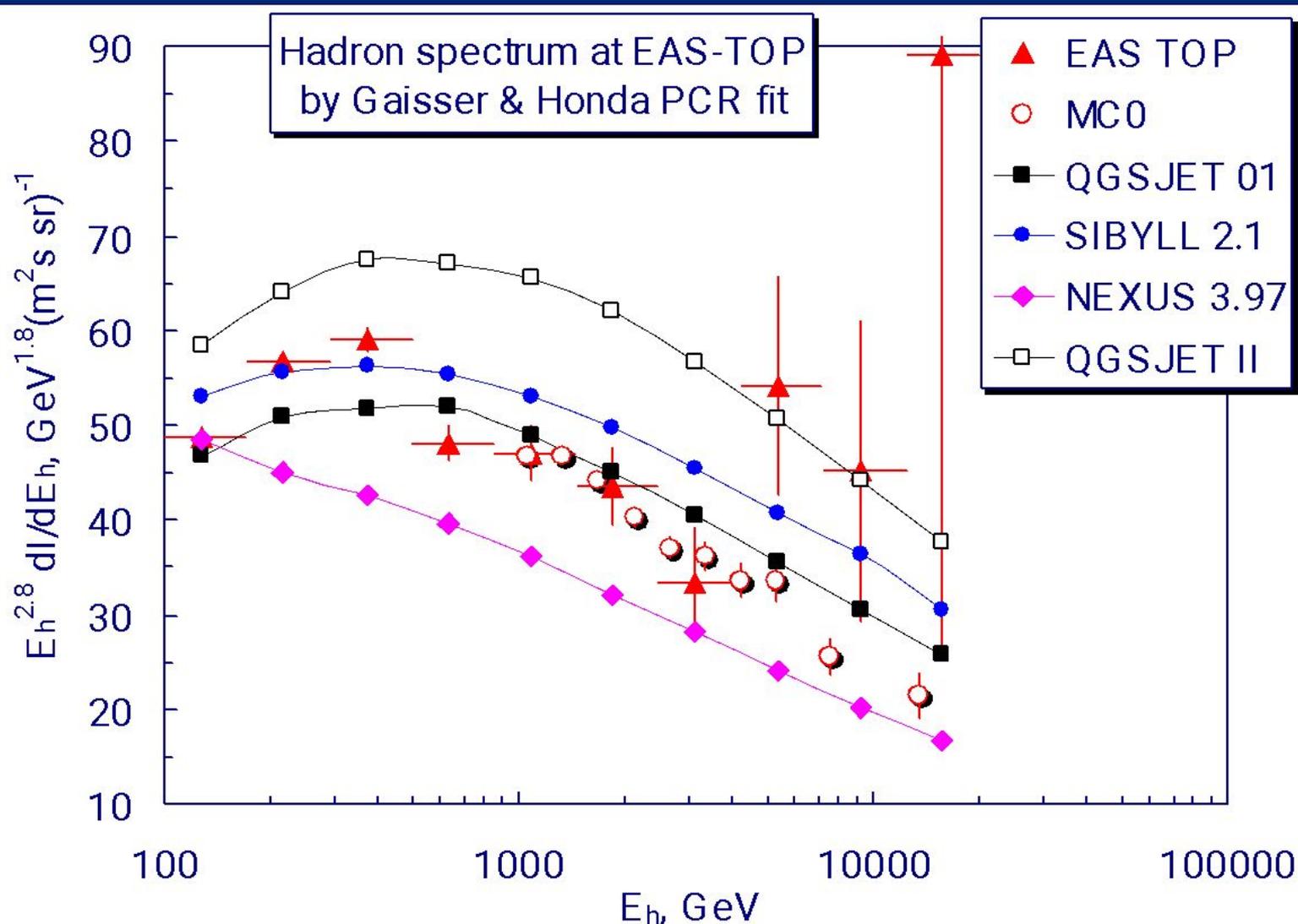
- В ходе работы сравнения проводились, но в диссертации, действительно, это не нашло должного отражения.
- В целом, характеристики кода *MC0*, на базе которого получены основные выводы диссертации, близки к параметрам основных моделей пакета *CORSIKA*
- Ниже приведены два графика для сравнения результатов *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/см<sup>2</sup> (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.* ( $\gamma$ -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 суперсемействе  $JF2af2$ , наблюдаемом в стратосфере, приведен только коэффициент регрессии  $\beta_{38}$  для 38 наиболее энергичных частиц, а критерий  $\lambda_{38}$  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  $\beta$  и  $\lambda$



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  $\gamma$ - $h$  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
  - $\gamma$ - $h$  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  $\mu$  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  $\gamma$ - $h$  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  $l_{\text{cell}}$  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

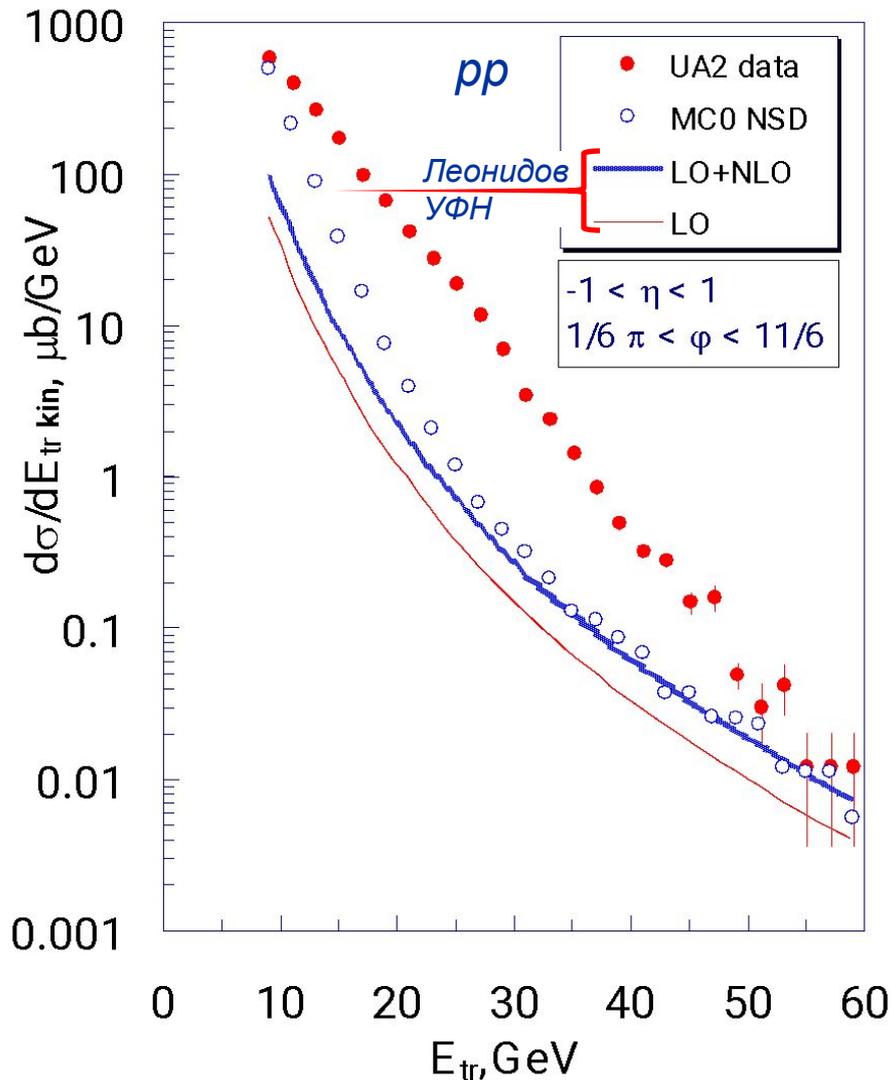


3. Автор не использовал прекрасную возможность проверки своей модели по мюонной компоненте космических лучей, хотя на стр.111 он прямо пишет: "Любая модель ... должна, в первую очередь, описывать спектры одиночных частиц, то есть электромагнитную, адронную и мюонную (!) компоненты"

- 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  $\lesssim 10\%$
- $\gamma$ -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  $\pi^0$  подавляется в пользу генерации  $\pi^\pm$

## 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  $\gamma$ - $h$  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 MS0 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).

