

Институт ядерных  
исследований  
РАН  
Москва



Р.А.Мухамедшин

Можно ли по корреляциям азимутальных характеристик частиц оценить параметры 2D-флуктуаций сигнатуры метрики пространства?

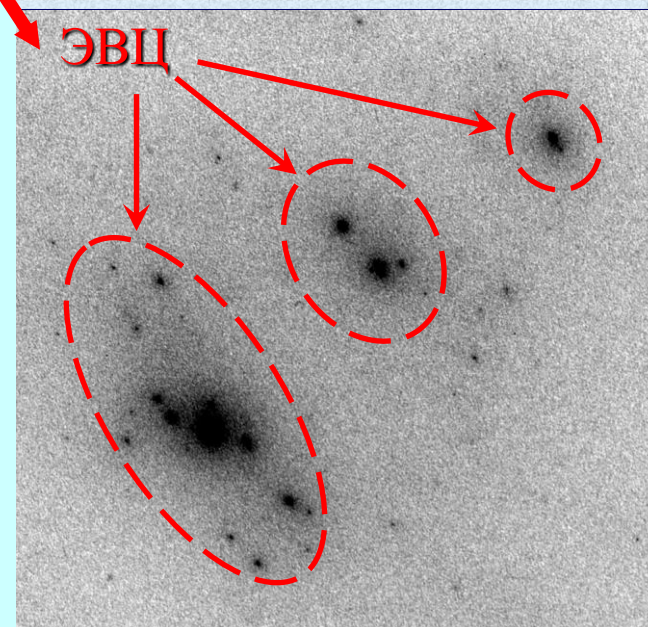
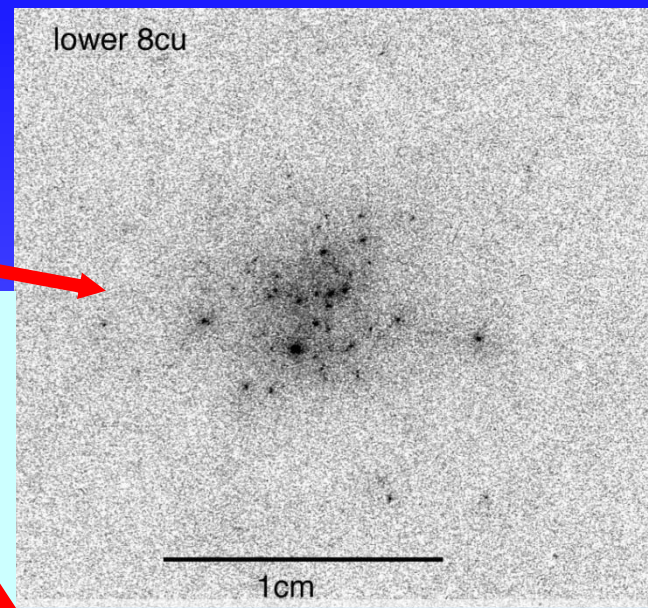
## Содержание

- Компланарность в космических лучах
- Некоторые оценки
- Предложения по проведению экспериментов

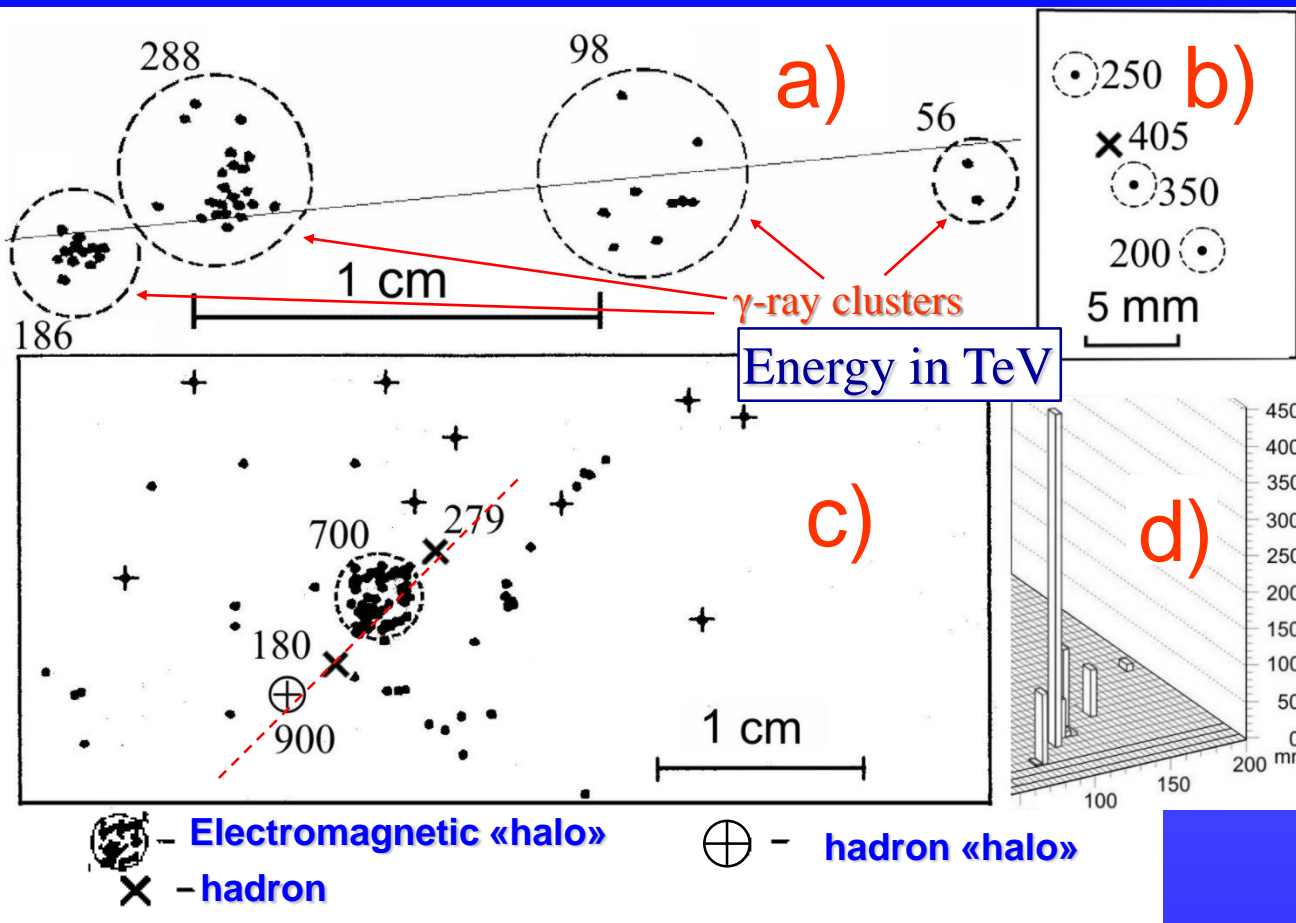
$\gamma$ -h семейства – группы самых энергичных, генетически связанных частиц ( $\gamma$ ,  $e^\pm$ , h) в стволах ШАЛ, наиболее чувствительные к параметрам взаимодействий

Традиционная концепция: взаимодействий (и  $\gamma$ -h семейств) ~ почти **осевая симметрия**

- Неожиданный результат: **компланарность** наиболее энергичных ( $\geq 10$  ТэВ) ЭВЦ (энергетически выделенных центров, т.е. отдельных адронов,  $\gamma$ -квантов,  $e^\pm$  и/или генетически связанных подгрупп) обнаружена в т.н.  $\gamma$ -h семействах (группах наиболее энергичных частиц,  $E_{\gamma,h} \geq 5$  ТэВ,) с суммарной выделенной в РЭК энергией  $\Sigma E_{\gamma,h} \geq 700$  ТэВ в
- высокогорных рентгеноэмульсионных экспериментах *Pamir & Kanbala*;
- стратосферных событиях «*JF2af2*» & «*Страна*»
- Явление соответствует энергиям адронных взаимодействий частиц ПКИ (в основном, протонов) с  $E_0 \geq 10^{16}$  эВ



# Coplanarity in cosmic rays



## Examples of “coplanar” events

- 5 most energetic particles

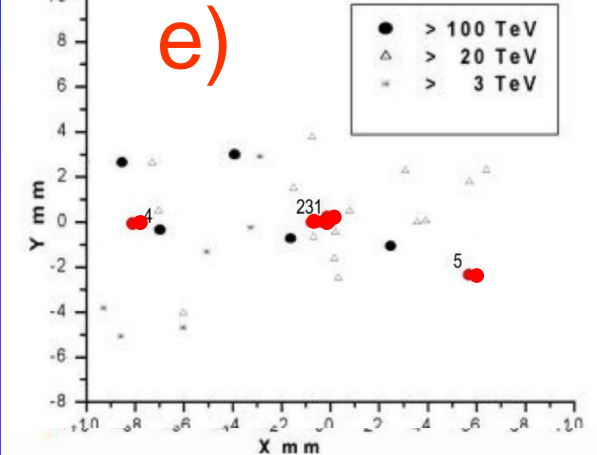
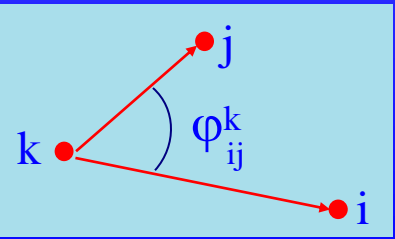


Fig.6. Target diagram of EDC in the family Numbers stand for most energetic objects in decreasing order.

“Pamir” : **a)** Four  $\gamma$ - $e^\pm$  cluster family; **b)** Pb-6:  $\lambda_4=0.95$ ; **c)** Pb-28:  $\lambda_4=0.85$ .  
**d)** JF2af2 (“Concorde”); **e)** «Strana» (balloon).



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

$-1/(N-1) \leq \lambda_N \leq 1.0$   
 “Выстроенные” события:  $\lambda_N \geq \lambda_{\text{fix}}$   
 Обычно:  $\lambda_4 \geq 0.8$

## Доля компланарных семейств

Experiment («event»)	Критерии отбора	Coplanar family		
		number $N_{\text{copl}}^{\text{exp}}$ from $N_{\text{tot}}^{\text{exp}}$	$F_{\text{copl}}^{\text{exp}}$	$F_{\text{copl}}^{\text{sim}}$
<i>Pamir</i> (Pb)	$\Lambda_4 \geq 0.8, \Sigma E_\gamma > 700 \text{ TeV}$	6 from 14	$0.43 \pm 0.13^*$	$0.05 \pm 0.01^*$
<i>Pamir</i> (C)	$\Lambda_4 \geq 0.8, \Sigma E_\gamma > 700 \text{ TeV}$	5 from 35	$0.15 \pm 0.05^*$	$0.05 \pm 0.01^*$
<i>Mt.Kanbala</i> (Fe)	$\Lambda_3 \geq 0.8, \Sigma E_\gamma > 500 \text{ TeV}$	6 from 12	$0.50 \pm 0.13^*$	$0.20 \pm 0.01^*$
« <i>Strana</i> »	$\lambda_4 = 0.99, \Sigma E_{\gamma+\text{h}} > 4 \text{ PeV}$	1	$\frac{1}{0.0003^*}$	$0.0026 \pm$
« <i>JF2af2</i> »	$\lambda_4 = 0.998, \Sigma E_\gamma > 1.4 \text{ PeV}$	1	1	$(9 \pm 3) \cdot 10^{-4^*}$

\* стат ошибка  $= \sqrt{\hat{u}(1-\hat{u})/N_{\text{tot}}}$ ,  $\hat{u} = N_{\text{copl}}/N_{\text{tot}}$

Благодаря флуктуациям доля компланарных семейств в традиционных  
моделях  $F_{\text{copl}}^{\text{sim}} (\lambda_4 \geq 0.8) \approx 0.05$

Компланарность, наблюдаемая в экспериментах,

- не объясняется
  - флуктуациями в рамках КГС моделей ( $w_{\text{fluct}} \lesssim 10^{-10}$ )
- не описывается в рамках QCD;
- характеризуется  $\sigma^{\text{P}}_{\text{copl}} \sim a \cdot \sigma^{\text{P}}_{\text{inel}}$  ( $a \approx 0.1 - 0.5$ );
- связана с **наиболее энергичными** ( $x_{\text{F}} \gtrsim 0.01$ ) частицами в адронных взаимодействиях при  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ
- долгое время объяснялась ростом  $p_{\text{t}}$  частиц в плоскости компланарности (инерция мышления + отсутствие расчетов!)

Кстати,

- в рамках FANSY 2.0 CPG т.н. long-range near-side «ridge»-эффект, обнаруженный при  $|\eta| \leq 2.4$ , является следствием компланарной генерации энергетически выделенных частиц

Теоретическая ситуация:

- механизм компланарной генерации частиц (КГЧ) **неизвестен**
- предложены различные **идеи**

**Идеи:** две принципиально разные группы:

**I. Ядерно-физические концепции**

**1.1. Образование лидирующей системы с высоким спином (Р.М. 1999, Cardevielle 2008, Юлдашбаев 2001) или большой поперечный импульс внутри кластера в полужесткой двойной дифракции (Ройзен 1994)**

**1.2. Связь эффекта с угловым моментом кварк-глюонной струны (Wibig 2000).**

**II. Космологическая концепция**

**Переход размерности пространства от 3-х к 2-м измерениям ( $3D \rightleftharpoons 2D$ ) (Anchordoqui 2010, Stojkovic 2014)  $\Rightarrow$  локализация поперечного импульса в некоторой 2D-плоскости и подавление его компонентов, перпендикулярных этой плоскости.**

**Изменение размерности пространства  $\Rightarrow$  изменение сигнатуры метрики пространственно-временного континуума**

## Важно!

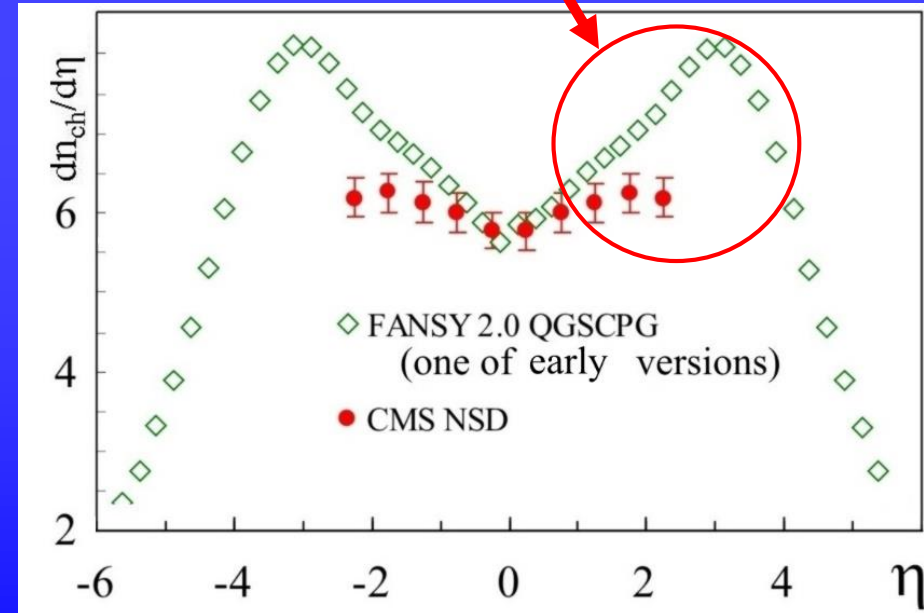
### 1. Концепция образования лидирующей системы

- а) не способна объяснить т.н. long-range near-side «ridge» эффект Коллаборации CMS для событий с высокой множественностью
- б) не может изучаться на LHC!  $\Rightarrow$  анализ гипотезы откладывается

### 2. Концепция связи эффекта с угловым моментом КГС

- а) может объяснить т.н. long-range near-side «ridge» эффект
- б) требует высокие значения компоненты поперечного импульса в плоскости компланарности ( $p_t^{\text{cop}} \gtrsim 1$  ГэВ/с) (это противоречит данным LHC !)

Концепция уменьшения компонент  $p_t^{\text{cop}}$ , перпендикулярных плоскости компланарности





*Экспериментальные данные и оценка  
параметров 2D сигнатуры пространства*

**Важно!**

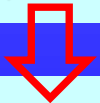
3. Концепция изменения размерности пространства  $3D \rightleftharpoons 2D$

- а) не требует больших  $p_t^{\text{cop}}$  или образования лидирующей системы
- б) может объяснить «ridge» эффект



Идея связи компланарности с уменьшением размерности пространства, феноменологически наиболее подходящая

Если компланарная генерация адронов связана с уменьшением размерности пространства,  $3D \rightleftharpoons 2D$ , то можно попытаться использовать экспериментальные данные для оценки параметров этого процесса



Нужно анализировать цепочку процессов, протекающих в широком интервале времени (например, последовательные распады адронов, рождающихся в адрон-адронных взаимодействиях)

Stojkovic 2014

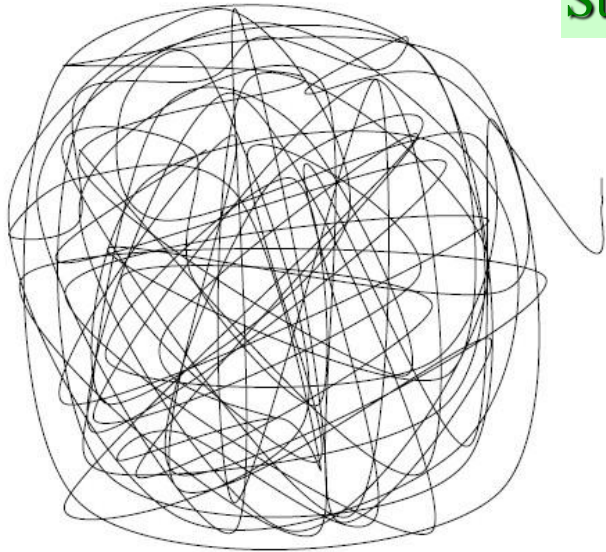


Рис. 1. Пример структуры, которая является одномерной (1D) на малых масштабах, в то время как она кажется двумерной на больших масштабах.

$L_2 \sim 10^{-17}$  см (Anchordoqui et al. 2012)  
 $L_3 \gtrsim Gpc$

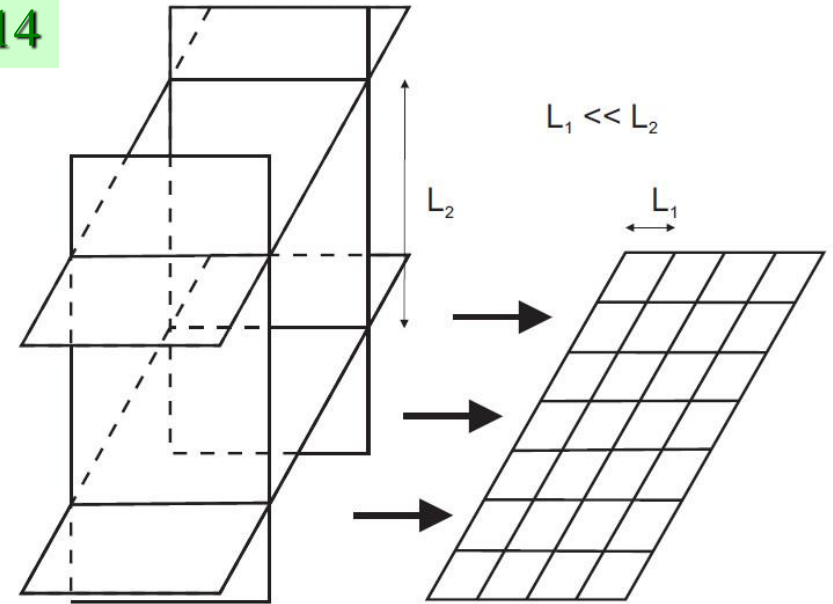


Рис. 2. Пространство-время с упорядоченной решетчатой структурой. Пространственная структура является одномерной (1D) в масштабах  $L \lesssim L_1$ , тогда как на масштабах  $L_1 \ll L \lesssim L_2$ , она представляется как 2D. В масштабах  $L_2 \ll L \lesssim L_3$ , структура представляется как 3D. В больших масштабах ( $L \gg L_3$ ) имеет место 4D структура.

## Исходная информация



- В процессах множественной генерации вторичных частиц прямо рождаются как относительно стабильные частицы ( $\pi^\pm$ ,  $K^{\pm,0}$ ,  $\bar{K}^0$ ,  $D^{\pm,0}$ ,  $\bar{D}^0$ ), так и широкий набор резонансов с различными временами жизни.
- ~ 50% наблюдаемых частиц рождается через распады резонансов
- Времена жизни в покое наиболее распространенных резонансов и нестабильных адронов:
  - $\rho$ -мезоны:  $\tau_{0\rho} \sim 4.5 \cdot 10^{-24}$  сек,
  - $\eta$ -мезоны:  $\tau_{0\eta} \sim 5.1 \cdot 10^{-19}$  сек,
  - $\pi^0$ -мезоны:  $\tau_{0\pi^0} \sim 0.8 \cdot 10^{-16}$  сек

- При взаимодействии двух протонов с суммарной энергией  $\sqrt{s}$  имеет место концентрация энергии в малой пространственной области порядка объёма протона  
 $v_p = 4/3 \cdot \pi \cdot r_p^3 \approx 2.6 \cdot 10^{-39} \text{ см}^3$ , где  $r_p \approx 0.85 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  – характерный электрический радиус протона.
- Продолжительность времени взаимодействия оценивается как  
 $t_{\text{int}} \sim 2 r_p / c \sim 5.7 \cdot 10^{-24} \text{ сек}$  (скорость света  $c \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ )
- Отсюда можно оценить для взаимодействия  
**пространственную плотность энергии :**  
 $\rho_{\text{int}} \sim \sqrt{s} / v_p = 7 \cdot 10^{12} / 2.6 \cdot 10^{-39} \sim 3 \cdot 10^{51} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$  (при  $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ );  
**пространственно-временную плотность энергии:**  
 $\varepsilon_{\text{int}} = \rho_{\text{int}} / t_{\text{int}} = 2.7 \cdot 10^{51} / 5.7 \cdot 10^{-24} = 5 \cdot 10^{74} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$

## Предположения:

- флуктуации сигнатуры метрики пространства становятся заметными, если
  - а) пространственная ( $\rho_{\text{int}}$ ) и пространственно-временная ( $\varepsilon_{\text{int}}$ ) плотность энергии во взаимодействиях адронов достигают пороговых значений  $\rho_{\text{fluct}} \sim 10^{50} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$  и  $\varepsilon_{\text{fluct}} \sim 10^{74} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$ ,  
или
  - б) это, возможно, связано с энергией частиц и релятивистскими эффектами
- При этом становится вероятным флуктуационный переход основного трёхмерного (3D) состояния в состояние, воспринимаемое как двухмерное (2D), с последующим возвращением в 3D состояние ( $3\text{D} \rightleftharpoons 2\text{D}$ )
- Характерные размеры  $L_{2\text{D}}$  и время существования этой локальной области  $\tau_{2\text{D}}$  неизвестны.

## Некоторые следствия

- Если первичные адроны родились в **2D** пространстве, то все они (независимо, это резонансы или стабильные адроны) разлетаются компланарно, «помня» свою историю.
- Энергичные резонансы могут распадаться
  - 1) в **2D** пространстве, если их время жизни  $\tau = \tau_0 \cdot \gamma_L^* = \tau_0 \cdot E/m_0 \lesssim \tau_{2D}$   
 азимутальный разлёт вторичных адронов определяется той же плоскостью компланарности, и, в целом, эффект усиливается по сравнению с эффектом от первичных резонансов-родителей;
  - 2) в **3D** пространстве, если  $\tau \gtrsim \tau_{2D}$   азимутальный разлёт вторичных частиц происходит хаотично, и, в целом, эффект уменьшается по сравнению с эффектом, создаваемым первичными резонансами-родителями.

В обоих случаях можно оценить минимальное ( $\tau_{2D \min}$ ) и максимальное ( $\tau_{2D \max}$ ) значения времени существования флуктуации.

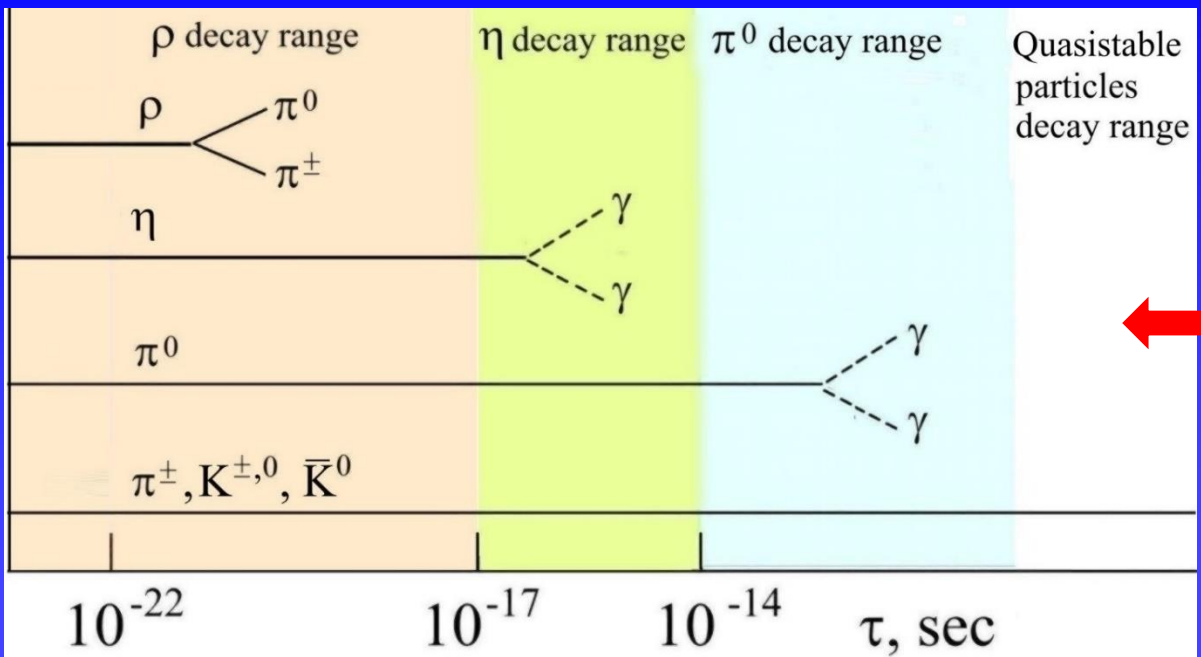
---

\*  $\gamma_L$  = Лоренц-фактор

## Примеры

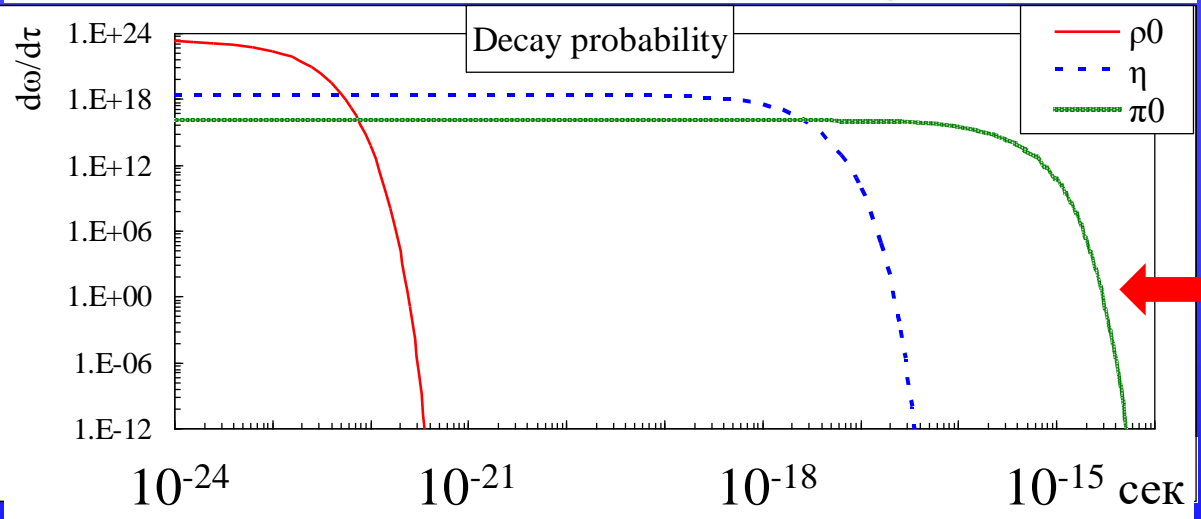
- Моделирование показывает, что экспериментальная и расчетная двухчастичные корреляционные функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  в области «ridge» эффекта близки друг к другу для быстрот  $y > y_{\text{thr}}^{\text{CPG}} \sim 3.0 - 4.0$ .
- Оценим максимальную величину  $\tau_{2D}$  для мезонов с быстротой  $y \approx 3.5$ , энергией  $E_\rho = 17.5 \text{ GeV}$ , поперечным импульсом  $p_t = 0.6 \text{ GeV}/c$ .
- Мезоны могут распадаться ( $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ,  $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$ ,  $\eta^0$  и  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ) ещё находясь в 2D пространстве, если  $\tau = \tau_0 \cdot \gamma_L = \tau_0 \cdot E/m < \tau_{2D}$ , где время жизни  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\pi^0$  в покое  $\tau_0 \approx 4.5 \cdot 10^{-24}$ ,  $5.1 \cdot 10^{-19}$ ,  $0.8 \cdot 10^{-16}$  сек, соответственно.
- Для  $\rho$   $\gamma_{L\rho} \approx 23 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\rho = 23 \cdot 4.5 \cdot 10^{-24} \approx 10^{-22}$  сек.
- Для  $\eta$   $\gamma_{L\eta} \approx 32 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\eta = 32 \cdot 5.1 \cdot 10^{-19} \approx 1.5 \cdot 10^{-17}$  сек.
- Для  $\pi^0$   $\gamma_{L\pi} \approx 125 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\pi = 125 \cdot 0.8 \cdot 10^{-16} \approx 10^{-14}$  сек.





**Схема примерных временных диапазонов двухчастичного распада мезонов с  $y \gtrsim y_{thr}$ ,  $E \gtrsim 17.5$  GeV,  $p_t \approx 0.6$  GeV/c. СРГ**

**В 2D пространстве разлет частиц в результате распада должен происходить в плоскости генерации адронов-родителей.**



**Зависимость вероятности распада мезонов в покое от времени ( $\gamma_L = 1$ ).**

- Характерные размеры 2D-флуктуации,  $L_{2D}$ , можно оценить, перемножая значения скорости света  $c$  и полученного времени существования флуктуации,  $\tau_{2D}$ , т.е.  $L_{2D} \approx c \cdot \tau_{2D}$ .
- Полученные оценки – очень грубые. Для получения более точных результатов необходимы эксперименты по изучению характеристик генерации и распада энергичных резонансов в широком кинематическом диапазоне при высоких энергиях, чтобы получить детальную информацию об
  - энергии, поперечному и продольному импульсах и
  - азимутальных характеристиках а) резонансов; б) стабильных адронов; в)  $\gamma$ -квантов, включая информацию о каналах их рождения (прямая генерация или распад адрона-родителя),

**Предлагается** алгоритм действий ускорительных экспериментов

1. Осуществить полный кинематический анализ каждого взаимодействия в широком интервале энергий быстрот  $y$  (или  $x_F$ ) вторичных частиц.
2. Восстановить полную кинематическую историю распадов всех нестабильных частиц.
3. Проанализировать степень компланарности
  - а)  $\rho$ -мезонов;
  - б)  $\eta$ -мезонов;
  - в)  $\pi^0$ -мезонов;
  - г)  $\gamma$ -квантовс учётом канала их генерации (прямая генерация или распад более тяжелых адронов)

## Возможные экспериментальные результаты

Оценка параметров  $\tau_{2D}$  и  $L_{2D} \lesssim c \cdot \tau_{2D}$  при высокой компланарности адронов прямой генерации с  $E \gtrsim 50 \text{ GeV}$ ,  $p_t \approx 0.6 \text{ GeV}/c$ :

1.  $\rho$ -мезоны  $\rightarrow \tau_{2D} \lesssim 10^{-22} \text{ сек}$ ;  $L_{2D} \lesssim 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}$
2.  $\eta$ -мезоны  $\rightarrow \tau_{2D} \lesssim 10^{-16} \text{ сек}$ ;  $L_{2D} \lesssim 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$
3.  $\pi^0$ -мезоны  $\rightarrow \tau_{2D} \lesssim 10^{-14} \text{ сек}$ ;  $L_{2D} \lesssim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-14} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$
4.  $\gamma$ -кванты  $\rightarrow \tau_{2D} \gtrsim 10^{-14} \text{ сек}$ ;  $L_{2D} \gtrsim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-14} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^*$

Подобные результаты могли бы дать аргументы в пользу существования 2D-флуктуаций

\* Маловероятно, но на это намекают характеристики стратосферного события «JF2af2» (включающего только  $\gamma$  и  $e^\pm$ ) ( $\sum E_\gamma \gtrsim 1.4 \text{ PeV}$ ,  $n_\gamma = 38$ )

$$\lambda_4 = 0.998 (w_{\text{fluct}} \approx 10^{-3})$$

$$\beta_{38} (\approx \lambda_{38}) = 0.992 (w_{\text{fluct}} \lesssim 10^{-10})$$

- Значения  $L_{2D}$  существенно отличаются от  $L_2 \sim 10^{-17}$  см (Anchordoqui et al. 2012)
- Возможно, свойства наблюдаемых флуктуаций как-то зависят от энергии взаимодействия или связаны с релятивистскими эффектами ( $\tau_{2D}$  растёт с энергией частицы)

Можно попытаться искать на LHC

- двухчастичные азимутальные корреляции заряженных и нейтральных частиц, например,  $n_{ch}-\gamma$ ,  $\gamma-\gamma$

Очень важно продолжать исследования компланарности в высокоэнергетических (!) экспериментах с космическими лучами, т.к. они дают информацию о генерации самых энергичных вторичных частиц в наиболее широком интервале  $x_F$ .



pp interactions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  &  $|\eta| \lesssim 2.4$

# Results

$$|\Delta\eta| = |\eta_1 - \eta_2|$$

$$|\Delta\phi| = |\phi_1 - \phi_2|$$

Two-charged-particle  $\Delta\eta$ -  $\Delta\phi$  correlations

MinBias = all multiplicities

high multiplicity ( $N > 110$  !)

(b) MinBias,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

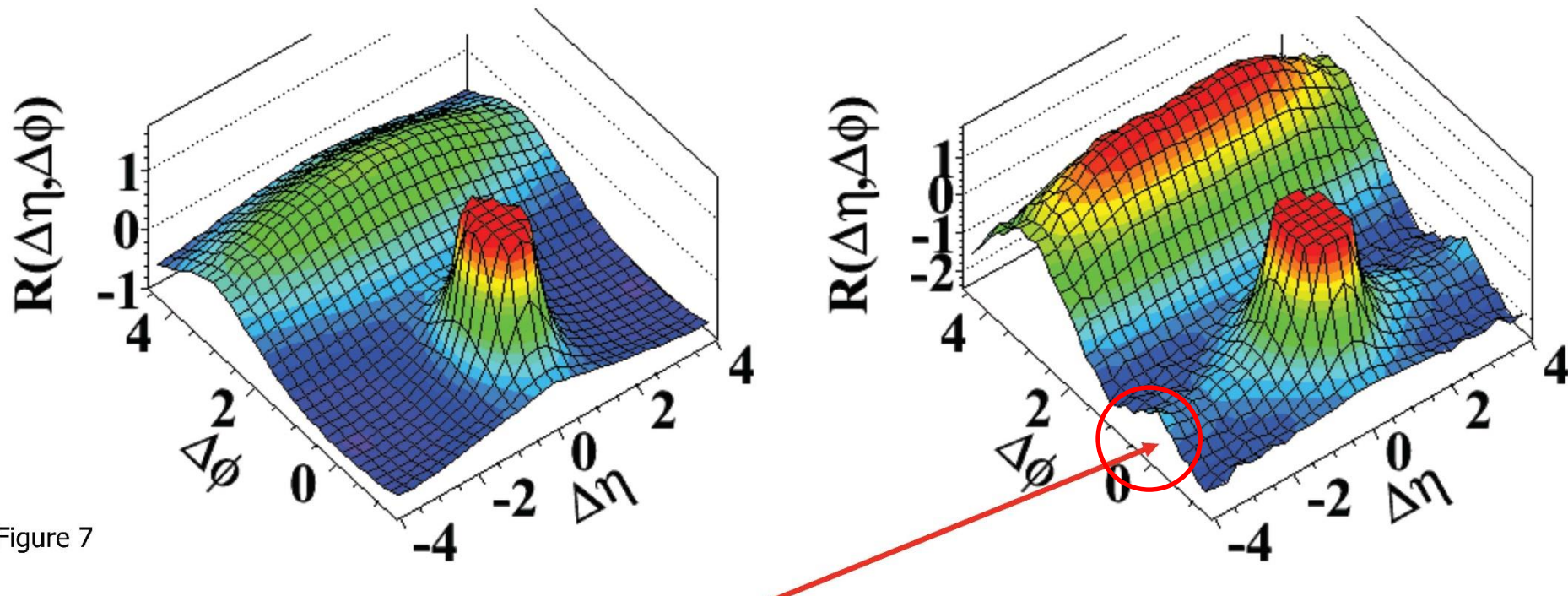


Figure 7

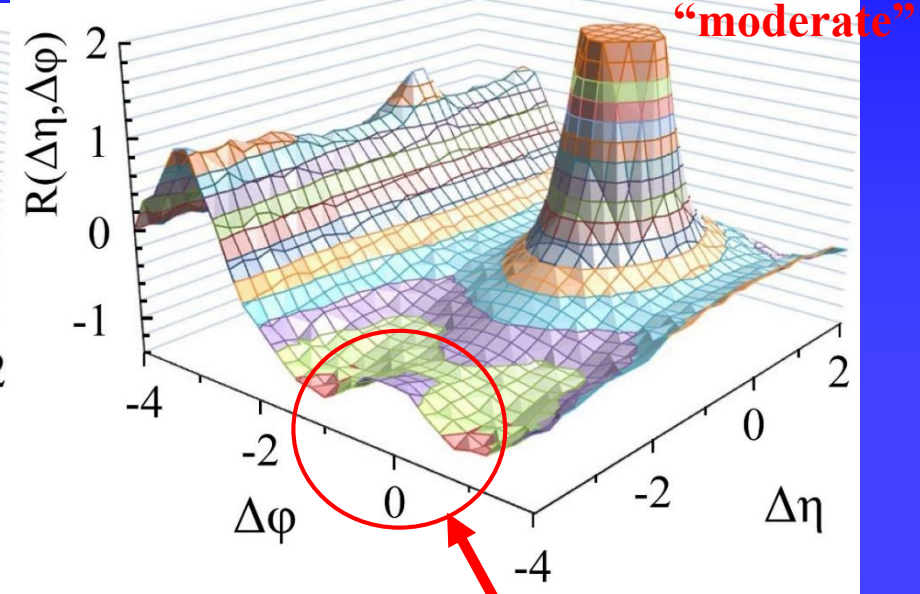
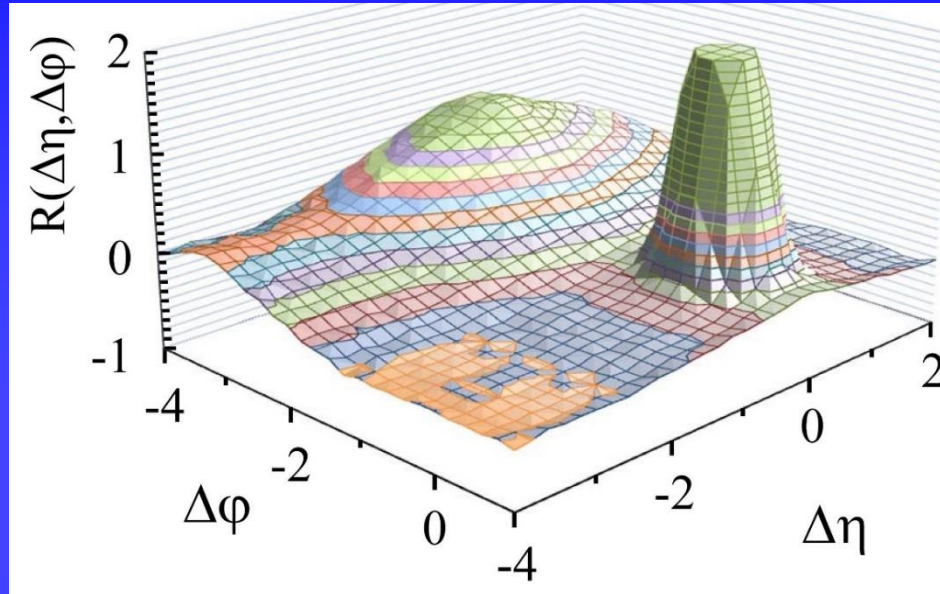
Pronounced structure at large  $\delta\eta$  around  $\delta\phi \sim 0$ !

Long-range near-side “ridge” effect at  $|\Delta\eta| \gtrsim 3$ ,  $|\Delta\phi| \approx 0$  is not really explained

**FANSY 2.0 QGSJ ( $n_{ch} \geq 110$ )**

No detector simulation!

**FANSY 2.0 CPG ( $n_{ch} \geq 110$ )**



long-range near-side «ridge» effect

FANSY 2.0 CPG reproduces  
the long-range near-side «ridge» effect

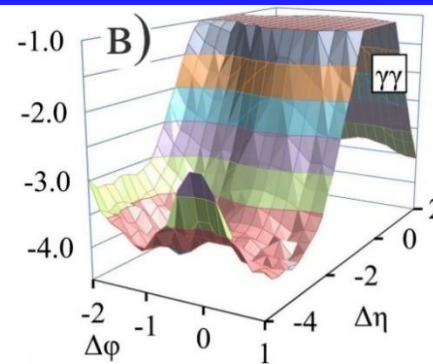
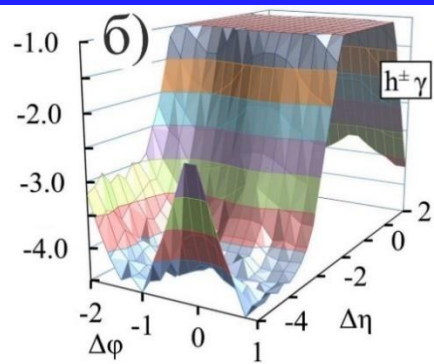
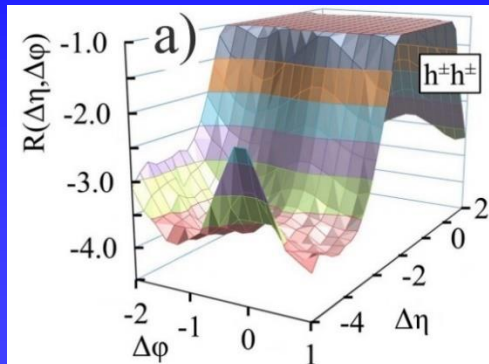
# Сравнение результатов FANSY 2.0 «2D» при $\tau_{2D} = 10^{-22}$ и $\tau_{2D} = 10^{-12}$ сек

!!! Показана только область «ridge» эффекта!!!

$h^{\pm}h^{\pm}$

$h^{\pm}\gamma$

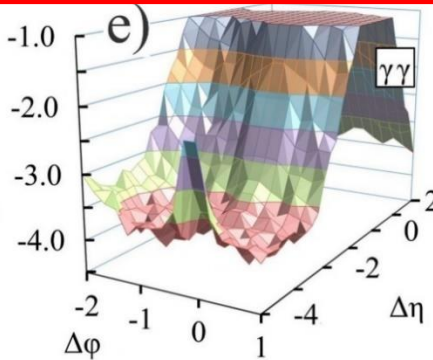
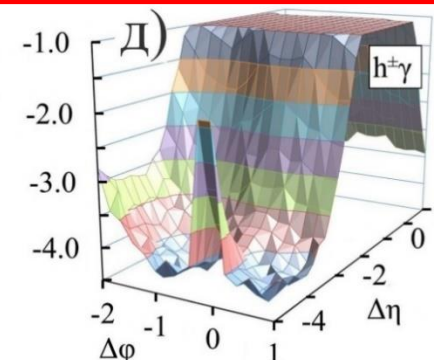
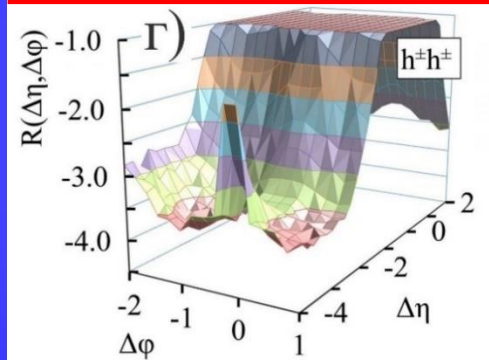
$\gamma\gamma$



$\tau_{2D} = 10^{-24}$  сек



2D-взаимодействия  
3D-распады



$\tau_{2D} = 10^{-12}$  сек



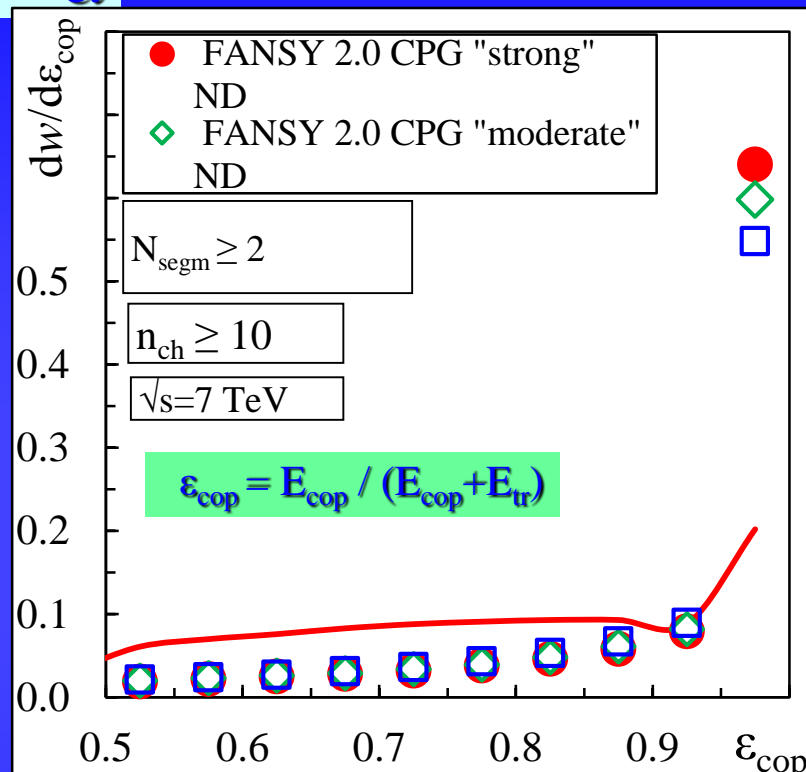
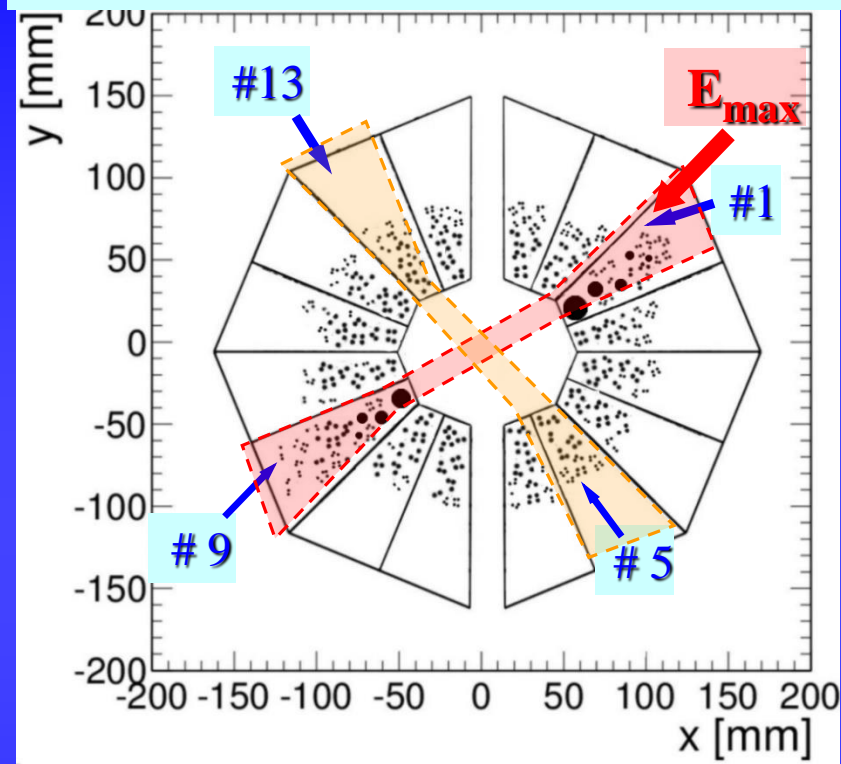
2D-взаимодействие  
2D-распады

1. Зависимость эффекта от  $\tau_{2D}$  имеет место (хотя диапазон  $\eta$  узковат)
2.  $h^{\pm}\gamma$  корреляции сильнее, чем  $h^{\pm}h^{\pm}$  корреляции
3. Корреляционный пик сужается с ростом  $\tau_{2D}$



## Coplanarity of energy flows in CASTOR segments at $5.3 < \eta < 6.5$

The larger the circle size, the larger the particle energy



$E_{\max}$  = maximum energy in  $i$ th segment ( $i \rightarrow \#1$ )

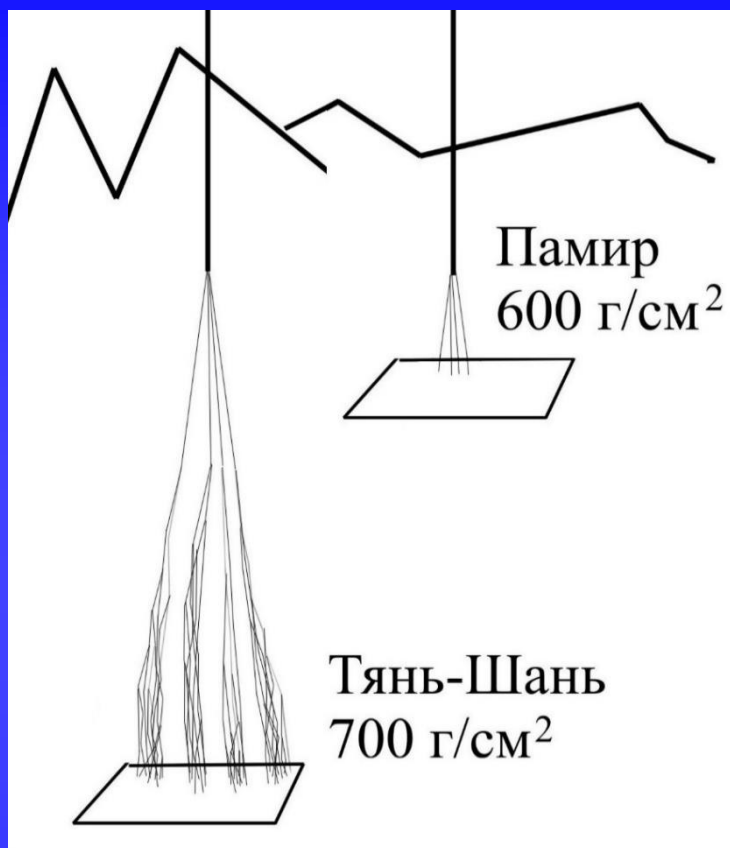
$E_{\text{cop}} = E_1 + E_9 =$  energy in segments 1+9

$E_{\text{tr}} = E_5 + E_{13} =$  energy in segments 5+13

Можно изучать  $dw/d\varepsilon_{\text{cop}}$  для различных частиц ( $n_{\text{ch}}, n_{\text{ch}} + \gamma, \gamma$ )

The model can be checked in the CASTOR experiment. Let's measure the energy release in each of the detector segments, assign #1 to the segment with the maximum energy release,  $E_{\max}$ , determine  $E_{\text{cop}}$ ,  $E_{\text{tr}}$ , and calculate  $\varepsilon_{\text{cop}}$  in each interaction

## Компланарность в стволах ШАЛ



- На Памире в РЭК регистрируются частицы высоких энергий ( $E > n \cdot \text{ТэВ}$ ) от взаимодействий с небольшими высот над РЭК
- До уровня Тянь-Шаня от тех же взаимодействий уже развиваются каскады (подстволы ШАЛ) от этих частиц.

Есть ли шанс изучать компланарные подстволы?

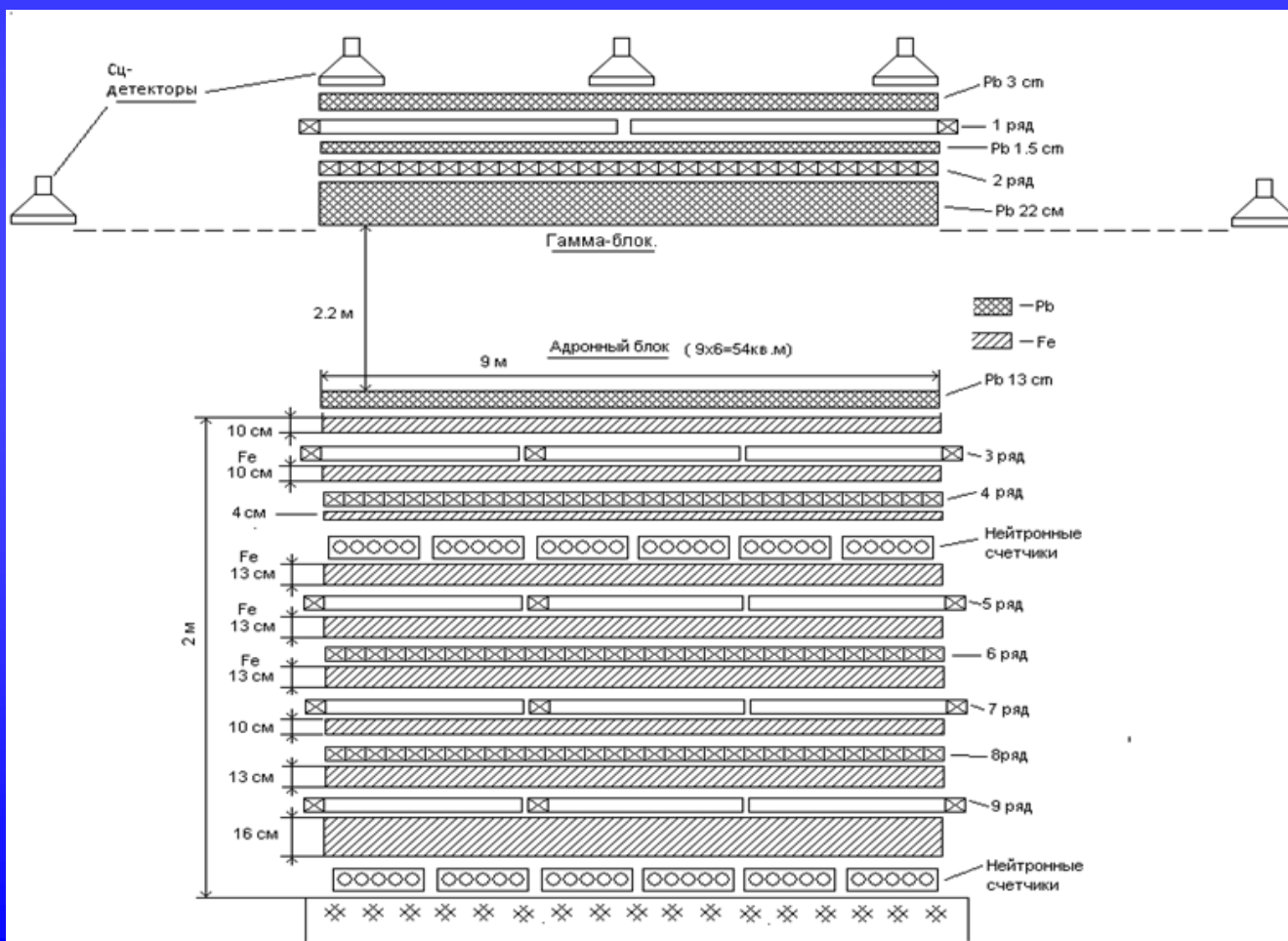
V.Pavlyuchenko. Bull.Lebedev Phys.Inst. 1998, No. 6:

наблюдалась компланарность подстволов ШАЛ на Большом Ионизационном Калориметре (ТШВНС), превышающая фон

Эксперименты с РЭК (разрешение  $\sim 1$  мм) сейчас не проводятся.  
Возможная замена РЭК – высокогорные (!) адронные калориметры

### АДРОН-М (ТШВНС) $700 \text{ г/см}^2$

1. Пространственное разрешение  $\sim 12$  см
2. Толщина  $\sim 1200 \text{ г/см}^2$  (Pb + Fe)  $\approx 7 - 8 \lambda_{\text{int}}$



## Заключение

В рамках предположения о связи аномальных азимутальных корреляций, наблюдаемых в экспериментах в космических лучах и на LHC, с локальными  $3D \rightleftharpoons 2D$  флуктуациями сигнатуры метрики пространства предлагается

- детально исследовать кинематическую историю каждого взаимодействия (в т.ч. генерацию резонансов и их распады в мезоны и  $\gamma$ -кванты) при высоких и сверхвысоких энергиях;
- попытаться оценить по азимутальным корреляциям феноменологические параметры возможных локальных флуктуаций сигнатуры метрики: характерные размеры и время существования  $2D$  области,  $L_{2D}$  и  $\tau_{2D}$ , соответственно
- продолжить исследования азимутальных характеристик потоков энергии в стволах ШАЛ
- попытаться подтвердить или опровергнуть существование локальных  $3D \rightleftharpoons 2D$  флуктуаций сигнатуры метрики пространства



Спасибо!