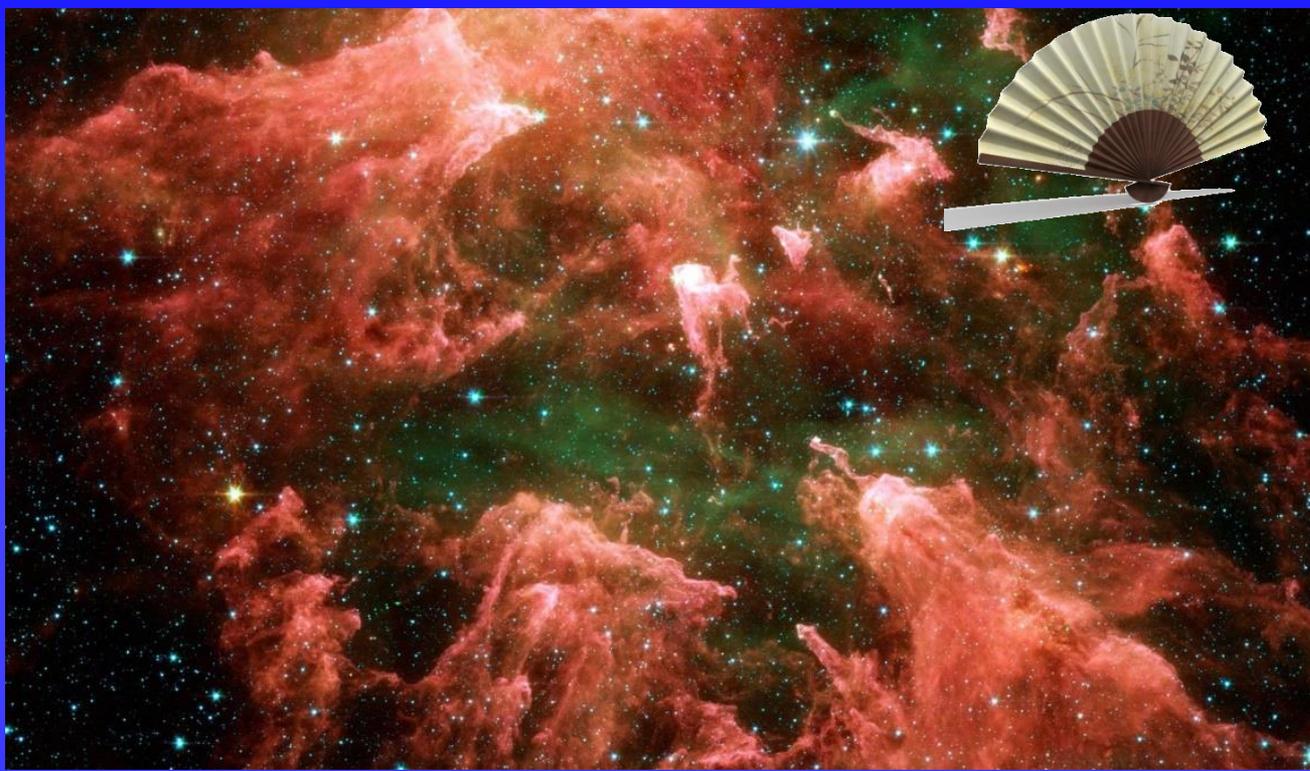


## 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам



Институт ядерных  
исследований  
РАН  
Москва



Р.А.Мухамедшин

Экспериментальное изучение сигнатуры  
метрики пространства по азимутальным  
корреляциям вторичных частиц во  
взаимодействиях адронов

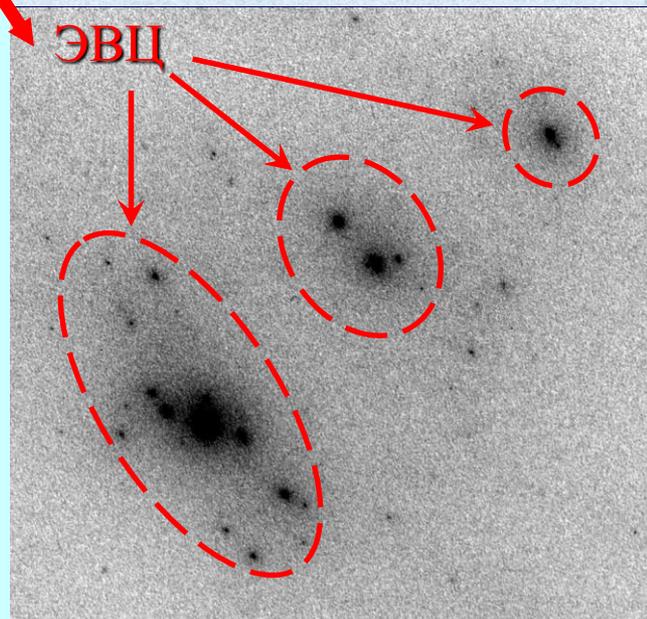
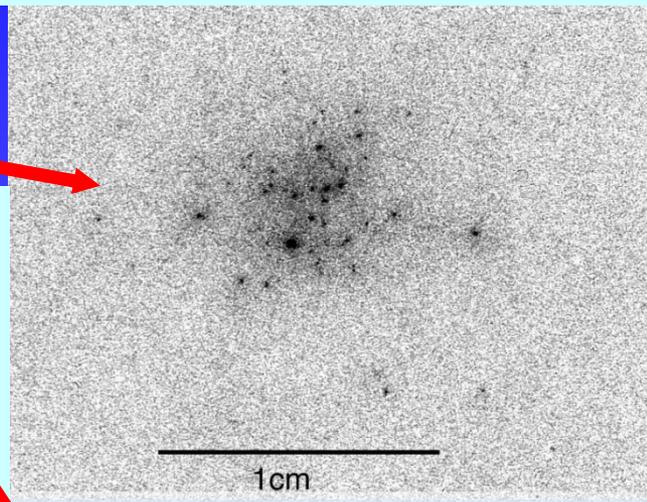
## Содержание

- Введение
- 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 ( $\gtrsim 10$  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,  $E_{\gamma,h} \gtrsim 5$  ТэВ,) с суммарной выделенной в РЭК энергией  $\Sigma E_{\gamma,h} \gtrsim 700$  ТэВ в
- высокогорных рентгеноэмульсионных экспериментах *Pamir & Kanbala*;
- стратосферных событиях «*JF2af2*» & «*Страна*»
- Явление соответствует энергиям адронных взаимодействий частиц ПКИ (в основном, протонов) с  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ



## 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	1	$0.0026 \pm 0.0003^*$
« <i>JF2af2</i> »	$\lambda_4 = 0.998, \Sigma E_\gamma > 1.4 \text{ PeV}$	1	1	$(9 \pm 3) \cdot 10^{-4}^*$

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

Из-за флуктуаций, 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  $\sigma_{\text{copl}}^p \sim a \cdot \sigma_{\text{inel}}^p$  ( $a \approx 0.1 - 0.5$ );
- связана с наиболее энергичными ( $x_F \gtrsim 0.01$ ) частицами в адронных взаимодействиях при  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ
- долгое время объяснялась ростом  $p_t$  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. Относительно традиционные концепции

1.1. образование лидирующей системы с очень высоким спином (Р.М. 1999, Capdevielle 2008, Юлдашбаев 2001) или большой поперечный импульс внутри дифракционного кластера (Ройзен 1994)

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

II. Переход размерности пространства с трех до двух измерений (“Crystal world” гипотеза, Anchoroqui 2010)  $\Rightarrow$  локализация поперечного импульса в некоторой плоскости и подавление его компонентов, перпендикулярных этой плоскости. В обзоре Stojkovic 2014 явление компланарности также связывается с двухмерным пространством

Изменение размерности пространства с трех до двух (и т.д.) измерений  $\Rightarrow$  изменение сигнатуры метрики пространственно-временного континуума

## Важно!

- В группе **I** (1.1 и 1.2) высокие значения компоненты поперечного импульса в плоскости компланарности ( $p_t^{\text{cop}} \gtrsim 1$  ГэВ/с) являются почти неизбежными (но это противоречит результатам экспериментов на LHC)
- В группе 1.1 (образование лидирующей системы) затруднительно объяснить long-range near-side «ridge» эффект Коллаборации CMS для событий с высокой множественностью, который с большой вероятностью является следствием компланарной генерации наиболее энергичных частиц
- Гипотезы группы **II** не требуют ни больших  $p_t^{\text{cop}}$ , ни образования лидирующей системы

Из всех гипотез, предложенных до настоящего времени, идеи, связывающие явление компланарности с уменьшением размерности пространства, феноменологически остаются наиболее подходящими.

Если допустить, что компланарная генерация адронов связана с уменьшением размерности пространства, то можно попытаться использовать экспериментальные данные для оценки параметров изменения сигнатуры!

*Экспериментальные данные и оценка  
параметров 2D сигнатуры пространства*

Stojkovic 2014

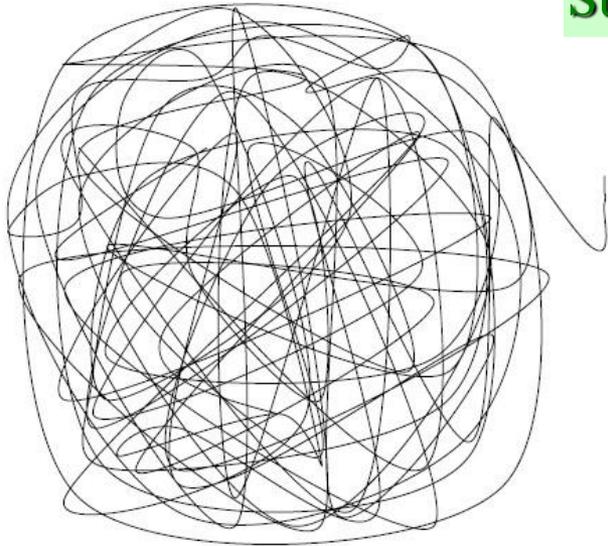


Рис. 1. Пример структуры, которая является одномерной (1D) на малых масштабах, в то время как она кажется двумерной на больших масштабах.

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

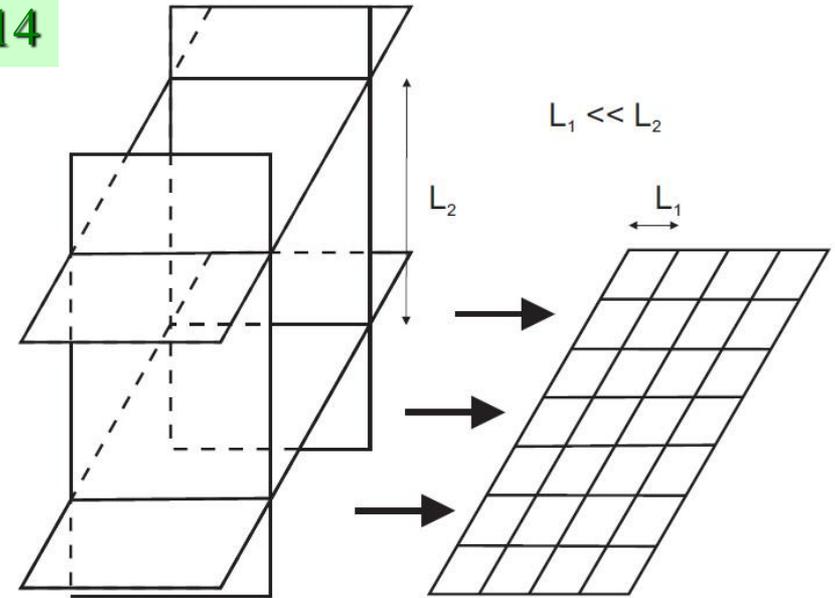


Рис. 2. Пространство-время с упорядоченной решетчатой структурой. Пространственная структура является одномерной (1D) в масштабах  $L \lesssim L_1$ , тогда как на масштабах  $L_1 \ll L \lesssim L_2$ , она представляется как 2D. В масштабах  $L_2 \ll L \lesssim L_3$ , структура представляется как 3D. 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.
- Около половины 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  $\sqrt{s}$  (в с.ц.м.) происходит кратковременная концентрация энергии в малой пространственной области порядка объёма протона  $v_p \equiv 4/3 \cdot \pi \cdot r_p^3 \approx 2.6 \cdot 10^{-39} \text{ см}^3$ , где  $r_p \approx 0.85 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  – характерный электрический радиус протона.
- Продолжительность времени взаимодействия оценивается как  $t_{\text{int}} \sim 2 r_p / c \sim 5.7 \cdot 10^{-24} \text{ сек}$ , где скорость света  $c \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ .
- Отсюда можно оценить для взаимодействия **пространственную плотность энергии** :  
 $\rho_{\text{int}} \sim \sqrt{s} / v_p = 7 \cdot 10^{12} / 2.6 \cdot 10^{-39} \sim 2.7 \cdot 10^{51} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$  (при  $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ );  
**пространственно-временную плотность энергии**:  
 $\varepsilon_{\text{int}} = \rho_{\text{int}} / t_{\text{int}} = 2.7 \cdot 10^{51} / 5.7 \cdot 10^{-24} = 4.8 \cdot 10^{74} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$

## Фундаментальные предположения:

- флуктуации сигнатуры метрики пространства становятся существенными, если 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  $\varepsilon_{\text{fluct}} \sim 10^{74} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$ , соответственно\*
- 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.

---

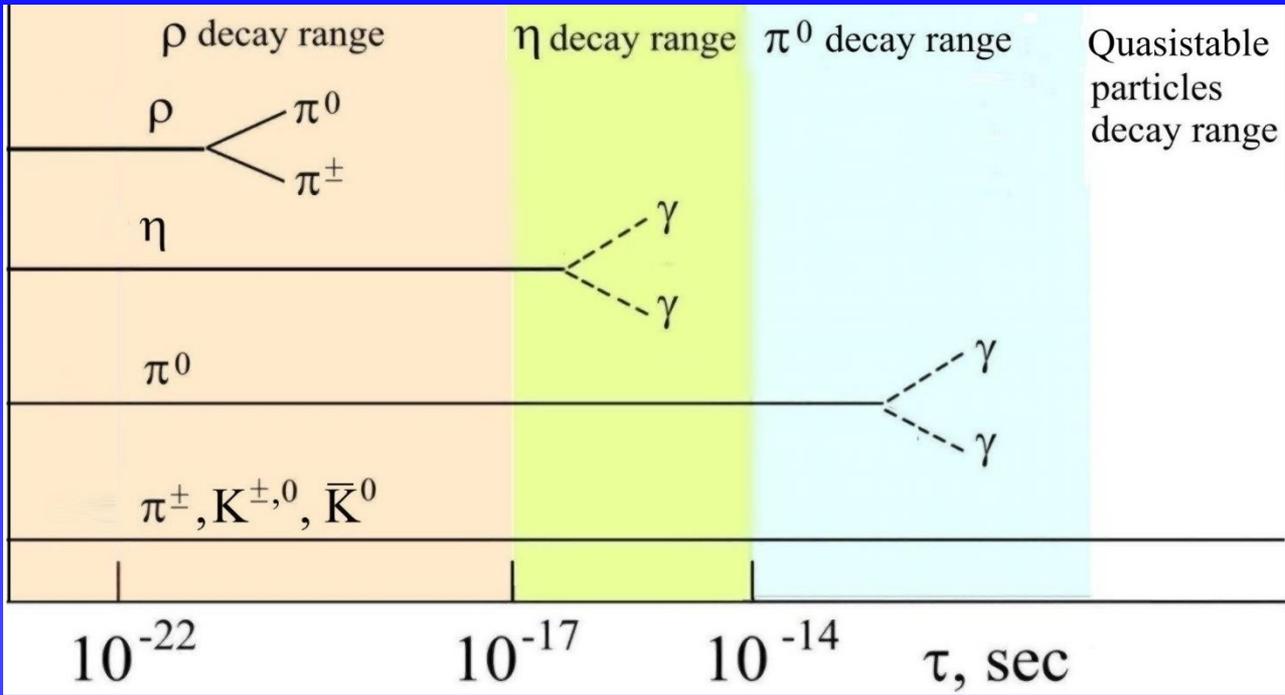
\* не исключено, что значения  $\rho_{\text{fluct}}$  и  $\varepsilon_{\text{fluct}}$  гораздо ниже

## 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  $\tau = \tau_0 \cdot \gamma_L = \tau_0 \cdot E/m_0 \lesssim \tau_{2D}$  (где  $\gamma_L$  – Лоренц-фактор)
  - 2) покинув **2D** пространство, если  $\tau \gtrsim \tau_{2D}$ .
- В случае **1)** азимутальный разлёт вторичных адронов определяется той же плоскостью компланарности, и, в целом, эффект усиливается по сравнению с эффектом от первичных резонансов-родителей. В случае **2)** 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 время существования флуктуации.

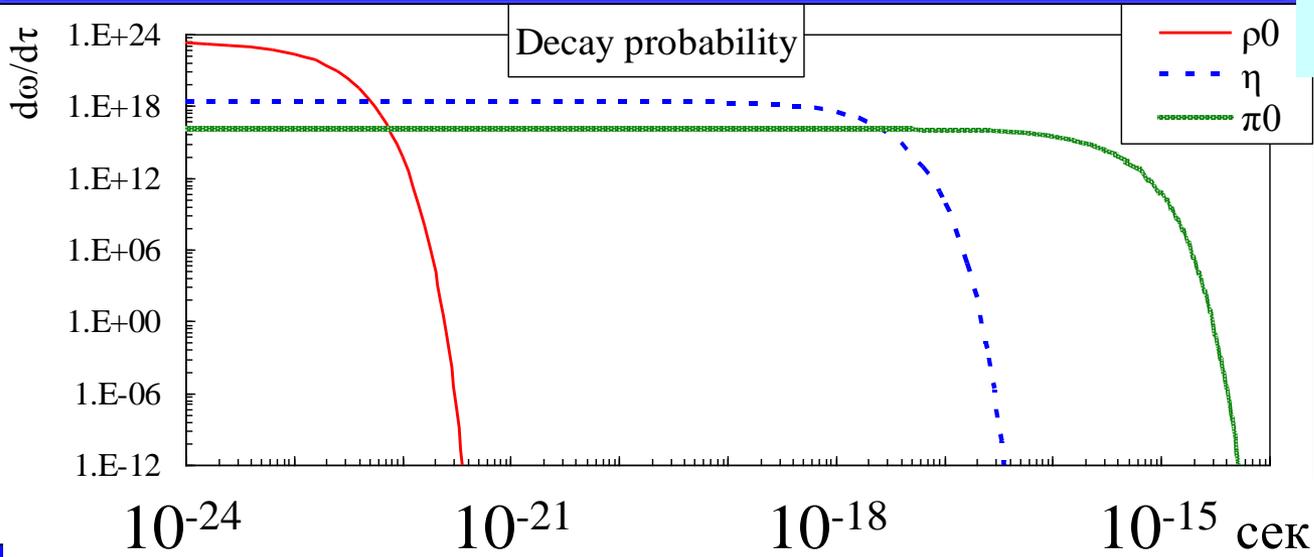
## Примеры

- 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  $y \gtrsim y_{\text{thr}}^{\text{CPG}}$ ,  $E \gtrsim 17.5 \text{ GeV}$ ,  $p_t \approx 0.6 \text{ GeV}/c$ .**

**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  $u$  (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

1. Высокая степень компланарности  $\rho$ -мезонов или других адронов прямой генерации ( $y \gtrsim y_{\text{thr}}^{\text{CPG}}$ ,  $E \gtrsim 17.5 \text{ GeV}$ ,  $p_T \approx 0.6 \text{ GeV}/c$ ) означает, что

$$10^{-23} \lesssim \tau_{2D} \lesssim 10^{-22} \text{ сек}; L_{2D} \lesssim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-22} \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}$$

2. Высокая степень компланарности  $\eta$ -мезонов будет означать, что

$$10^{-17} \lesssim \tau_{2D} \lesssim 10^{-16} \text{ сек}; L_{2D} \lesssim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-16} \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$$

3. Высокая степень компланарности  $\pi^0$ -мезонов будет означать, что

$$10^{-16} \lesssim \tau_{2D} \lesssim 10^{-14} \text{ сек}; L_{2D} \lesssim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-14} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

4. Высокая степень компланарности  $\gamma$ -квантов будет означать, что

$$\tau_{2D} \gtrsim 10^{-14} \text{ сек}; L_{2D} \gtrsim c \cdot \tau_{2D} \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-14} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^*$$

и служить доказательством существования 2D-флуктуации метрики пространства

\* На это намекают характеристики стратосферного события «JF2af2»

(включающего только  $\gamma$  и  $e^\pm$ ) ( $\sum E_\gamma \gtrsim 1.4 \text{ PeV}$ ,  $n_\gamma = 38$ )

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

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

- Значения  $L_{2D}$  существенно отличаются от  $L_2 \sim 10^{-17}$  см (Anchordoqui et al. 2012)
- Возможно, свойства флуктуаций как-то зависят от энергии взаимодействия

Можно попытаться искать

- компланарную генерацию 4-х КХД струй;
- двухчастичные азимутальные корреляции заряженных и нейтральных частиц, например,  $\pi^\pm - \gamma$ ,  $\gamma - \gamma$

Очень важно продолжать исследования компланарности в космических лучах, т.к. они дают информацию о генерации вторичных частиц в наиболее широком интервале  $x_F$ .

## 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;
- подтвердить или опровергнуть существование локальных  $3D \rightleftharpoons 2D$  флуктуаций сигнатуры метрики пространства
- оценить по азимутальным корреляциям феноменологические параметры возможных локальных флуктуаций сигнатуры метрики: характерные размеры и время существования  $2D$  области,  $L_{2D}$  и  $\tau_{2D}$ , соответственно



Спасибо!