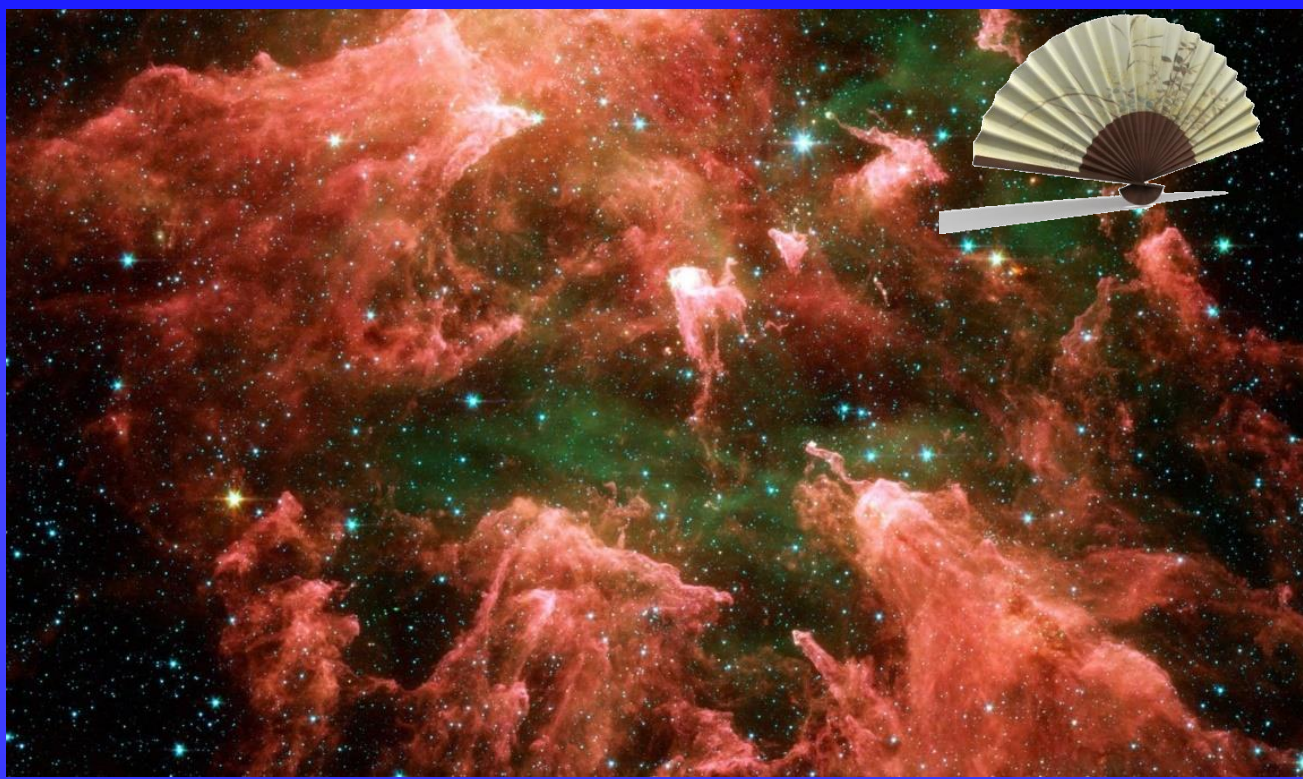


37-я Всероссийская конференция по космическим лучам



Институт ядерных
исследований
РАН
Москва



Р.А.Мухамедшин

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

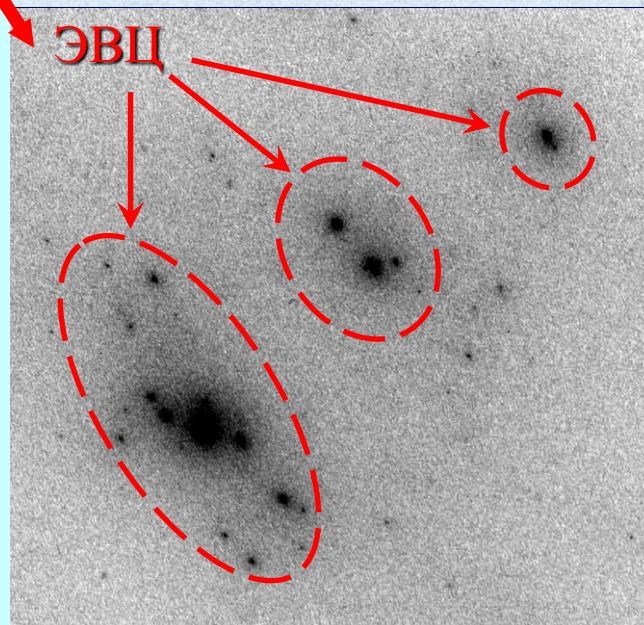
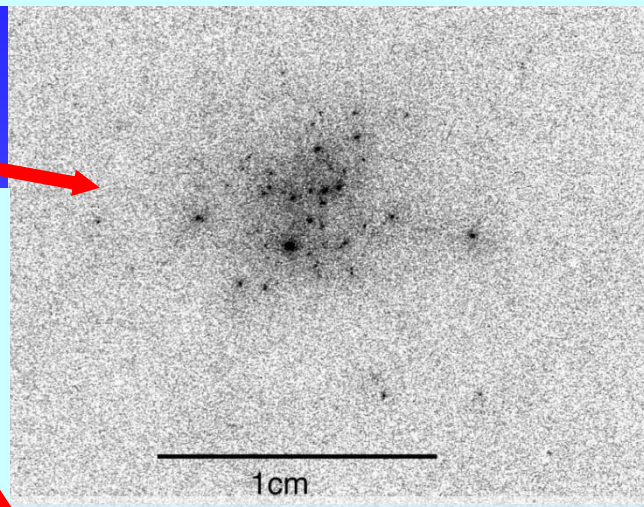
Содержание

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

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

Традиционная концепция: взаимодействий (и γ -h семейств) ~ почти **осевая симметрия**

- Неожиданный результат: **компланарность** наиболее энергичных (≥ 10 ТэВ) ЭВЦ (энергетически выделенных центров, т.е. отдельных адронов, γ -квантов, e^\pm и/или генетически связанных подгрупп) обнаружена в т.н. γ -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



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, Anchordoqui 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^{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

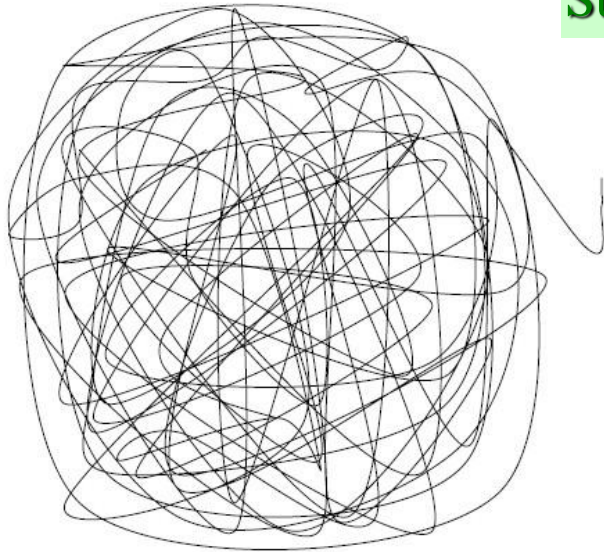


Рис. 1. Пример структуры, которая является одномерной (1D) на малых масштабах, в то время как она кажется двумерной на больших масштабах.

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

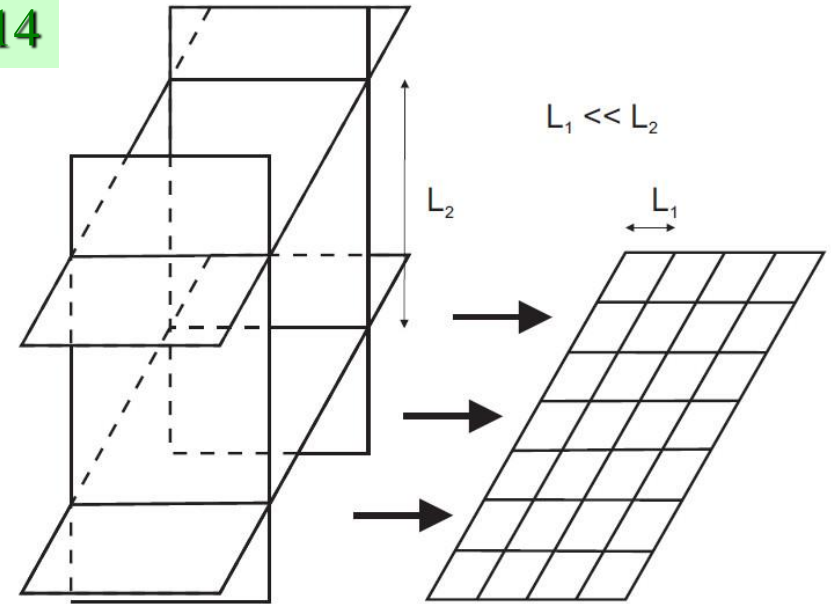


Рис. 2. Пространство-время с упорядоченной решетчатой структурой. Пространственная структура является одномерной (1D) в масштабах $L \lesssim L_1$, тогда как на масштабах $L_1 \ll L \lesssim L_2$, она представляется как 2D. В масштабах $L_2 \ll L \lesssim L_3$, структура представляется как 3D. В больших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

Исходная информация

- В процессах множественной генерации вторичных частиц прямо рождаются как относительно стабильные частицы (π^\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:

ρ -мезоны: $\tau_{0\rho} \sim 4.5 \cdot 10^{-24}$ сек,

η -мезоны: $\tau_{0\eta} \sim 5.1 \cdot 10^{-19}$ сек,

π^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:
 $\varepsilon_{\text{int}} \equiv \rho_{\text{int}} / t_{\text{int}} = 2.7 \cdot 10^{51} / 5.7 \cdot 10^{-24} = 4.8 \cdot 10^{74} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$

Фундаментальные предположения:

- флуктуации сигнатуры метрики пространства становятся существенными, если пространственная (ρ_{int}) и пространственно-временная (ε_{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 ρ_{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 γ_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 τ_{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 ($\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$, η^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 ρ , η , π^0 в покое $\tau_0 \approx 4.5 \cdot 10^{-24}$, $5.1 \cdot 10^{-19}$, $0.8 \cdot 10^{-16}$ сек, соответственно.
- Для ρ $\gamma_{L\rho} \approx 23 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\rho = 23 \cdot 4.5 \cdot 10^{-24} \approx 10^{-22}$ сек.
- Для η $\gamma_{L\eta} \approx 32 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\eta = 32 \cdot 5.1 \cdot 10^{-19} \approx 1.5 \cdot 10^{-17}$ сек.
- Для π^0 $\gamma_{L\pi} \approx 125 \rightarrow \tau_{2D} \gtrsim \tau_\pi = 125 \cdot 0.8 \cdot 10^{-16} \approx 10^{-14}$ сек.

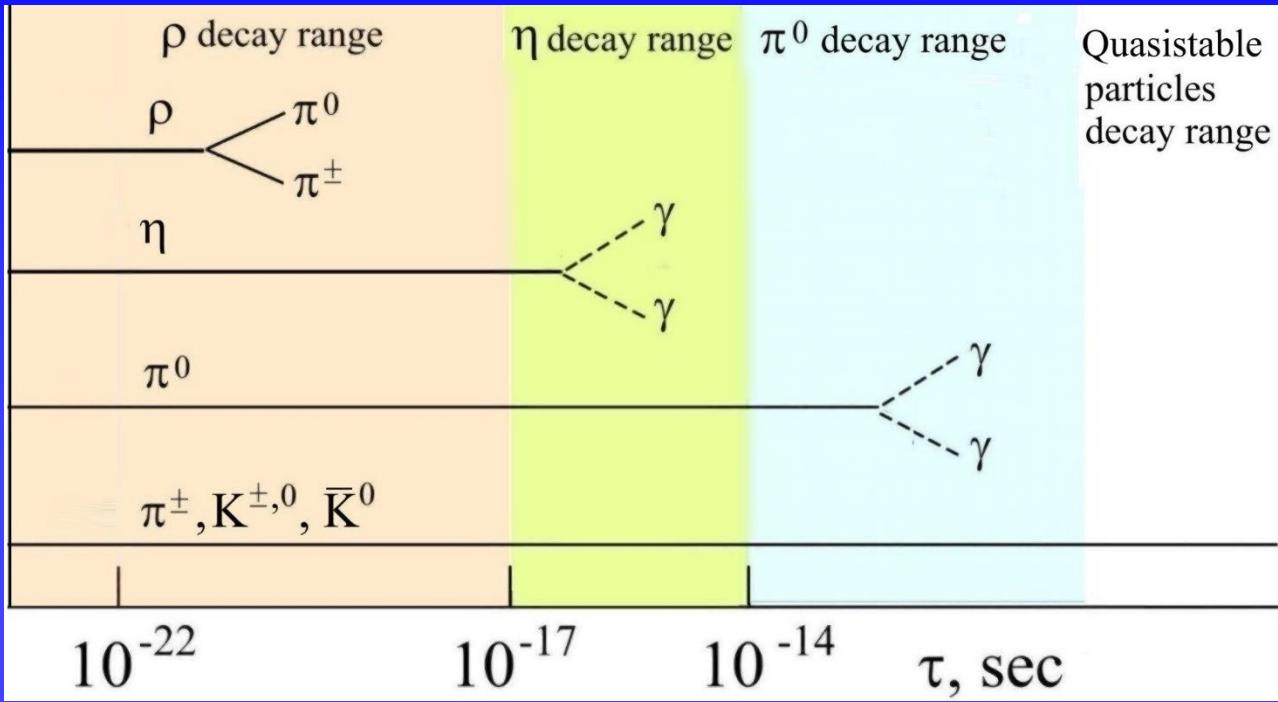
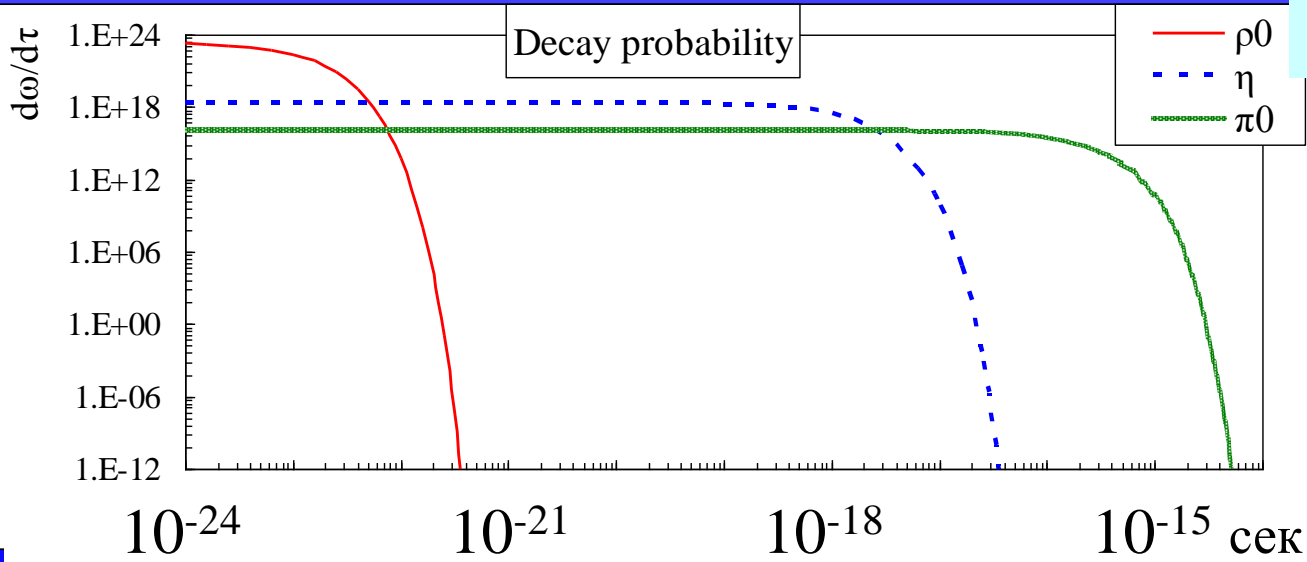


Схема примерных временных диапазонов двухчастичного распада мезонов с $y \gtrsim y_{\text{thr}}^{\text{CPG}}$, $E \gtrsim 17.5 \text{ GeV}$, $p_t \approx 0.6 \text{ GeV}/c$.

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, τ_{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) γ -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) ρ -мезонов;
 - б) η -мезонов;
 - в) π^0 -мезонов;
 - г) γ -квантовс учётом канала их генерации (прямая генерация или распад более тяжелых адронов)

Возможные экспериментальные результаты

1. Высокая степень компланарности ρ -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 η -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 π^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 γ -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 γ 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 $L2 \sim 10^{-17}$ 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 γ -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 τ_{2D} , соответственно



Спасибо!