



О связи между «ridge»-эффектом на LHC и компланарностью частиц в космических лучах

Р.А.Мухамедшин

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Содержание

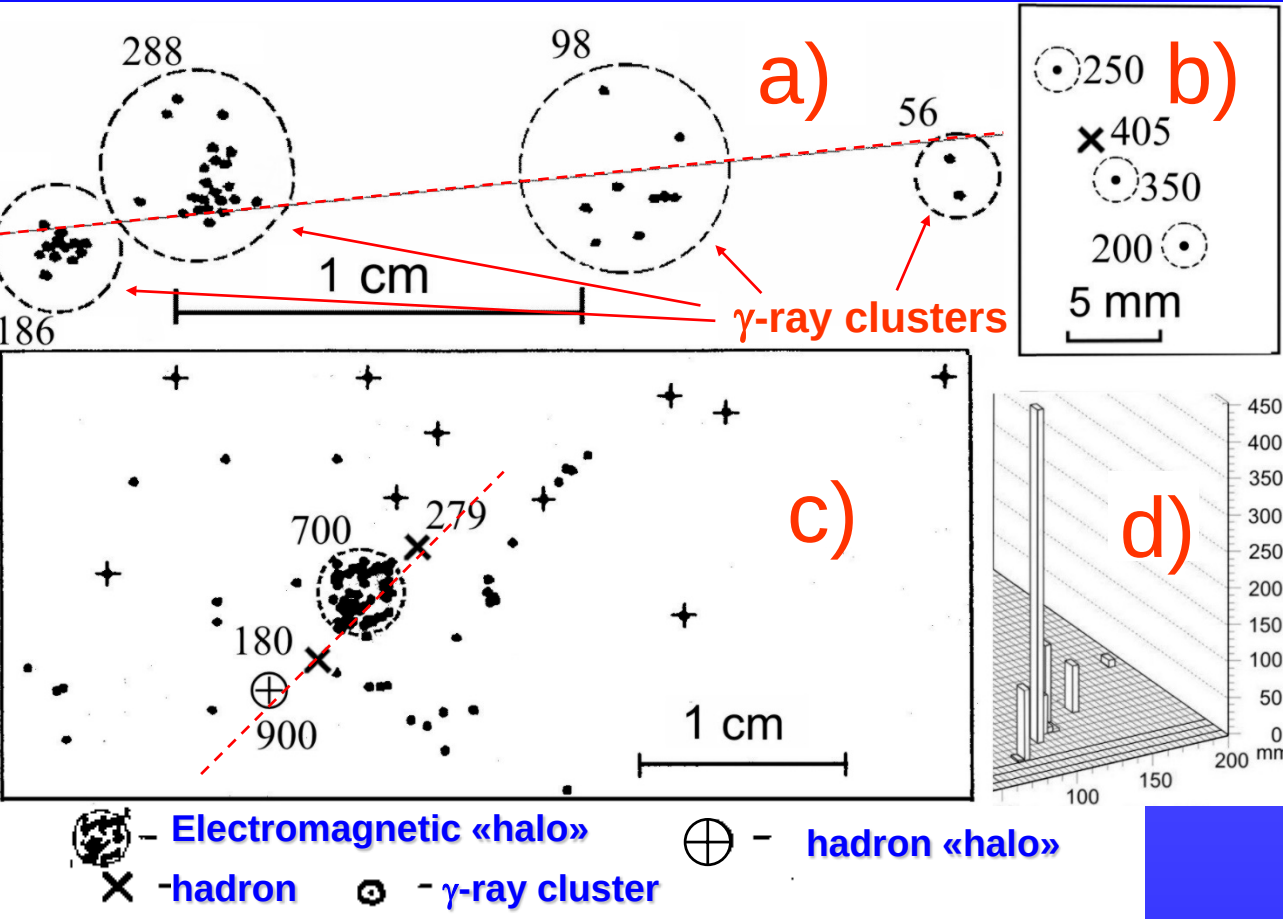
- Компланарность в космических лучах при сверхвысоких энергиях
- “Ridge” эффект Коллаборации CMS (LHC)
- Модель FANSY 2.0 (версии QGSJ и CPG)
- Сравнение экспериментальных данных CMS и результатов моделирования FANSY 2.0

*Компланарность в космических лучах при
сверхвысоких энергиях*

Компланарность наиболее энергичных ($\gtrsim 10$ ТэВ) подстволов (отдельных частиц, развитых ЭФК) в стволах ШАЛ

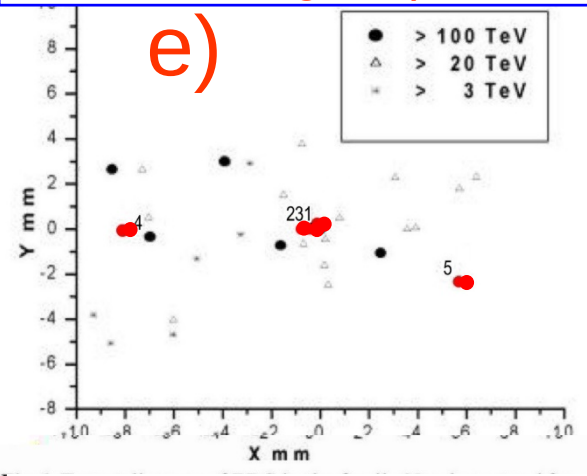
- обнаружена в т.н. γ - h семействах (группах наиболее энергичных частиц, $E_{\gamma,h} > n \cdot 1$ ТэВ,) с суммарной наблюдаемой энергией $\Sigma E_{\gamma,h} \gtrsim 500$ ТэВ в
 - высокогорных рентгеноэмульсионных экспериментах *Pamir & Kanbala*;
 - стратосферных событиях «*JF2af2*» & «*Страна*»
- соответствует энергиям адронных взаимодействий первичных частиц (в основном, протонов) $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ

Компланарность в космических лучах



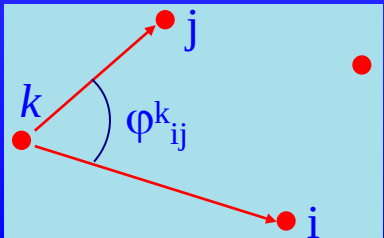
Примеры выстроенности

• 5 most energetic particles



$\langle P_t \rangle \approx 10 \div 100 \text{ GeV/c}$

“Памир” : **a)** 4- γ -кластерное семейство; **b)** Pb-6: $\lambda_4=0.95$; **c)** Pb-28: $\lambda_4=0.85$.
d) JF2af2 (“Concorde”); **e)** «Страна» (аэростат). Цифры – энергия (TeV)



$-1/(N-1) \leq \lambda_N \leq 1.0$
 Aligned event: $\lambda_N \geq \lambda_{fix}$
 Usually: $\lambda_4 \geq 0.8$

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

Экспериментальная доля компланарных семейств

Experiment («event»)	Критерии отбора	Coplanar family		
		number $N_{\text{copl}}^{\text{exp}}$ from N_{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> »	$\lambda_4 = 0.99, \Sigma E_{\gamma+h} > 4 \text{ PeV}$	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
 $F_{\text{copl}}^{\text{sim}} (\lambda_4 \geq 0.8) \approx 0.05$

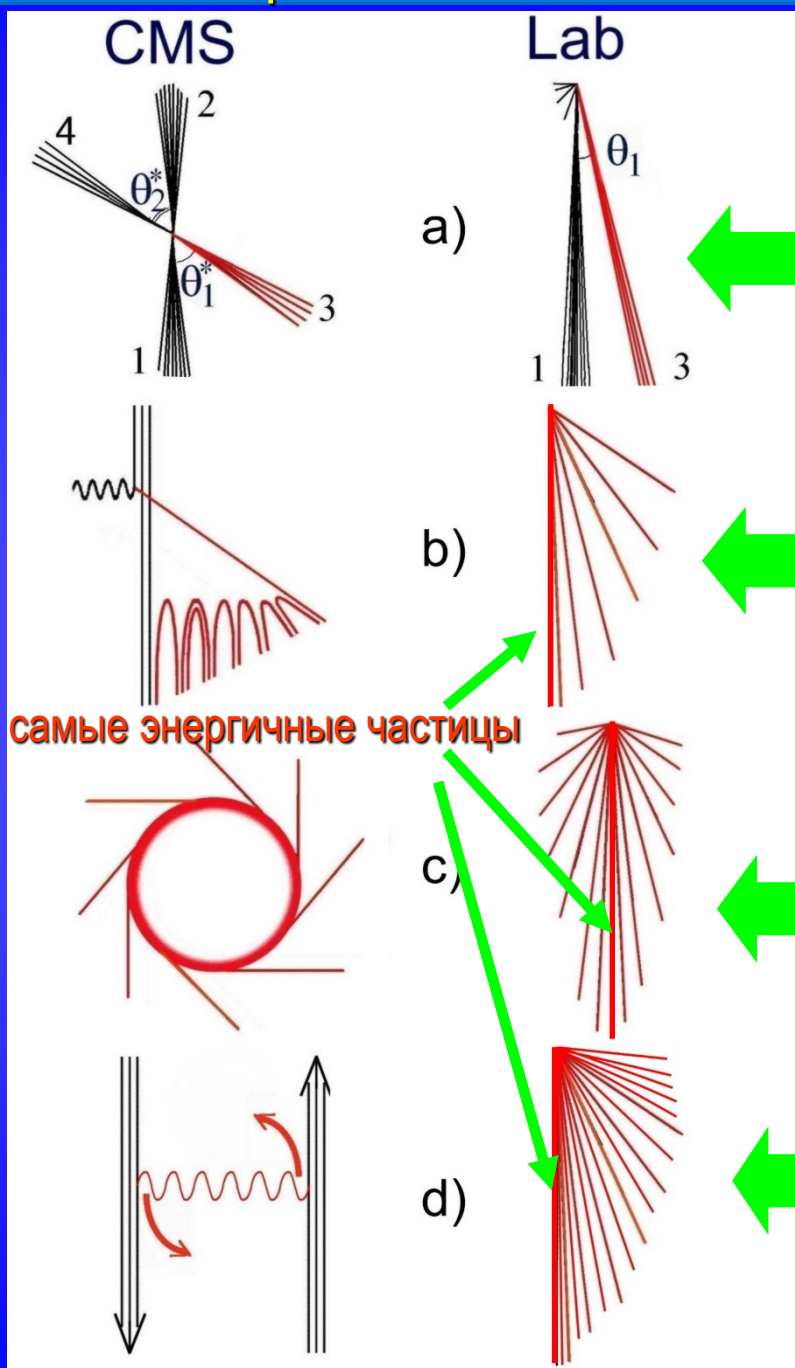
Компланарность, наблюдаемая в экспериментах,

- не объясняется
 - флуктуациями в рамках КГС моделей ($w_{\text{fluct}} \lesssim 10^{-10}$)
- не описывается в рамках QCD;
- характеризуется $\sigma^p_{\text{copl}} \sim a \cdot \sigma^p_{\text{inel}}$ ($a \approx 0.1 - 0.5$);
- связана с наиболее энергичными ($x_F \gtrsim 0.05 - 0.10$) частицами в адронных взаимодействиях при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ
- долгое время объяснялась ростом p_t частиц в плоскости компланарности (инерция мышления+отсутствие соответствующих расчетов!)

Теоретическая ситуация:

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

Компланарность в космических лучах



a) QCD струи: $\sin \theta_i \approx \text{const}$

⇒ неприемлемая корреляция $p_t \sim p_L$

⇒ “Бинокулярные” γ - h семейства

⇒ **Нет** реального эффекта в КЛ

Приемлемые (феноменологически!) идеи:

b) **SHDID** (Ройзен, 1994) –

разрыв натянутой кварк-глюонной струны в дифракционном DD кластере:

⇒ приемлемая корреляция

⇒ выстроенность **может** наблюдаться

c) лидирующая система с очень высоким моментом вращения

⇒ приемлемая корреляция

⇒ выстроенность **может** наблюдаться

d) сохранение углового момента КГС (Wibig 2004)

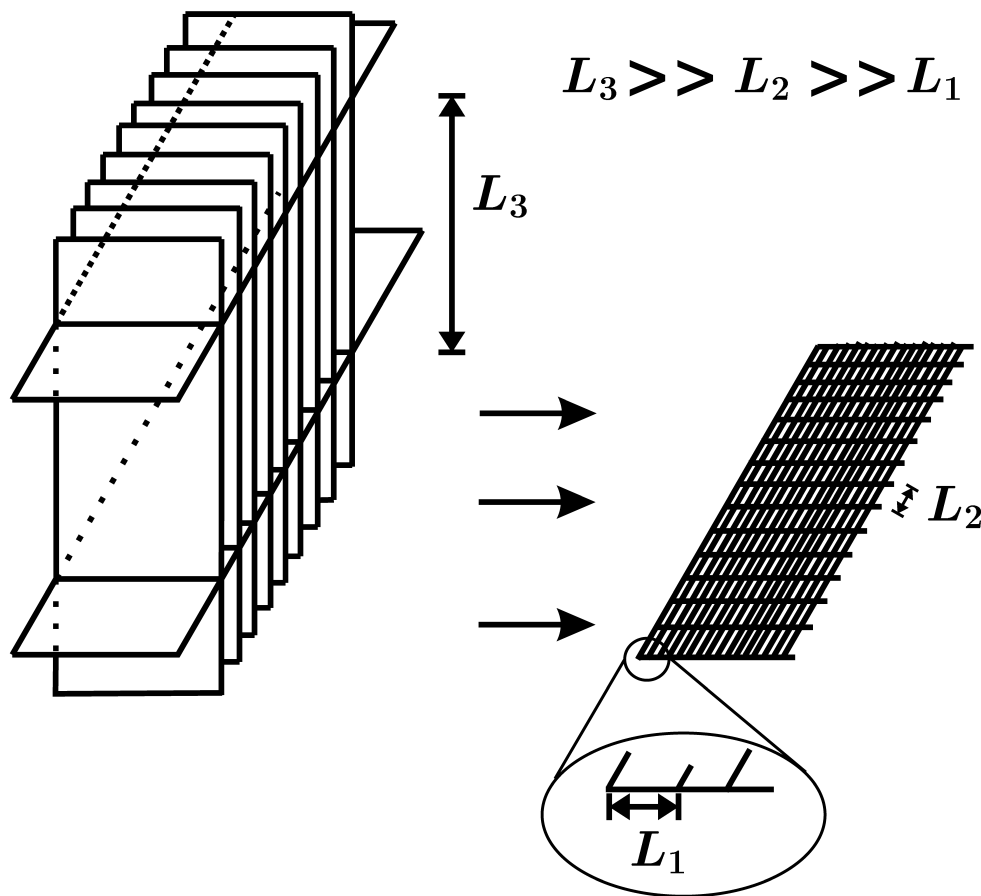
⇒ приемлемая корреляция

⇒ выстроенность **может** наблюдаться

Самая экстравагантная гипотеза

е) Luis A. Anchordoqui *et al.* 2010:

This phenomenon can be described within the recently proposed “crystal world” with latticized and anisotropic spatial dimensions. Planar events are expected to dominate in particle collisions at a hard-scattering energy exceeding the scale 3 at which space transitions from $3D \rightleftharpoons 2D$



Ordered lattice. The fundamental quantization scale of space is indicated by L_1 . Space structure is 1D on scales much shorter than L_2 , while it appears effectively 2D on scales much larger than L_2 but much shorter than L_3 . At scales much larger than L_3 , the structure appears effectively 3D.

Ассоциации:

Рост энергии взаимодействия → переход к более фундаментальному уровню строения материи

- ядро → нуклон → кварки
- $L_3 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1$

Дальнейшие исследования тормозятся, т.к.

- до сих пор нет детально разработанной теоретической модели, пригодной для исследований эффекта компланарности
- существующие модели ориентированы на
 - 1) **коллайдерные эксперименты** $\Rightarrow$ узкий рабочий диапазон по энергии и (псевдо)быстроте $y(\eta)$ и тяжеловесность
 - 2) **эксперименты в КЛ** $\Rightarrow$ узкий набор типов частиц в моделях: генерация чарма – только *SIBYLL* 2.1 & 2.3; некоторые резонансы – только *EPOS* LHC и *QGSJET* II-04
- модели группы 1) не используются в КЛ
- модели группы 2) не слишком хорошо описывают данные по γ - h семействам (за которые отвечают адроны с $x_F \gtrsim 0.05 - 0.10$)

Для исследования проблемы компланарности нужна специальная феноменологическая модель.

В данной работе используется модель *FANSY 2.0* с каналом генерации компланарных частиц, рождающихся в результате фрагментации кварк-глюонных струн (КГС)

*The “ridge” effect
by the LHC’s CMS Collaboration
at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$*

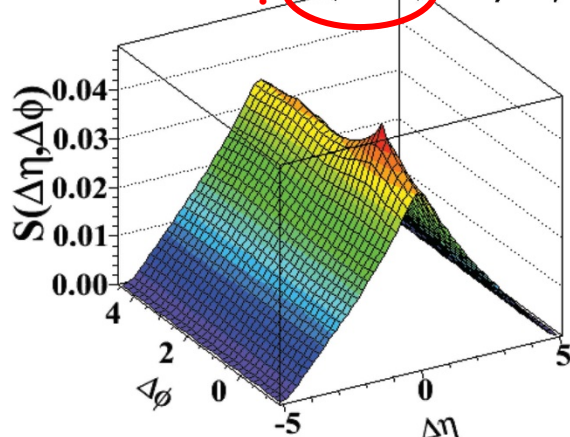


Correlation Function Definition



Signal distribution:

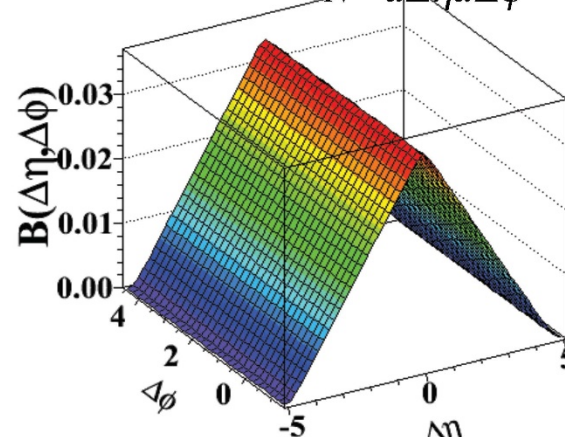
$$S_N(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \frac{1}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\varphi}$$



**N – полное
число пар
частиц)**

Background distribution:

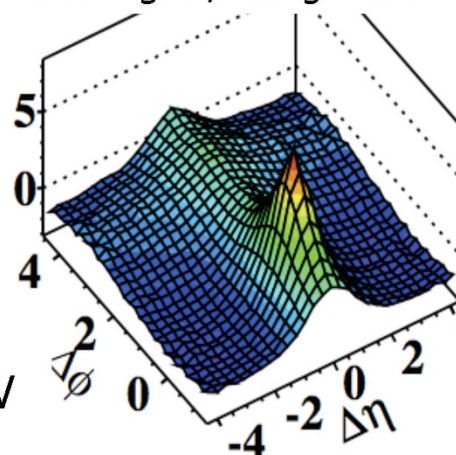
$$B_N(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \frac{1}{N^2} \frac{d^2 N^{bkg}}{d\Delta\eta d\Delta\varphi}$$



(распределение по Δη и Δφ пар
частиц внутри **одного и того же
взаимодействия**)

(распределение по Δη и Δφ пар
частиц из **разных взаимодействий**)

Ratio Signal/Background



CMS pp 7TeV

$$R(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \left\langle (N-1) \left(\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\varphi)} - 1 \right) \right\rangle_N$$

p_T -inclusive two-particle
angular correlations in
min bias collisions

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

$$\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$$

- Offline отбор взаимодействий в CMS:
 $n_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ @ $|\eta| < 2.4$; $0.4 < p_t < 5.0$ GeV/c
(~ 1 отобранное событие на 10^6 взаимодействий)
- Корреляционный $\Delta\phi$ – $\Delta\eta$ анализ отобранных взаимодействий:
 - все n_{ch} @ $1.0 < p_t < 3.0$ GeV/c;
 - используются значения $\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2|$; $\Delta\eta = |\eta_1 - \eta_2|$
 реальная статистика – только в квадранте $\Delta\phi > 0$; $\Delta\eta > 0$
 - остальные квадранты предполагаются зеркально симметричными первому квадранту относительно точки
($\Delta\phi = 0$; $\Delta\eta = 0$)
- корреляции рассматриваются при
 $|\Delta\phi| \leq 4.0$;
 $|\Delta\eta| \leq 4.0$

Корреляции, объясняемые известными процессами



Angular Correlation Functions



“Away-side” ($\Delta\phi \sim \pi$) jet correlations:
Correlation of particles between back-
to-back jets
and resonances

CMS 7TeV pp min bias

Bose-Einstein correlations:
($\Delta\phi, \Delta\eta$) $\sim$ (0,0)

Real range of
accumulated values
 $0 < \Delta\phi \leq 4.0$;
 $0 < \Delta\eta \leq 4.0$

Momentum conservation:
 $\sim -\cos(\Delta\phi)$

“Near-side” ($\Delta\phi \sim 0$) jet peak:
Correlation of particles
within a single jet

Short-range correlations ($\Delta\eta < 2$):
Resonances, string fragmentation,
“clusters”



Results

Intermediate p_T : 1-3 GeV/c

MinBias = all multiplicities

high multiplicity ($N > 110$)

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

(d) $N > 110$, $1.0 \text{ GeV/c} < p_T < 3.0 \text{ GeV/c}$

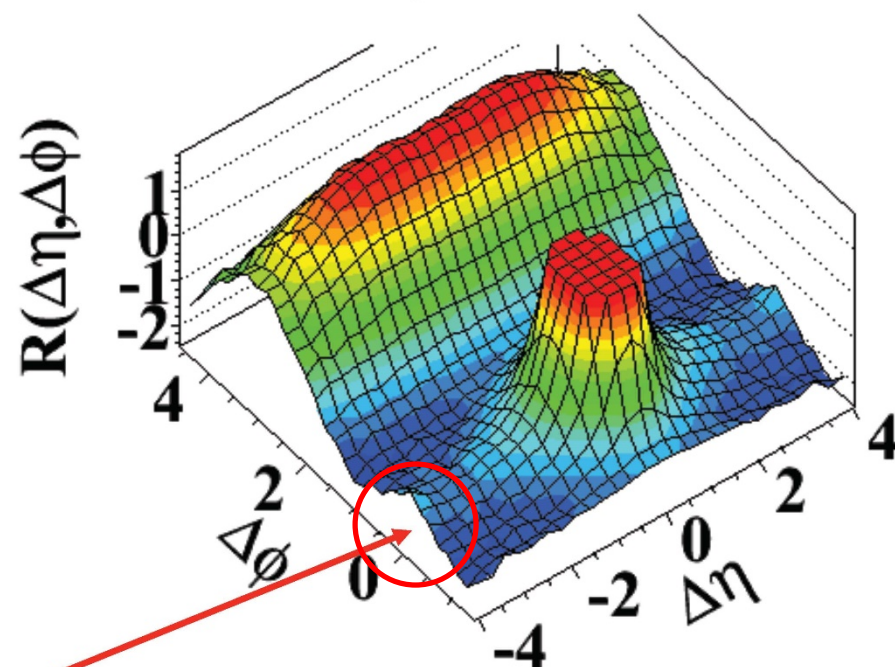
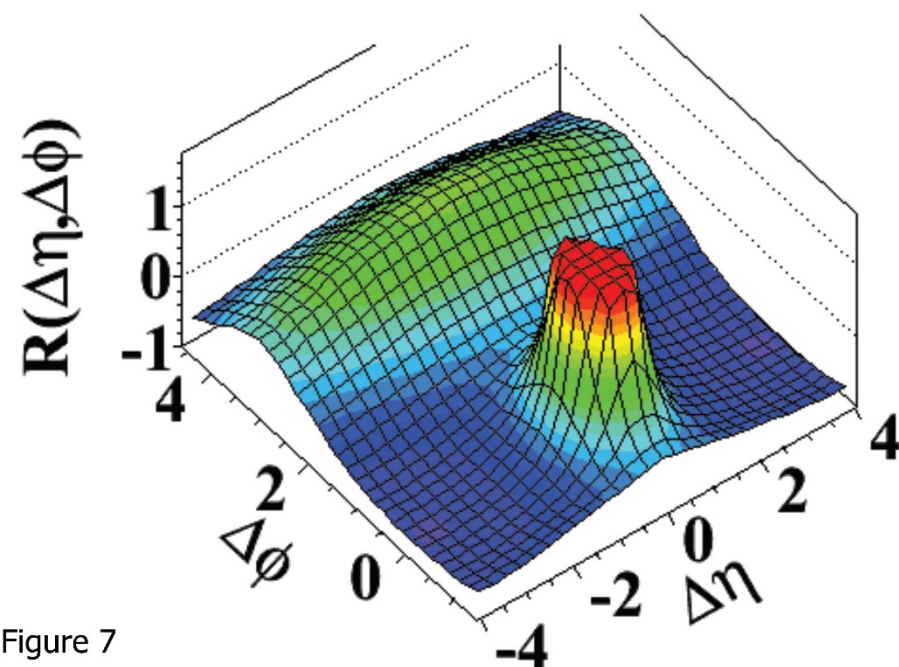


Figure 7

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

“Ridge” эффект не объясняется известными процессами !

Феноменологический код *FANSY* 2.0

p - p взаимодействия

FANSY 2.0

FANSY = FAN-like Secondary particle Yield

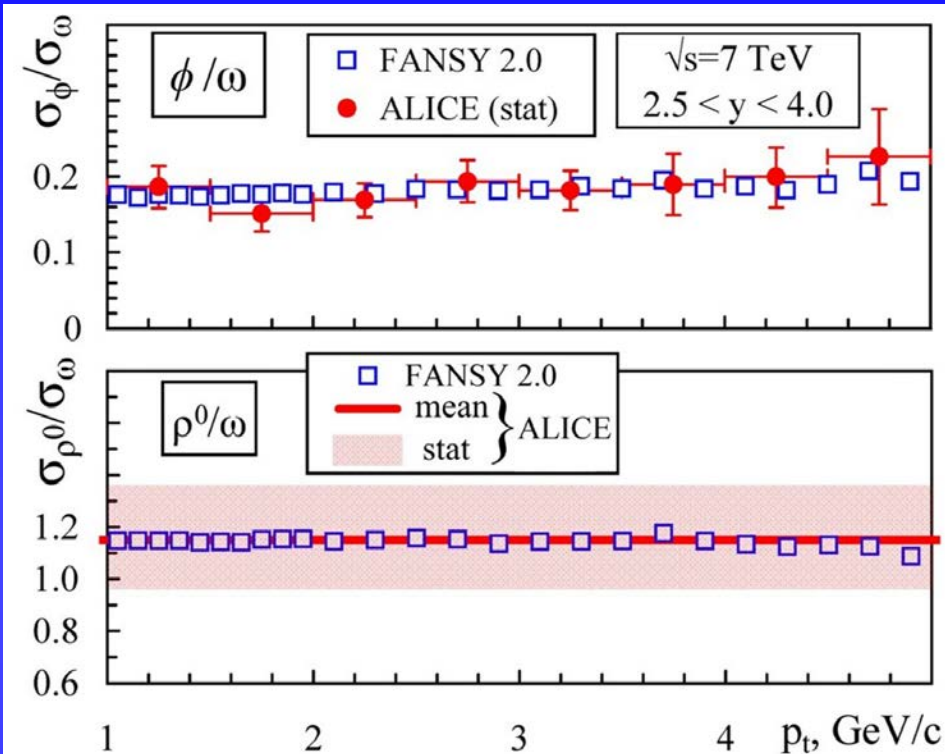
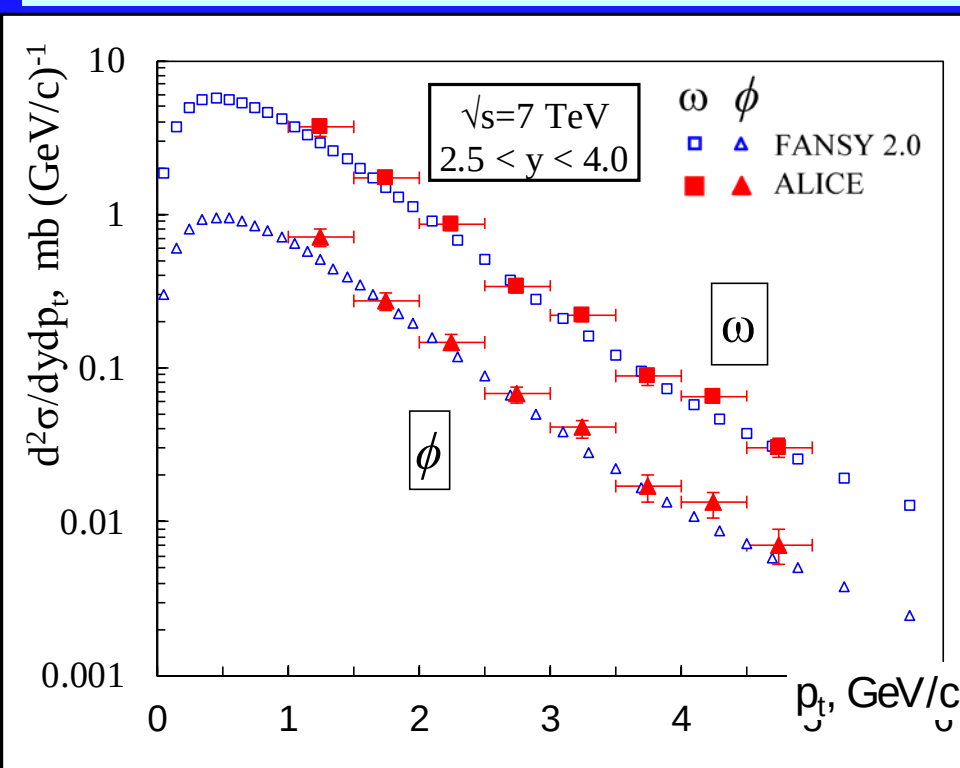
- *FANSY* QGSJ = традиционная версия
- *FANSY* CPG = модифицированная QGSJ + CPG

FANSY CPG:

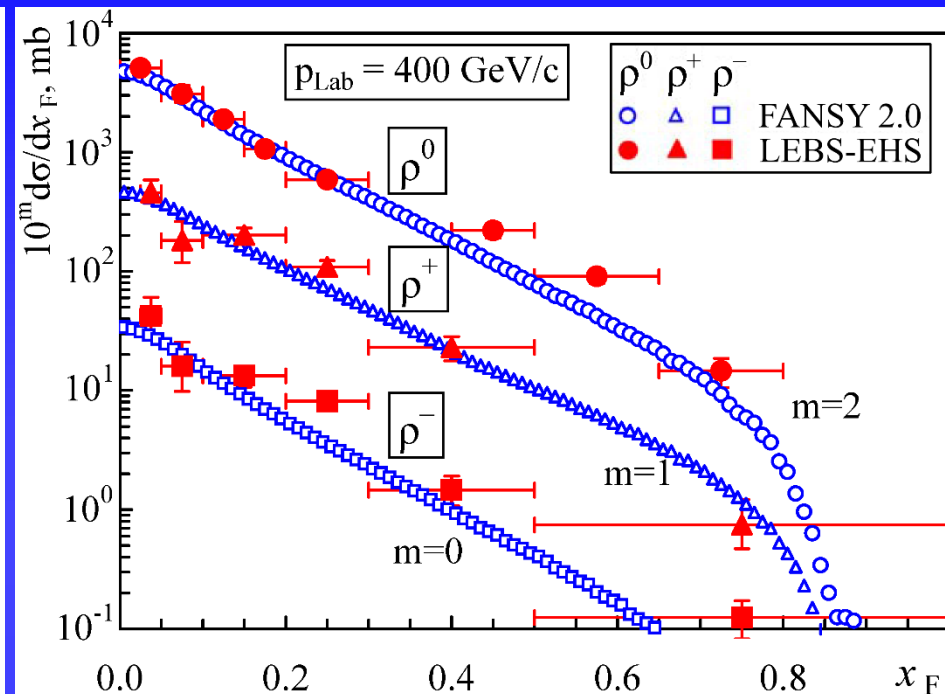
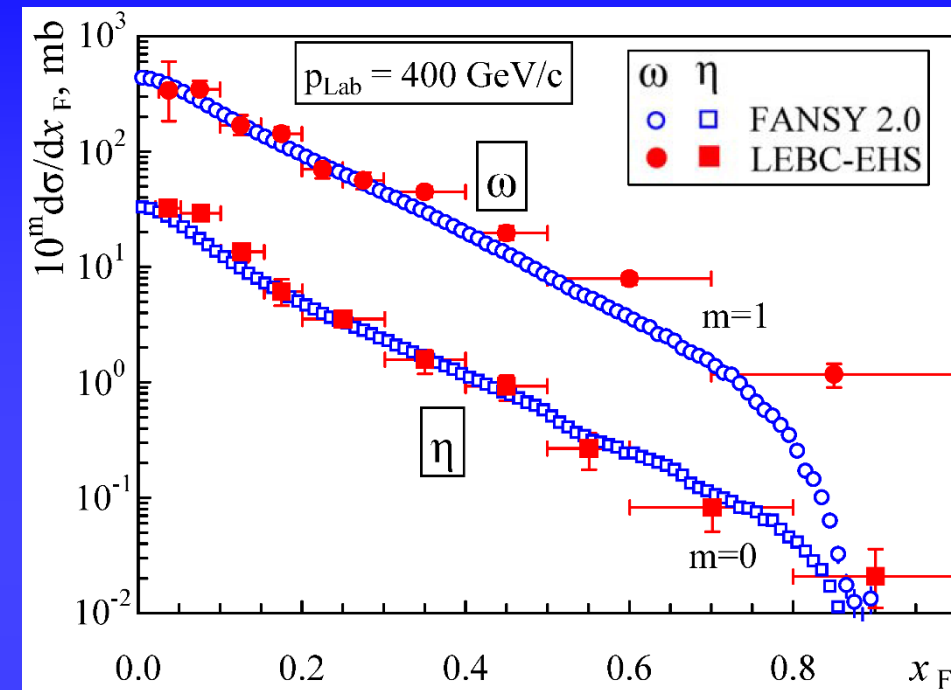
- Два канала:
 - а) генерация частиц на основе традиционной модели кварк-глюонных струн (т.е. *FANSY* QGSJ);
 - б) компланарная генерация частиц (CPG) (вероятность CPG растет с энергией) в мягких взаимодействиях
- Модели *FANSY* QGSJ и CPG, в основном,
- различны по азимутальным свойствам
 - близки по продольным характеристикам (x_F , x_{Lab})

CPG = coplanar particle generation

$d^2\sigma/dydp_t$ distributions of ω & ϕ mesons



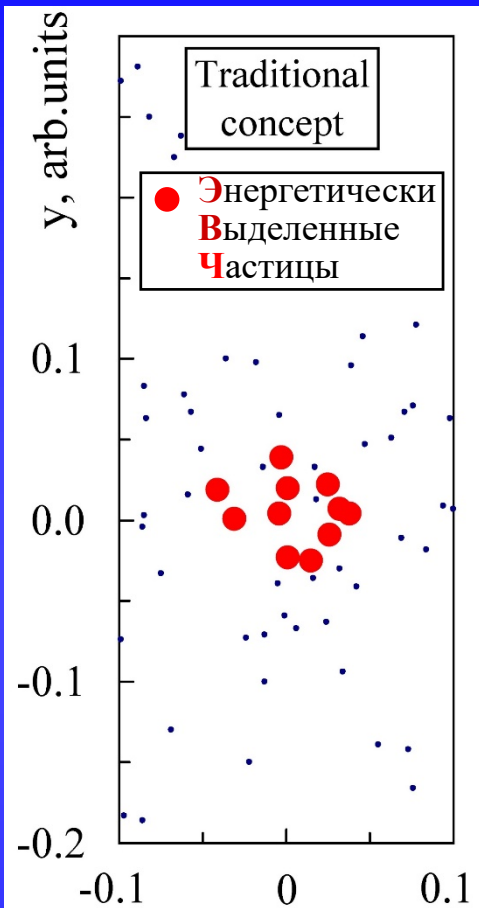
1. Модель воспроизводит генерацию основных резонансов (ρ , ω , ϕ и др.) при $\sqrt{s} = 7$ TeV
2. Важно учитывать генерацию резонансов, т.к. в результате их распада
 - а) уменьшается степень первичной компланарности;
 - б) появляются дополнительные η - ϕ корреляции

$d\sigma/dx_F$ сечения η и ω мезонов

Экспериментальные и расчетные спектры η , ω , $\rho^{\pm,0}$ мезонов
согласуются при $p_{\text{Lab}} = 400 \text{ GeV/c}$

Моделирование компланарной генерации частиц

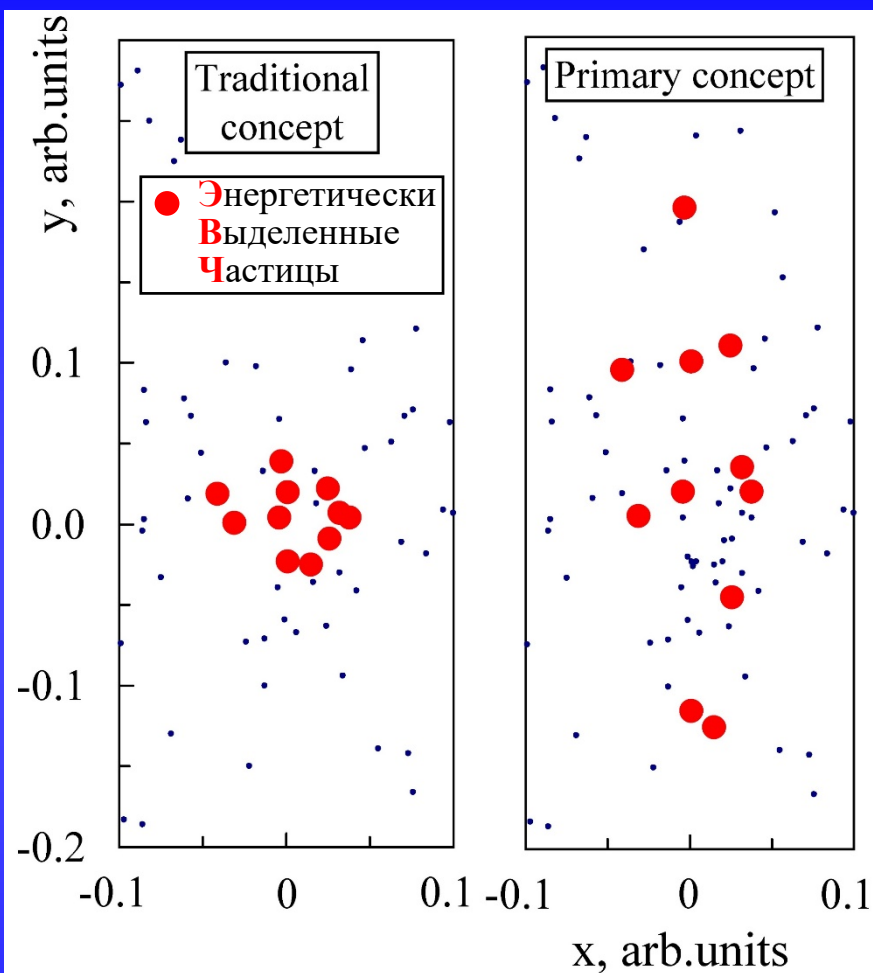
Вид сверху (по направлению пучка) на треки частиц на мишенной плоскости



Традиционная
концепция:
осевая симметрия
ЭВЧ

В результате флуктуаций доля компланарных
событий в традиционных моделях
 $F_{\text{copl}}^{\text{sim}}(\lambda_4 \geq 0.8) \approx 0.05$

Вид сверху (по направлению пучка) на треки частиц на мишенной плоскости

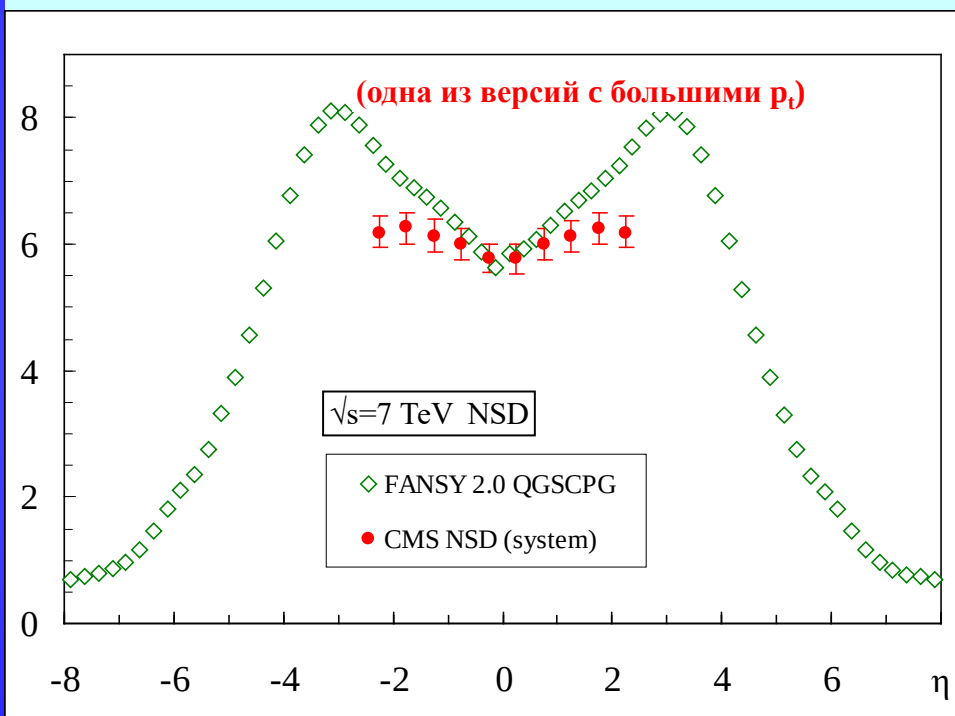


**Традиционная
концепция:
осевая симметрия
ЭВЧ**

**Первоначальная
концепция:
большие p_t в
плоскости
компланарности →
асимметрия ЭВЧ**

Проблема моделирования

- Компланарность в КЛ связана с частицами с максимальными энергиями и $x_F \gtrsim 0.05 - 0.1$
- Рост p_t подавляет распределения адронов $d\sigma/dy$ и $d\sigma/d\eta$ при $|\eta| \gg 1$ и создаёт максимумы при $2 \lesssim |\eta| \lesssim 5 - 6$

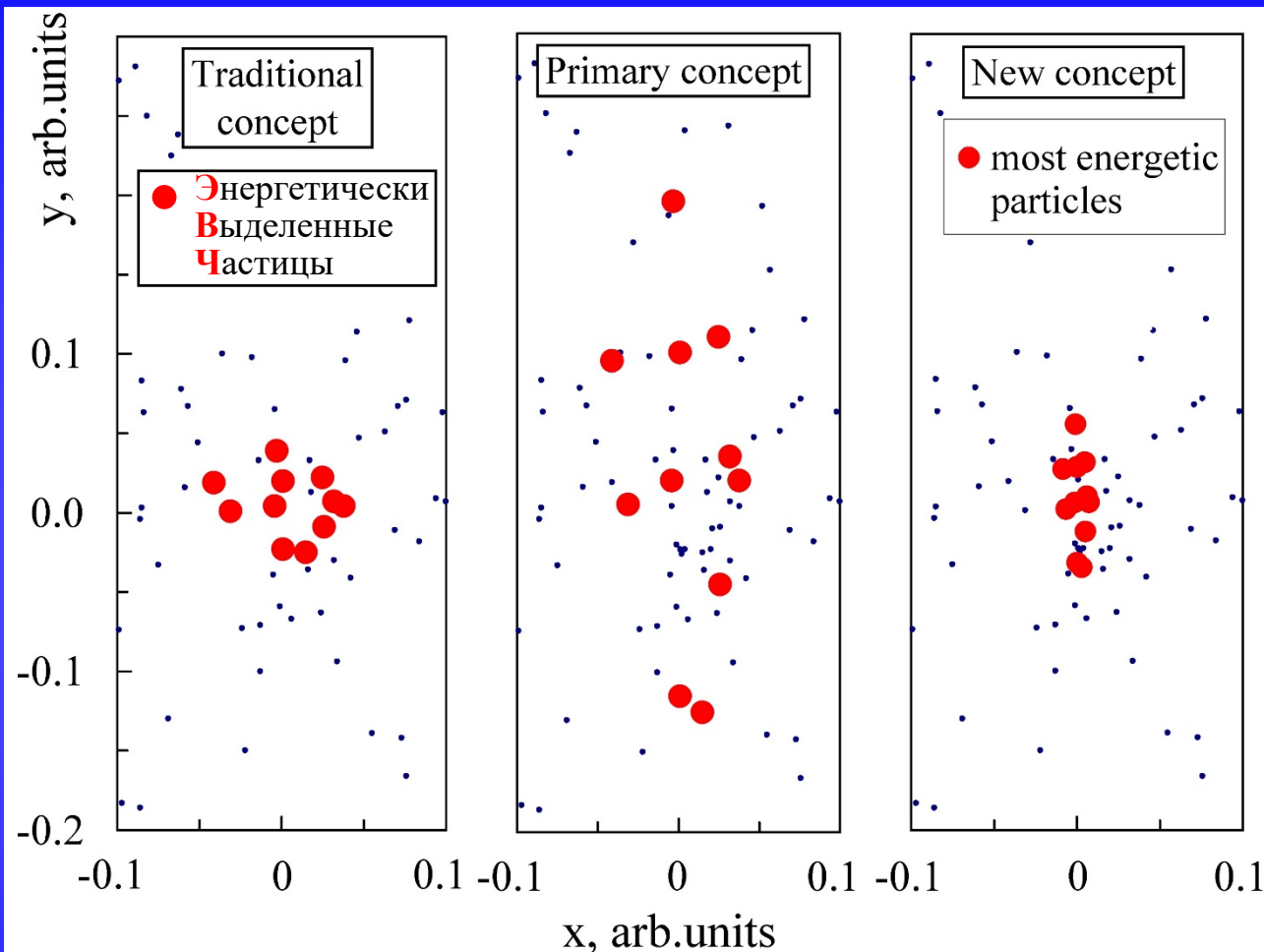


Первые версии **FANSY** CPG:
попытки компенсации максимумов
с помощью искусственного
создания соответствующего
провала в нужной области $|\eta|$ в
традиционных взаимодействиях **не**
помогают

Согласование данных ЛНС и компланарности в КЛ в случае объяснения компланарности большими p_t энергичных частиц очень(!) маловероятно

Можно ли разрешить это противоречие ?

Вид сверху на треки частиц на мишенной плоскости



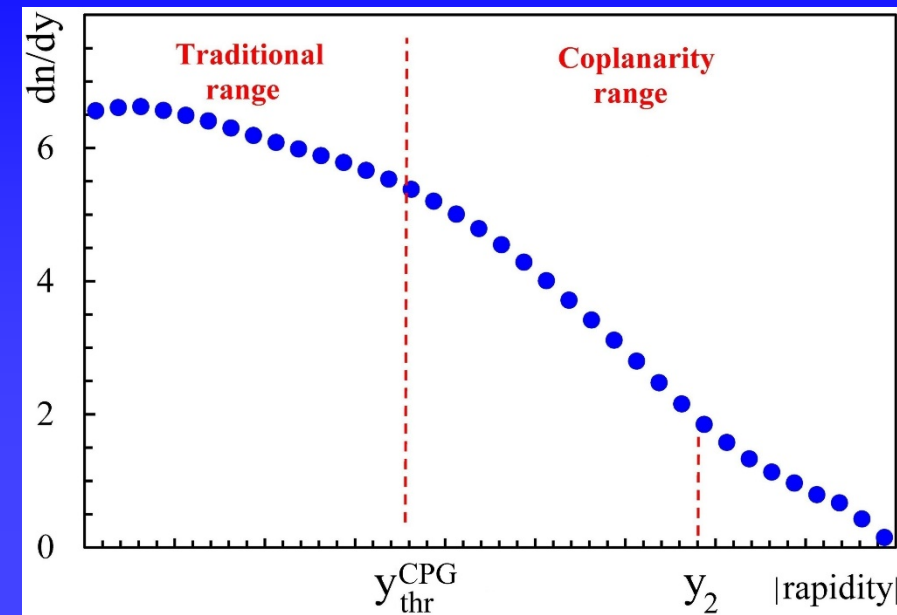
Необходим выход за
рамки концепции
связи
компланарности с
ростом p_t !

Традиционная
концепция:
осевая симметрия
ЭВЧ

Начальная концепция:
большие компоненты
 p_t в плоскости
компланарности
→ асимметрия ЭВЧ

Новая концепция:
малые компоненты p_t ,
перпендикулярные
плоскости компланарности
(при $\langle p_t \rangle \approx \text{const}$)
→ асимметрия ЭВЧ

CPG simulation



- Традиционная генерация частиц при $|y| < y_{thr}^{CPG}$
- Компланарная генерация частиц при $|y| > y_{thr}^{CPG}$
- y_2 = rapidity of 2nd (in energy) hadron
- $y_{thr}^{CPG} = y_2 - \Delta y^{CPG}$
- $\Delta y^{CPG} = 3.7$ (free parameter)

- Плоскость компланарности определяется импульсами взаимодействующих протонов и поперечными импульсами наиболее энергичных адронов после взаимодействия
- Поперечные импульсы адронов p_t разворачиваются специальным алгоритмом к плоскости компланарности при $|y| > y_{thr}^{CPG}$
- Распределение направлений p_t около плоскости компланарности зависит от rapidity и подчиняется распределению Гаусса:
 $\sigma_{\phi}^{CPG}(y) = \sigma_{\phi 0}^{CPG} \cdot (|y_2|/|y|)$, где $\sigma_{\phi 0}^{CPG} = 0.1$ радиан для y_2
- Компланарность уменьшается с **уменьшением** рапидити

Т.о., при сверхвысоких энергиях ($\sqrt{s} \gtrsim 5 - 7$ ТэВ) экспериментально наблюдаются два эффекта:

- 1) «ridge»-эффект на LHC (область умеренных значений $\eta \lesssim 2.4$)
- 2) компланарность в космических лучах (область больших $x_F \gtrsim 0.05 - 0.10$)

Есть ли связь между «ridge»-эффектом и компланарностью ?

Может ли модель, ориентированная на большие x_F , объяснить «ridge»-эффект в области умеренных η ?

$$B_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_1 N_2} \frac{d^2 N^{\text{mixed}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

Background
distribution

$$S_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{\text{signal}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

Signal
distribution

Число пар частиц в **одном и том же взаимодействии** с множественностью N
 $N_{\text{pair}} = N(N-1)/2 !$

Signal-to-Background ratio distribution

$$R(\Delta\eta, \Delta\phi) = \left\langle (\langle N \rangle - 1) \left(\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\phi)} - 1 \right) \right\rangle$$

N = число рассмотренных заряженных адронов в одном взаимодействии

N_1 & N_2 = число рассмотренных заряженных адронов в 1-м и 2-м взаимодействиях

$\langle N \rangle$ = множественность рассмотренных заряженных адронов



Results



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

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

Intermediate p_T : 1-3 GeV/c

MinBias

high multiplicity ($N > 110$)

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

(d) $N > 110$, $1.0 \text{ GeV/c} < p_T < 3.0 \text{ GeV/c}$

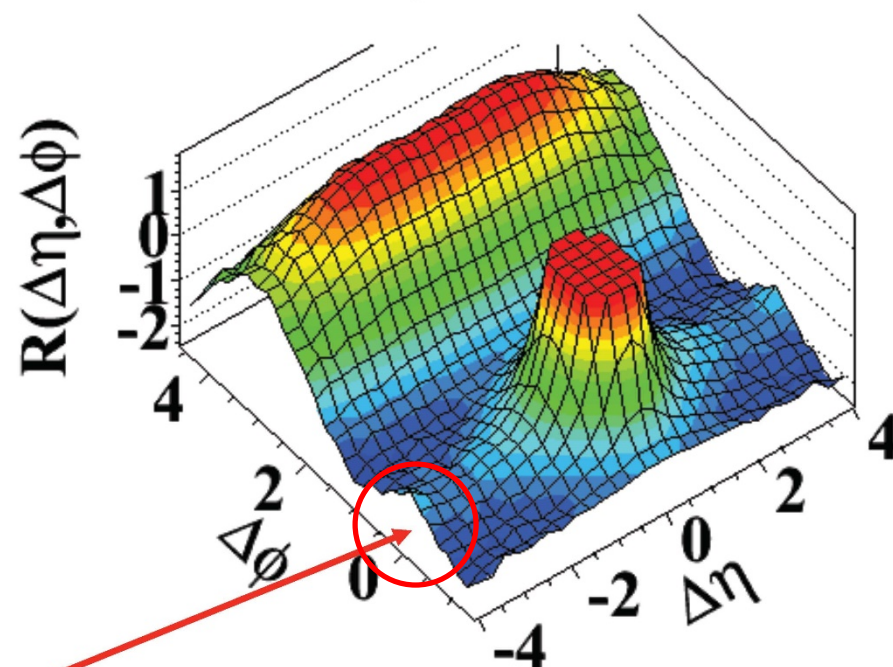
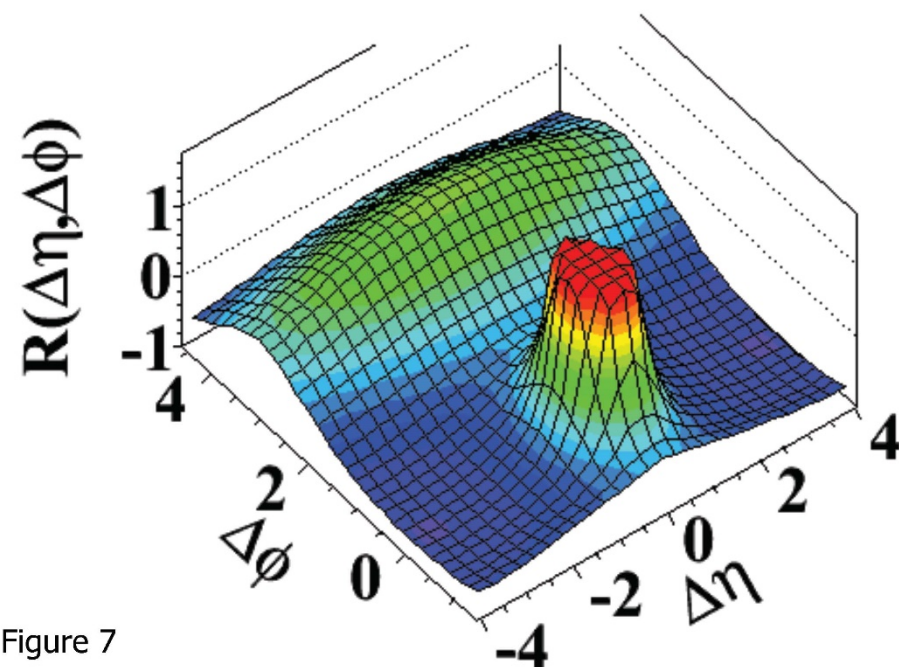
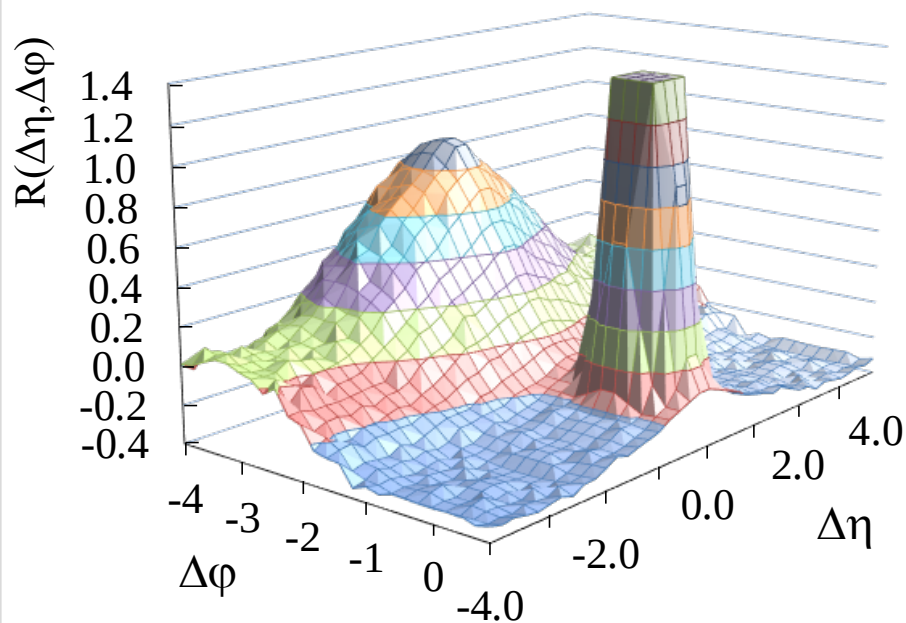


Figure 7

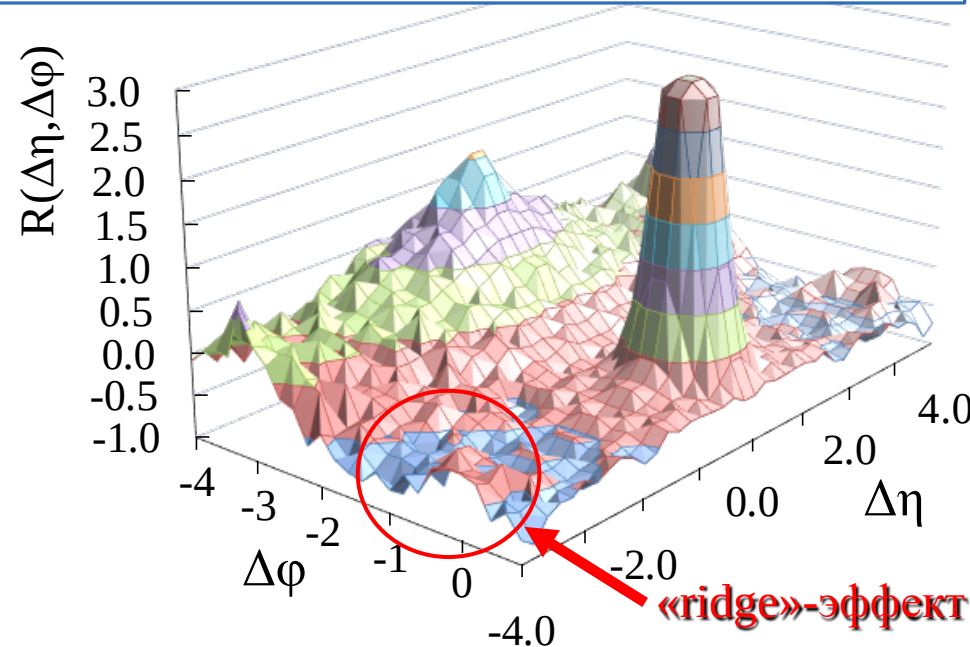
Pronounced structure at large $\Delta\eta$ around $\Delta\phi \sim 0$!

“Ridge” эффект не объясняется известными процессами !

FANSY 2.0 QGSJ signal/background $n_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ($|\Delta\eta| < 4$)



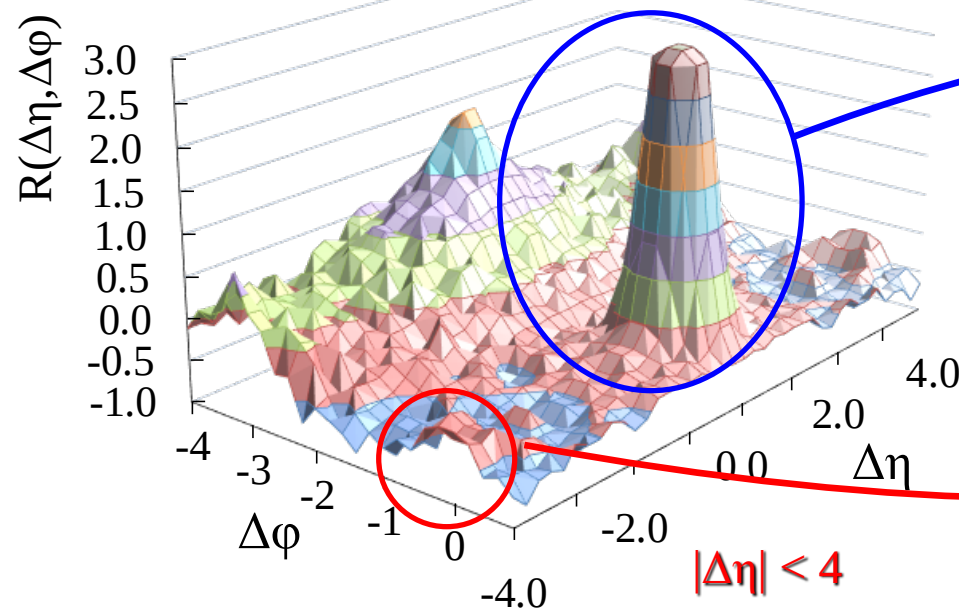
FANSY 2.0 CPG signal/background $n_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ($|\Delta\eta| < 4$)



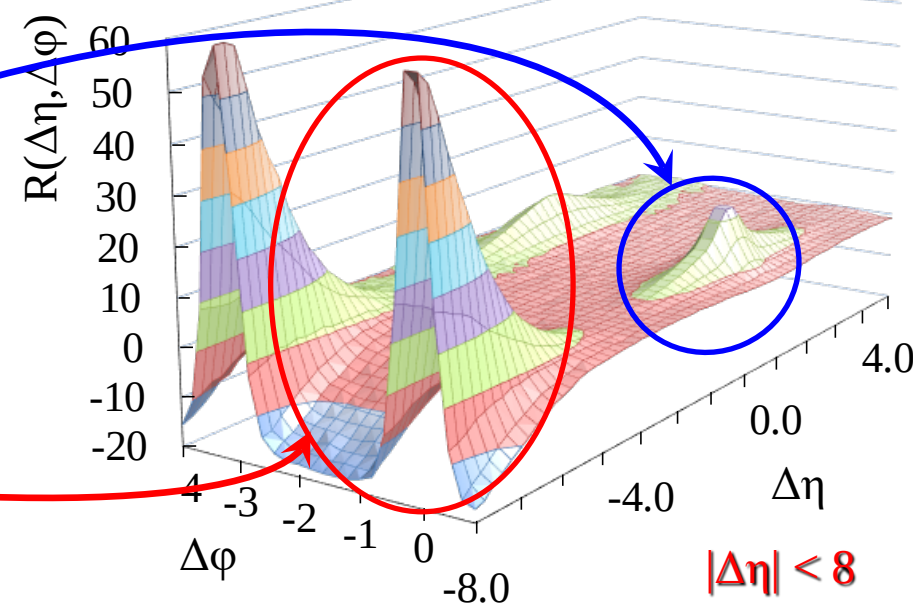
FANSY 2.0 CPG с компланарной генерацией частиц при
 $x_F \gtrsim 0.05-0.10$
 воспроизводит «ridge»-эффект

Что будет при анализе корреляций в более широком диапазоне
 $|\Delta\eta| > 4$?

FANSY 2.0 CPG signal / background $n_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ($|\Delta\eta| < 4$)



FANSY 2.0 CPG signal / background $n_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ($|\Delta\eta| < 8$)



1. $\Delta\eta - \Delta\phi$ корреляции быстро растут при увеличении $|\Delta\eta|$!
2. Центральный пик при $|\Delta\eta| = |\Delta\phi| = 0$, доминировавший при анализе области $|\Delta\eta| < 4$, рассмотренной Коллаборацией CMS, оказался гораздо ниже максимумов в области $|\Delta\eta| \rightarrow 8$ и $|\Delta\phi| \sim 0$ и π

Заключение

- Модель *FANSY 2.0* для адрон-адронных взаимодействий включает версии:
 - *QGSJ* (традиционная)
 - *CPG* (с компланарной генерацией частиц)
- Согласование данных LHC и компланарности с существенно *большими* p_t энергичных частиц КГС в плоскости компланарности маловероятно
- Согласие данных LHC и гипотезы существования компланарности возможно при переходе к концепции *уменьшения* компоненты поперечных импульсов, перпендикулярной к плоскости компланарности
- В рамках *FANSY 2.0 CPG* «ridge»-эффект, обнаруженный CMS Collaboration на LHC, связан с компланарной генерацией наиболее энергичных частиц
- Нужен анализ корреляций в более широких диапазонах $\Delta\eta = |\eta_1 - \eta_2| \gtrsim 4$

Спасибо!

