

# Физика столкновений релятивистских ядер

## Двух-частичные корреляции и Ридж-эффект

Лекция 8

В.Л. Коротких

2012 г.

# Наблюдаемые

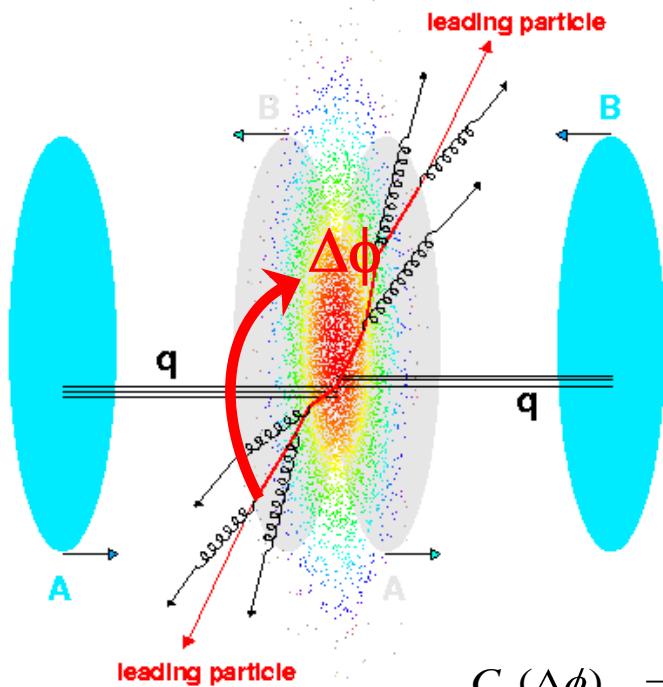
Измеряемые характеристики в ядро-ядерных столкновениях, используемые для исследования новой материи, образованной в ядро-ядерных столкновениях:

- Зависимость множественности от энергии  $\sqrt{s}$  и поперечного импульса  $p_T$
- Энергия, оставляемая на образование новой материи
- Зависимость от центральности ядро-ядерного столкновения
- Зависимость от «быстроты» рожденных частиц
- Подавление выхода частиц при больших  $p_T$  и погашение струй
- Эллиптический поток
  
- **Двух-частичные корреляции. Ридж- эффект**
- «Плавление» резонансов
- Подавление рождения чармониев
- Усиление выхода странных частиц
- Размеры системы адронов после вымораживания

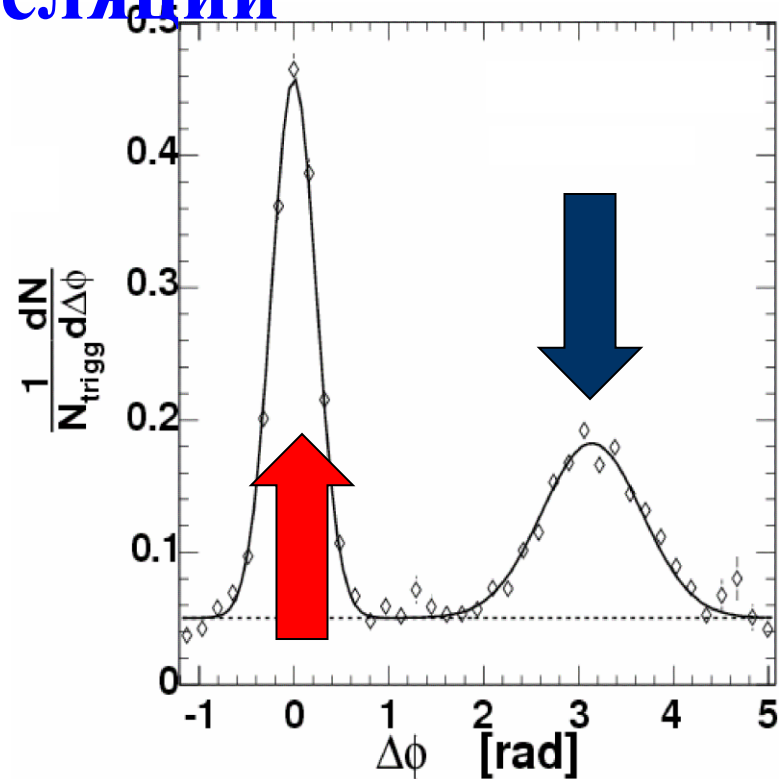
# Ядро-ядерные столкновения

**Подавление и искажение «обратного» пика в  
событиях “back to back”**

# Двухчастичные $\Delta\phi$ -корреляции



S.S. Adler et al., *Phys.Rev. D74*, 072202 (2006).

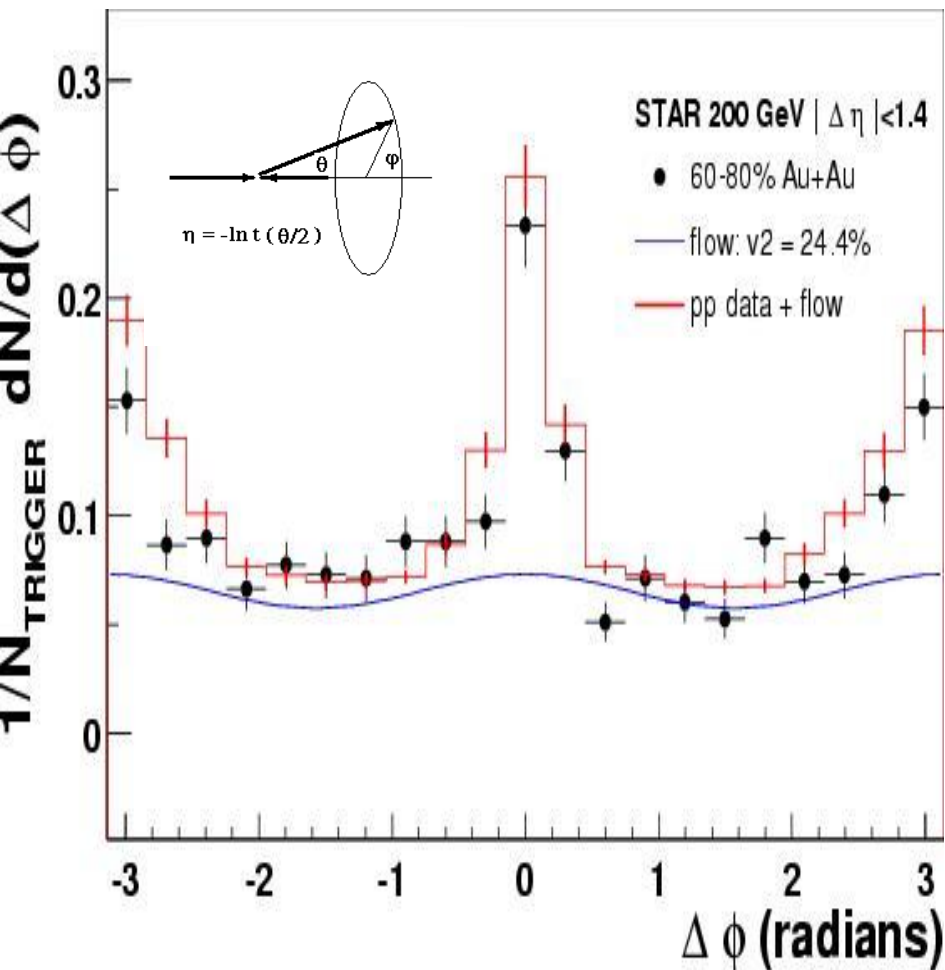


$$C_2(\Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{1}{\varepsilon} \int d\Delta\eta N(\Delta\phi, \Delta\eta)$$

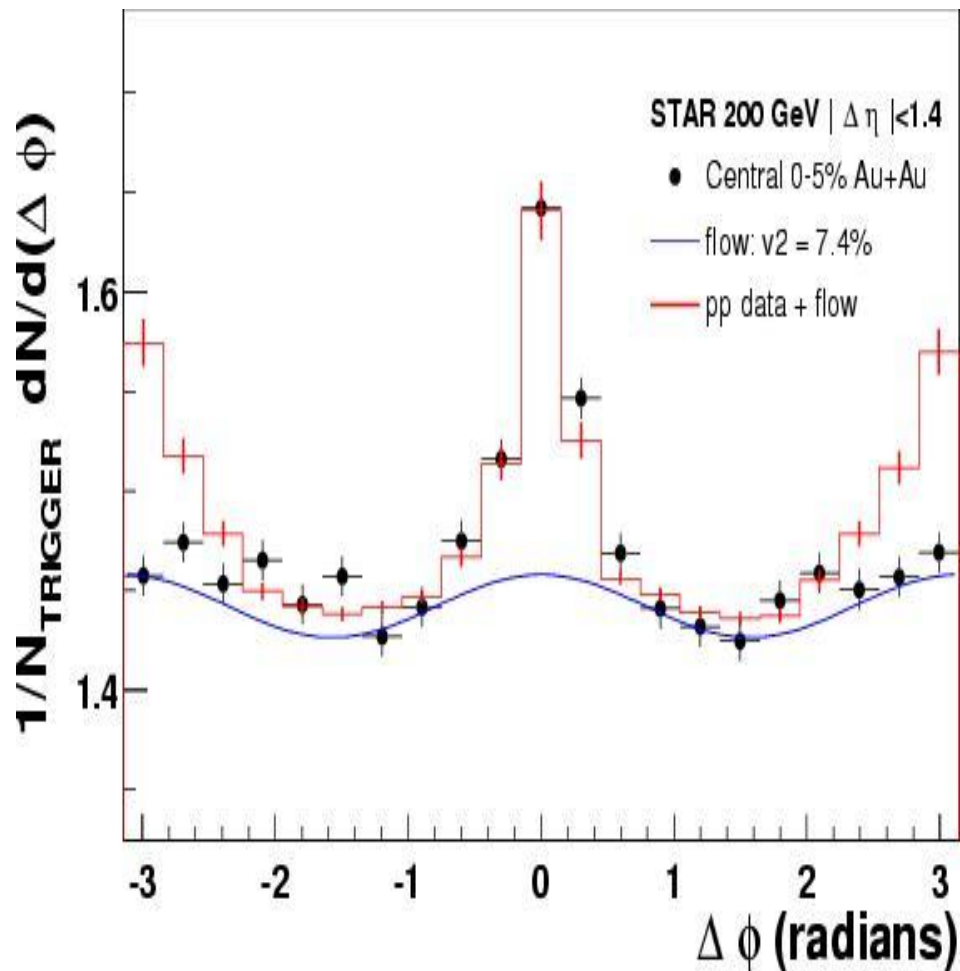
- Выбирается частица с большим  $p_T$  – триггерная частица и рассматриваются пары «триггерная частица + ассоциированная частица»
- Ожидается наблюдение корреляций при
  - $\Delta\phi \approx 0$  – пик в области малых относительных азимутальных углов – соответствует струе, в направлении лидирующей частицы
  - $\Delta\phi \approx \pi$  - пик в области противоположных относительных азимутальных углов – соответствует струе, направленной в сторону от лидирующей частицы

# Азимутальная корреляция адронов при выборе событий, содержащих лидирующую частицу

Периферические – 2 пика back-to-back

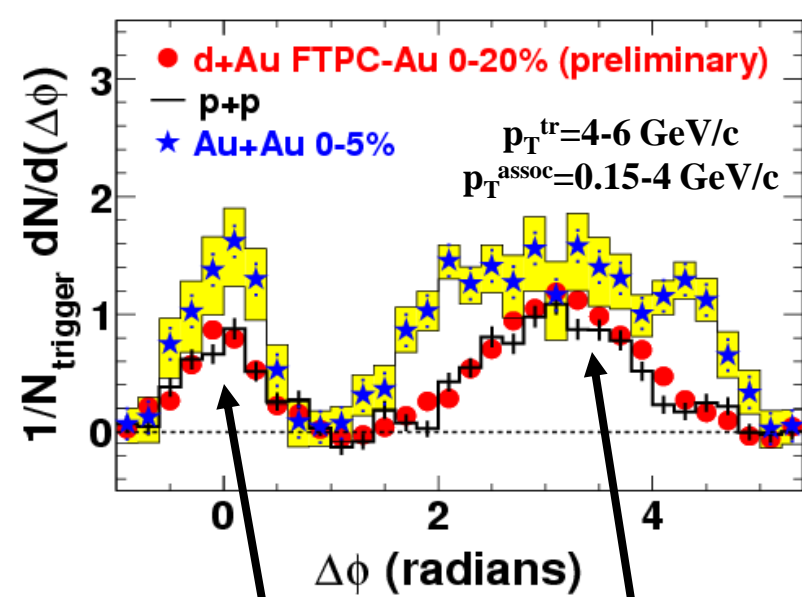


Центральные – нет обратного пика

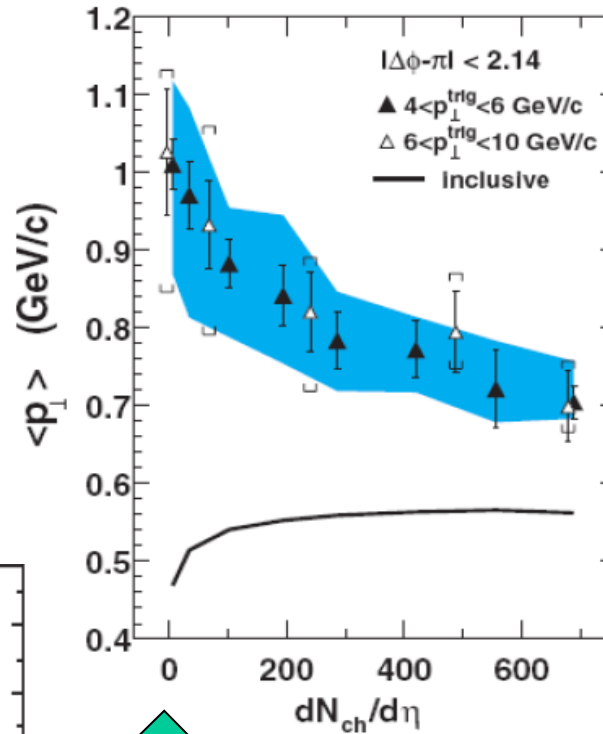
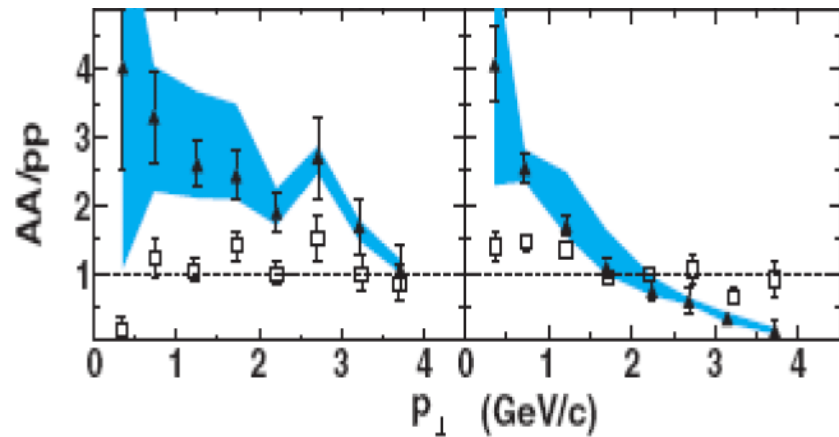


Точки – данные Au+Au, гистограмма – данные p+p, кривая – оценка фона в A-A

# «Отклик» среды



«Прямой» пик      «Обратный» пик



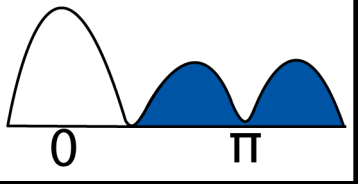
*J. Adams et al., Phys.Rev.Lett. 95, 152301 (2005).*

С ростом центральности среднее  $\langle p_T \rangle$  быстро уменьшается для ассоциированных адронов, а для инклюзивных - слабо растет.

- Наблюдается значительная модификация струй при больших  $\Delta\phi$  и потери энергии приводят к существенному росту множественности мягких ассоциированных адронов.

*J. Adams et al., Phys.Rev.Lett. 95, 152301 (2005).*

Для центральных столкновений спектр более жесткий для прямого и более мягкий для обратного пика в AA-взаимодействиях по сравнению с pp.



# Away-side Contributions

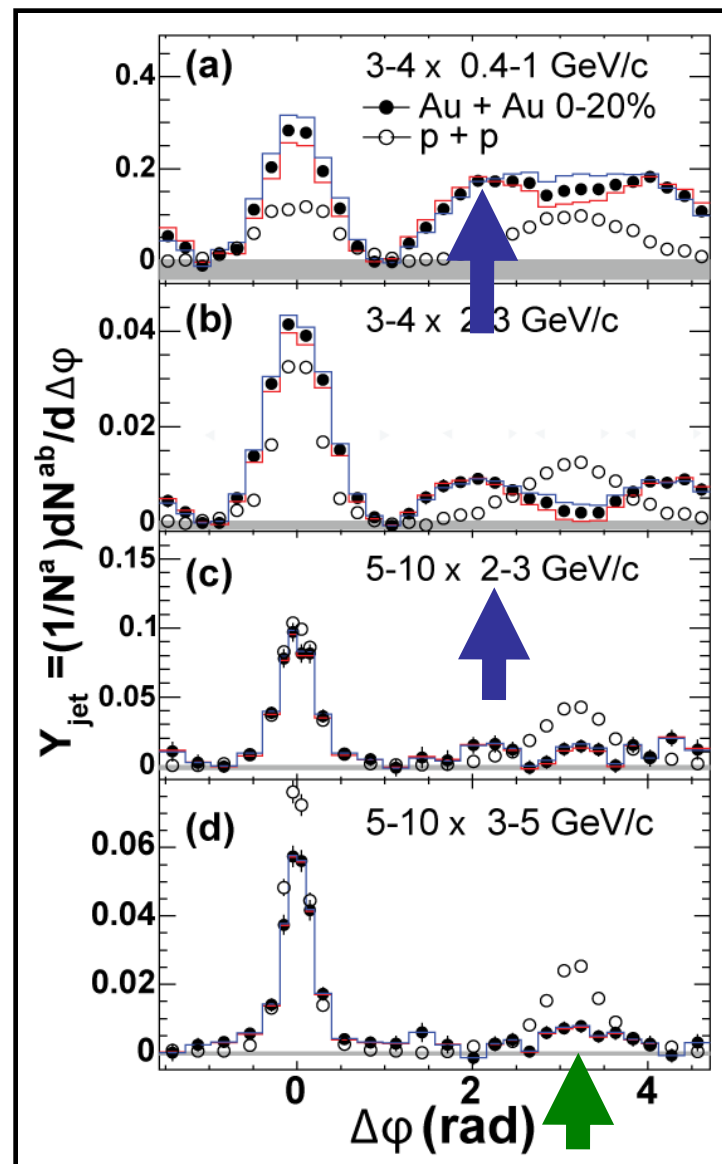
## Away-side Head:

- Suppressed relative to p-p baseline
- Dominated by shoulder at low  $p_T$

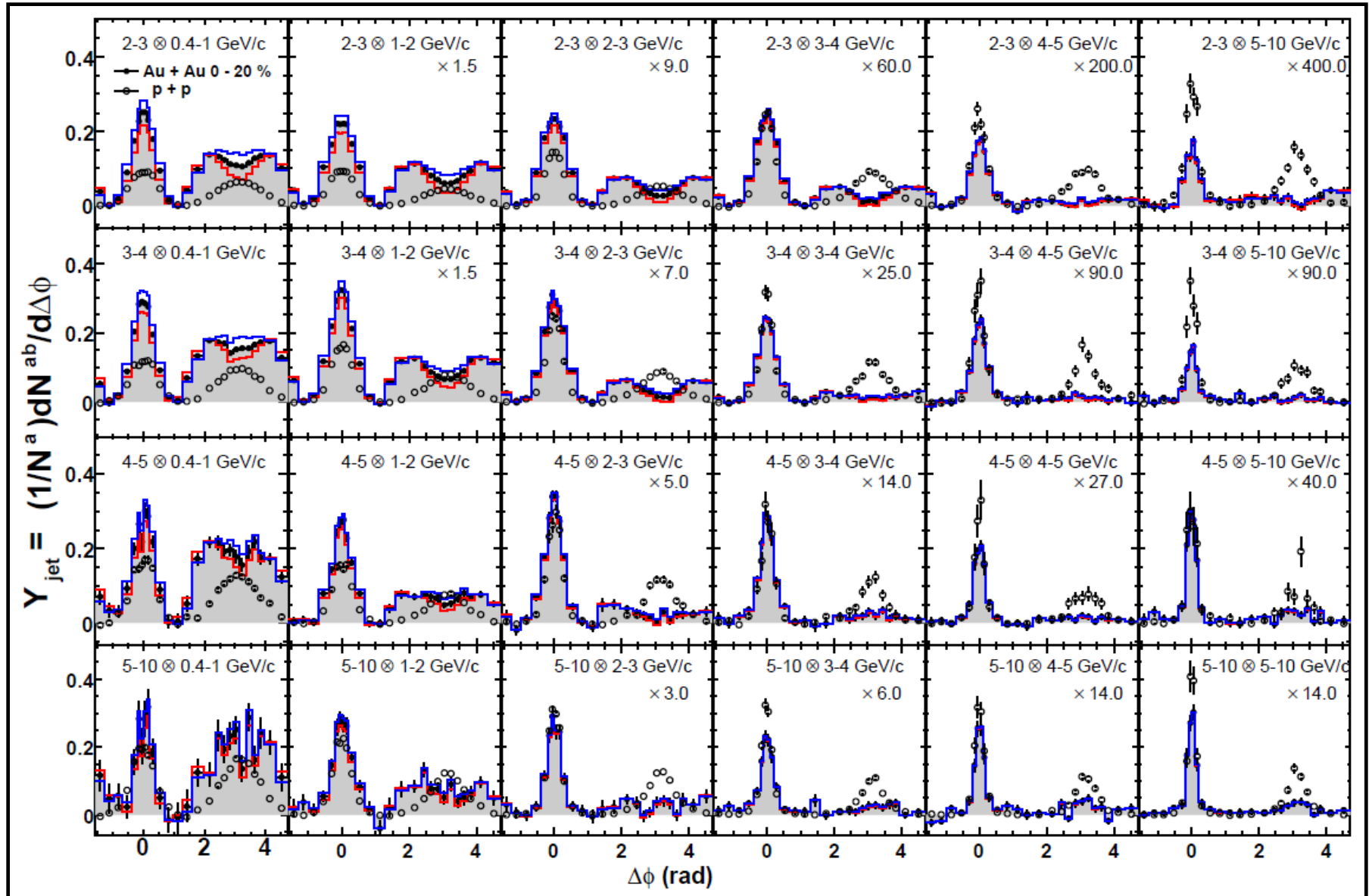
## Away-side Shoulder:

- Strongest at lower  $p_T$  ( $< 4$  GeV/c)
- $\Delta\phi$  position largely independent of  $p_T$  ( $\sim \pi \pm 1.1$ )

increasing  $p_T$

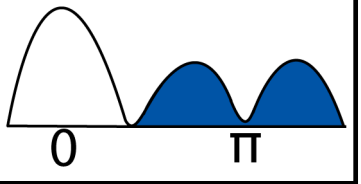


# Cent 0-20%, AuAu, 200 GeV



for PHENIX



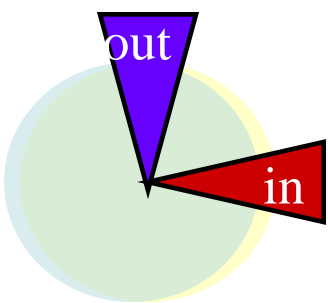


# Away-side by Geometry

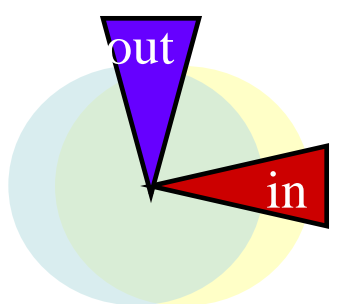
Зависимость эффекта от угла вылета лидирующей частицы по отношению к плоскости реакции

**in-plane**

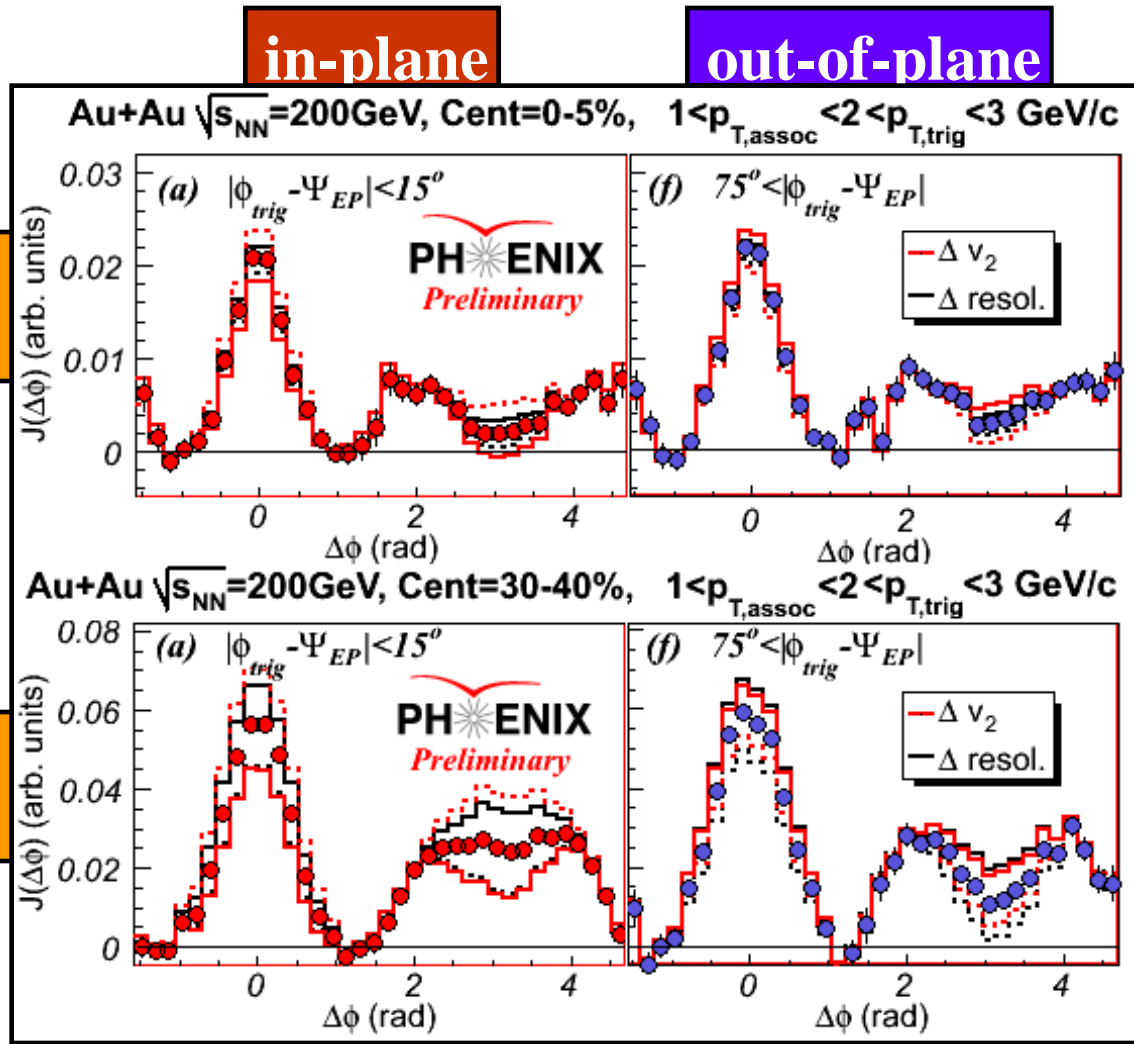
**out-of-plane**



**Cent 0-5%**



**Cent 30-40%**



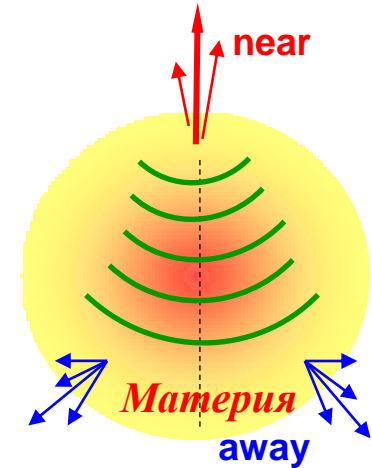
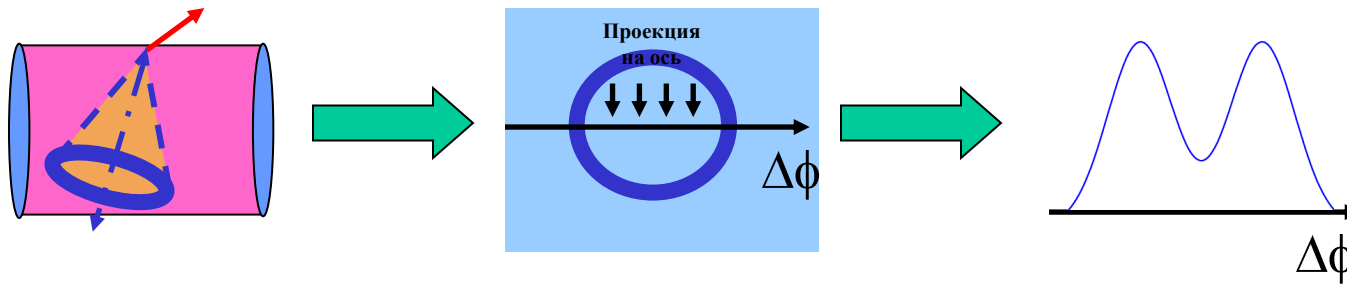
# «Отклик» среды: модели

1) Сценарий ударной сверхзвуковой волны: при достаточно быстрой термализации (потерях энергии) диссипация энергии в коллективные моды возбуждения среды может привести к возникновению ударных волн Маха.

*W. Scheid et al., Phys.Rev.Lett. 34, 741 (1974); J. Hofmann et al., Phys.Rev.Lett. 36, 88 (1976); T. Renk, J. Ruppert, Phys.Rev. C73, 011901 (2006); etc.*

2) Сценарий черенковского излучения глюонов (ЧИГ): Наблюдаемая структура обратного пика – одномерная проекция конуса черенковского глюонного излучения.

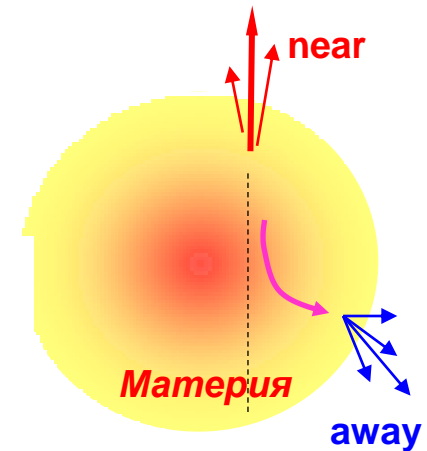
*I.M. Dremin, Nucl.Phys. A767, 233 (2006), A785, 369 (2007); A. Majumder, X.N. Wang, Phys.Rev. C73, 172302 (2006); etc.*



Ударная волна, ЧИГ

3) Сценарий отклоняемой струи: при движении внутри объема материи струя, соответствующая обратному пику, может испытывать отклонения (в каждом событии на разный угол).

*I.Vitev, Phys.Lett. B630, 78 (2005); etc.*



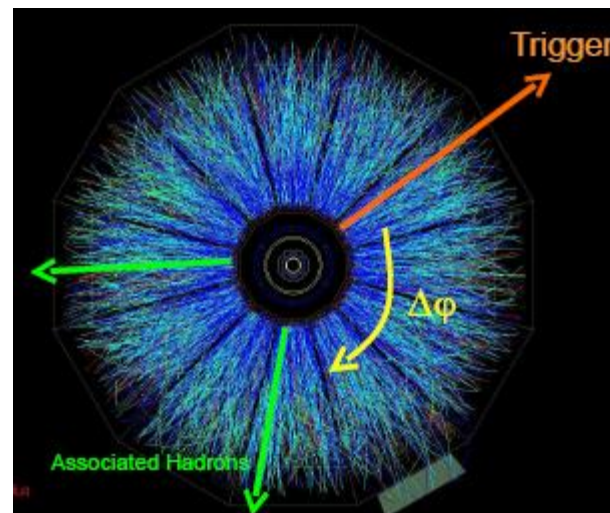
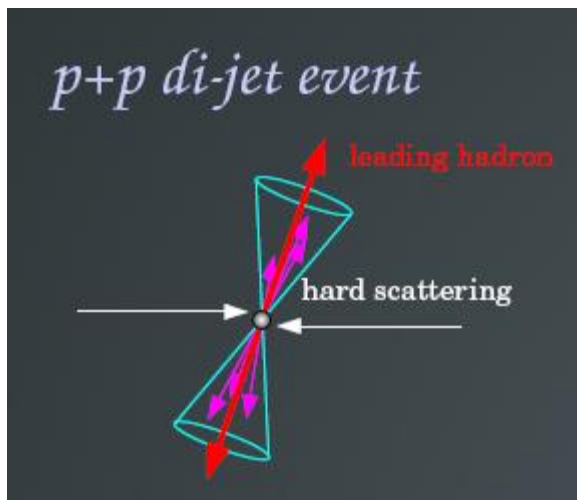
Отклоненные струи

В настоящее время несколько динамических сценариев используются для описания отклика КХД-материи на распространение в ней жестких струй. Необходимы дополнительные экспериментальные результаты и развитие теории для более однозначной интерпретации.



# **Ридж- эффект в ядро-ядерных столкновениях**

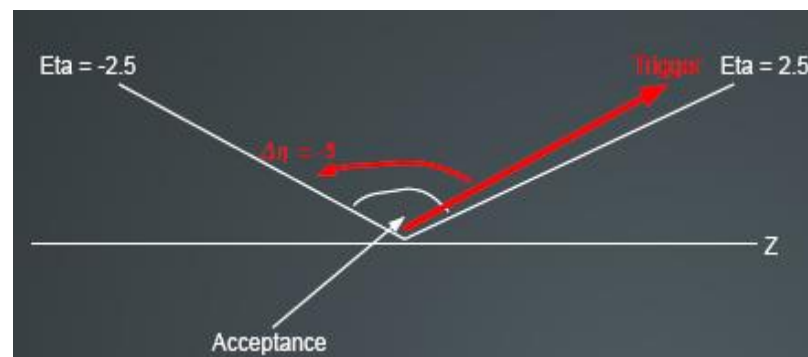
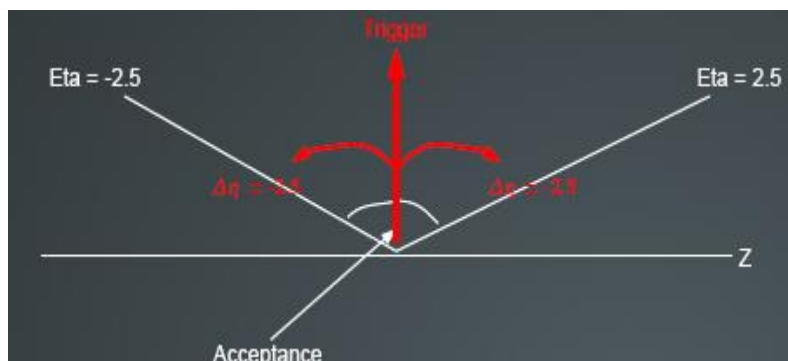
# Trigger and Associated particles



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

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

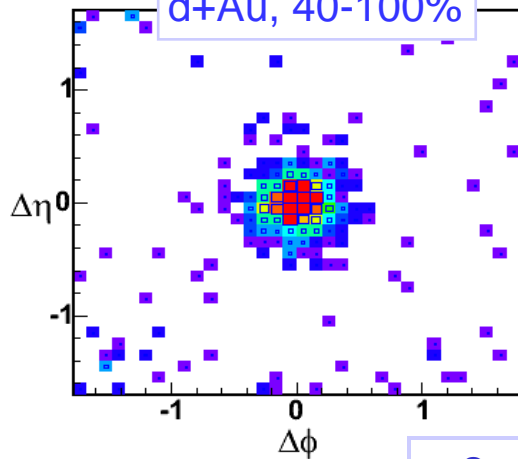
Исследуются “minimum bias” события и события с высокой множественностью  $N > 90$  при условиях  $0.1 < p_T < 1$ ,  $1 < p_T < 3$ ,  $3 < p_T < 4$  GeV/c,



# Двух-частичные корреляции по быстроте. STAR

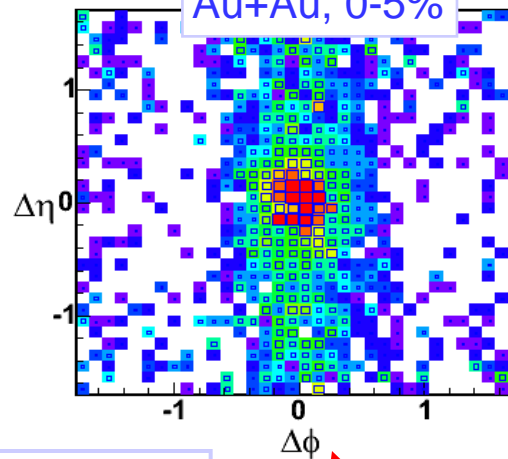
Струя

d+Au, 40-100%



Струя + что-то ещё?

Au+Au, 0-5%



Центральные  
столкновения

$3 < p_T(\text{trig}) < 6 \text{ GeV}$   
 $2 < p_T(\text{assoc}) < p_T(\text{trig})$

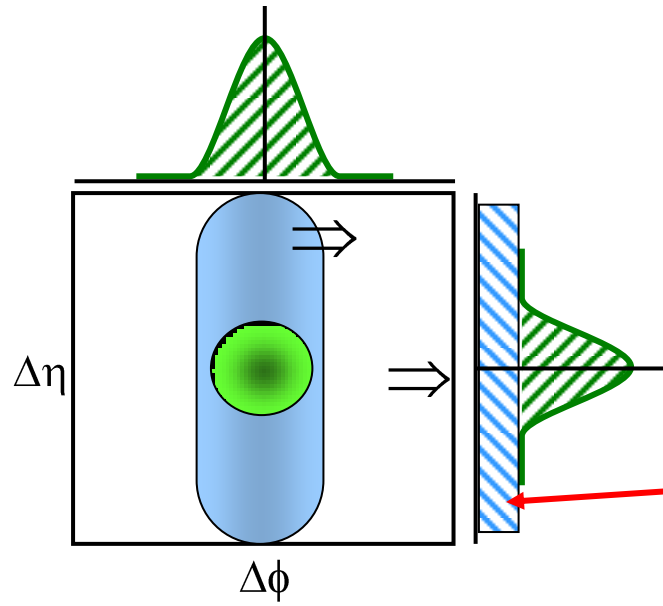
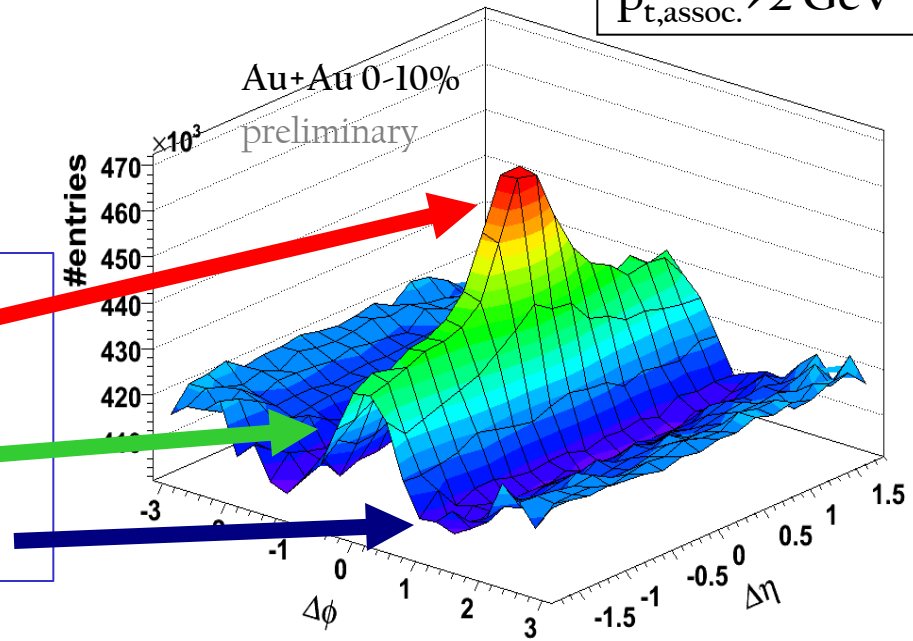
Новый эффект, получивший  
название «Ridge» - хребет

# Картина в $\Delta\eta$ - $\Delta\phi$ представлении

$3 < p_{t,trigger} < 4 \text{ GeV}$   
 $p_{t,assoc.} > 2 \text{ GeV}$

## STAR

- Составляющие
  - Пик от струи
  - Ридж- эффект
  - Фон от  $v_2$



Проекция после вычитания  $v_2$

Подложка от шлейфа

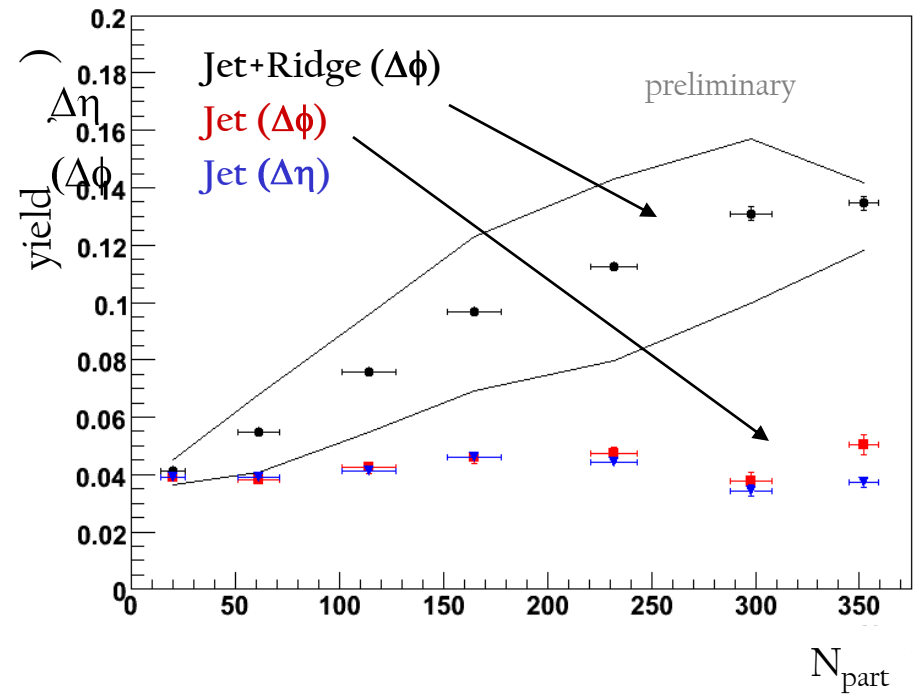
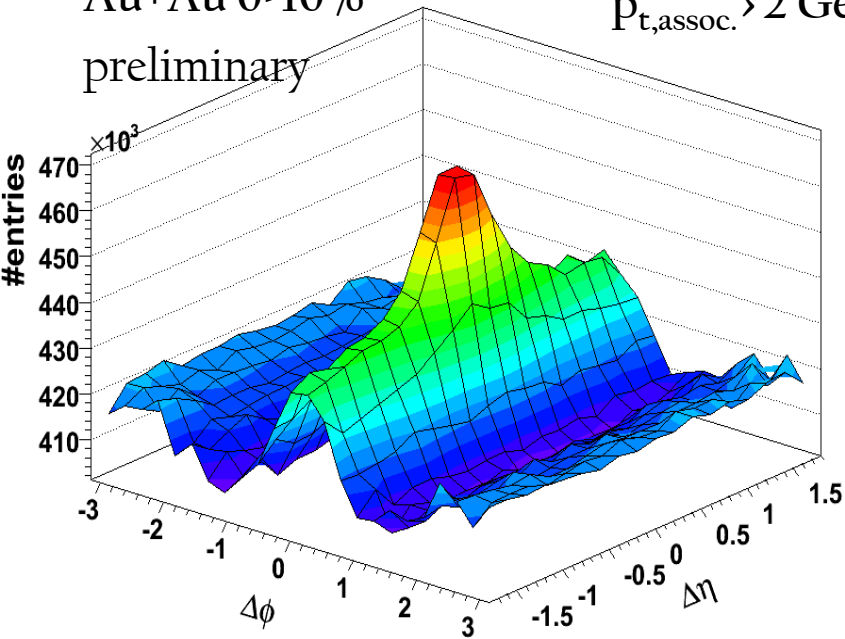
# STAR

$3 < p_{t,trigger} < 4 \text{ GeV}$

$p_{t,assoc.} > 2 \text{ GeV}$

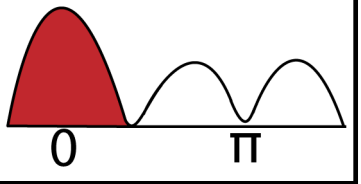
Au+Au 0-10%

preliminary



После вычитания вклада частиц от «риджа» выход «струи» не зависит от центральности.

Вклад частиц от риджа растёт почти линейно



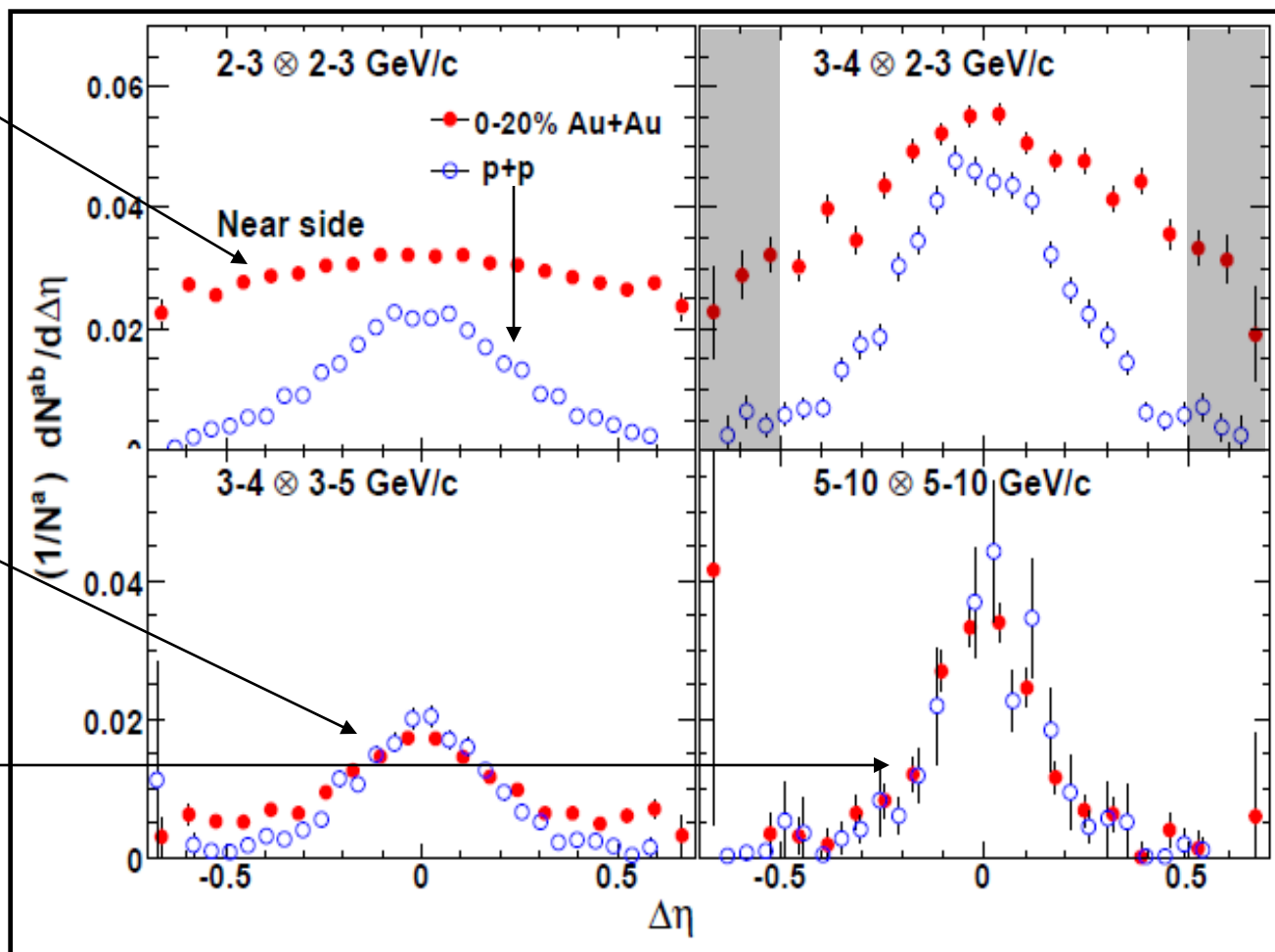
# Ridge в области прямого пика

## Au-Au, 200 GeV

Broad  $\Delta\eta$  near-side enhancement measured in Au+Au collisions at intermediate  $p_T$

- High  $p_T$  near-sides are similar

- Intermediate  $p_T$  p+p near-side is narrower in  $\Delta\eta$  than central collisions



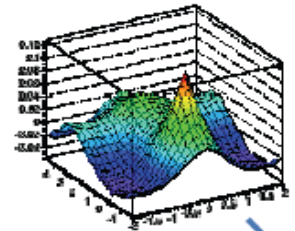


# Свойства Ридж в Au-Au столкновениях

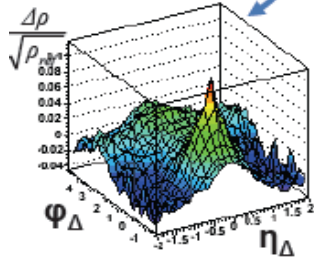
proton-proton

## 200 GeV Au-Au data

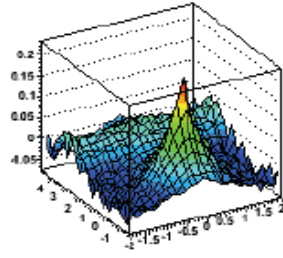
Analyzed 1.2M minbias 200 GeV Au+Au events;  
included all tracks with  $p_t > 0.15$  GeV/c,  $|\eta| < 1$ , full  $\phi$



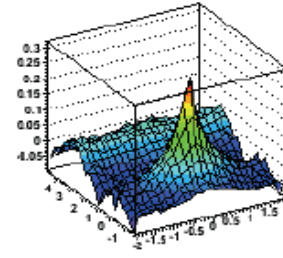
84-93%



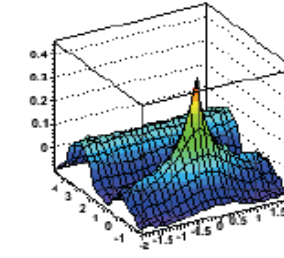
74-84%



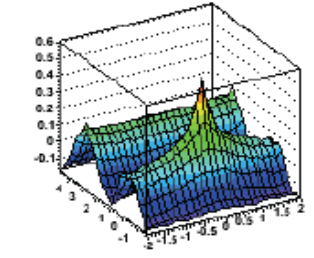
64-74%



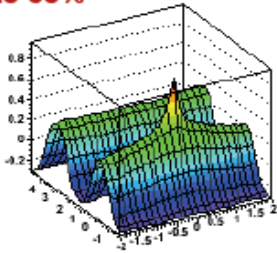
55-64%



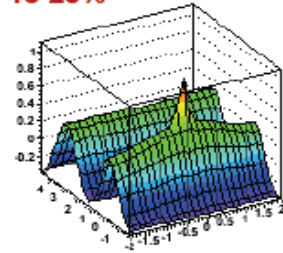
46-55%



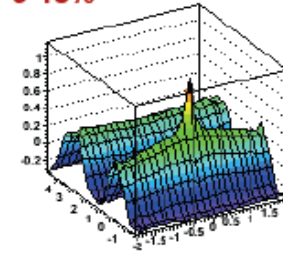
28-38%



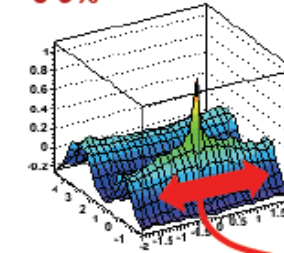
18-28%



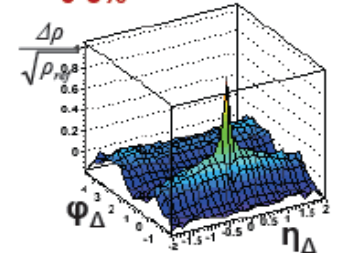
9-18%



5-9%



0-5%

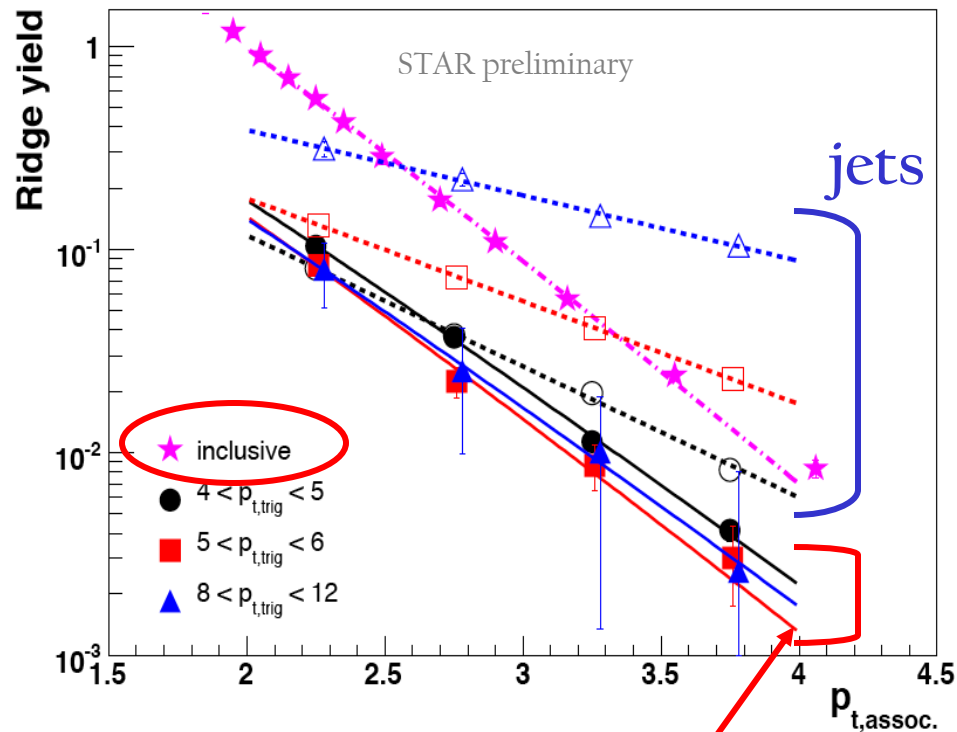
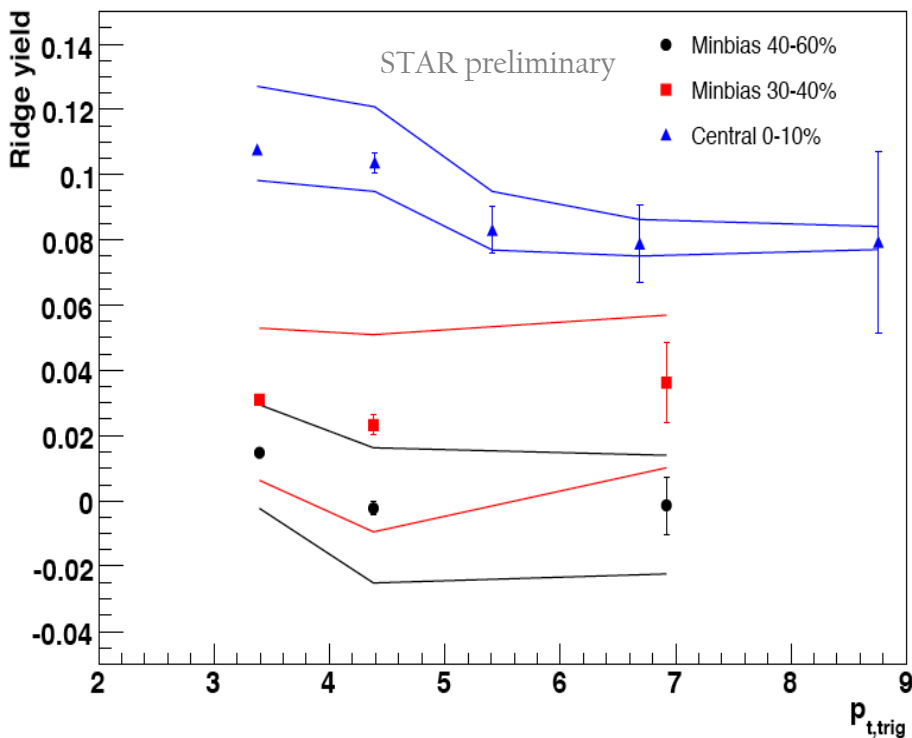


STAR Preliminary

We observe the evolution of several correlation structures including the same-side low  $p_t$  ridge

С увеличением центральности столкновения (с ростом множественности) вклад Ridge эффекта увеличивается

## Спектр частиц внутри шлейфа



Выход частиц от шлейфа не зависит от импульса триггерной частицы. От импульса ассоциированной частицы он зависит иначе, чем выход от пика для струи

Спектр частиц в шлейфе практически совпадает с инклюзивным спектром

Результаты, полученные на RHIC , свидетельствуют, что:

1. В периферических ядро-ядерных столкновениях азимутальная зависимость частиц совпадает с  $p + p$  данными
2. В центральных ядро-ядерных одна из двух струй пропадает (подавлены back-to-back струи)

*Это связано с поглощением партона в плотной новой среде в то время, как другой партон вылетает с периферии ядра мимо этой среды, что является важным доказательством образования плотной среды и ее влиянием на коррелированные распределения частиц.*



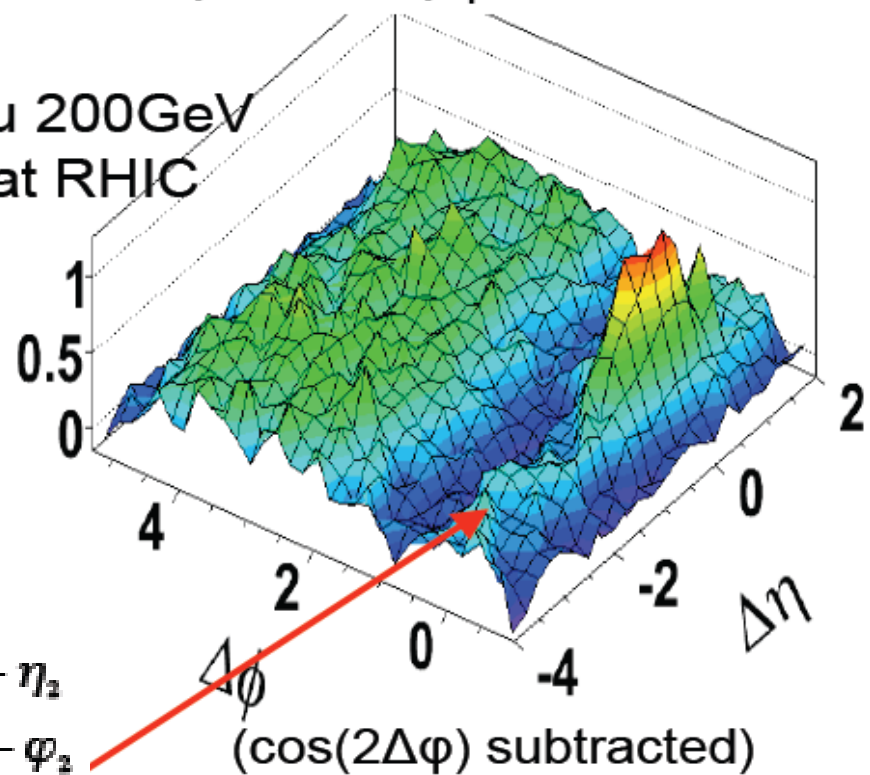
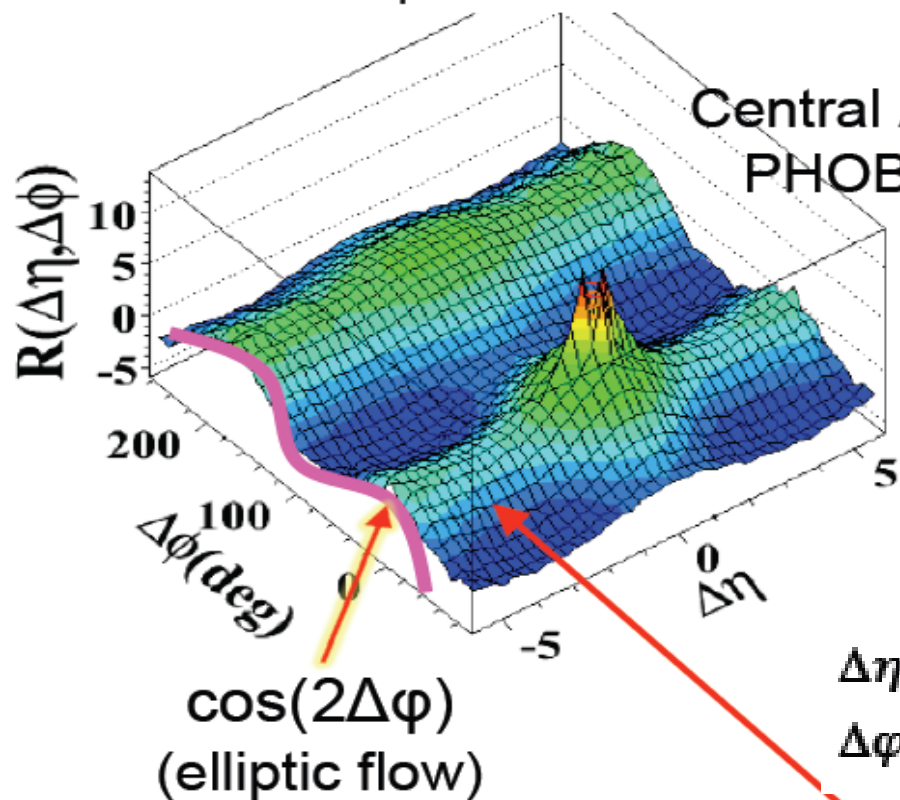
# **Ридж- эффект в $pp$ столкновениях (новый неожиданный эффект на LHC)**



# Correlations in Heavy Ion Collisions at RHIC

$p_T$  inclusive

one particle  $p_T > 2.5 \text{ GeV}/c$



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

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

Long-range “Ridge”-like structure in  $\Delta\eta$



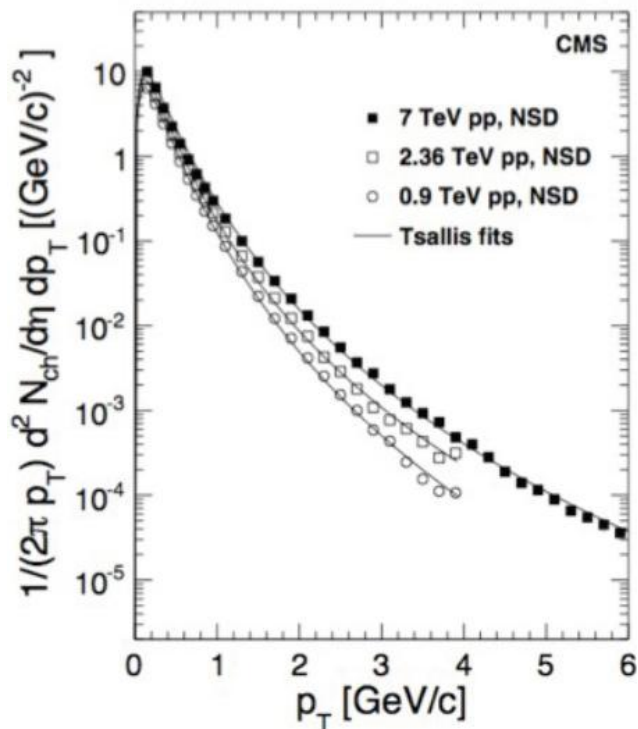
# **Множественность частиц в pp**



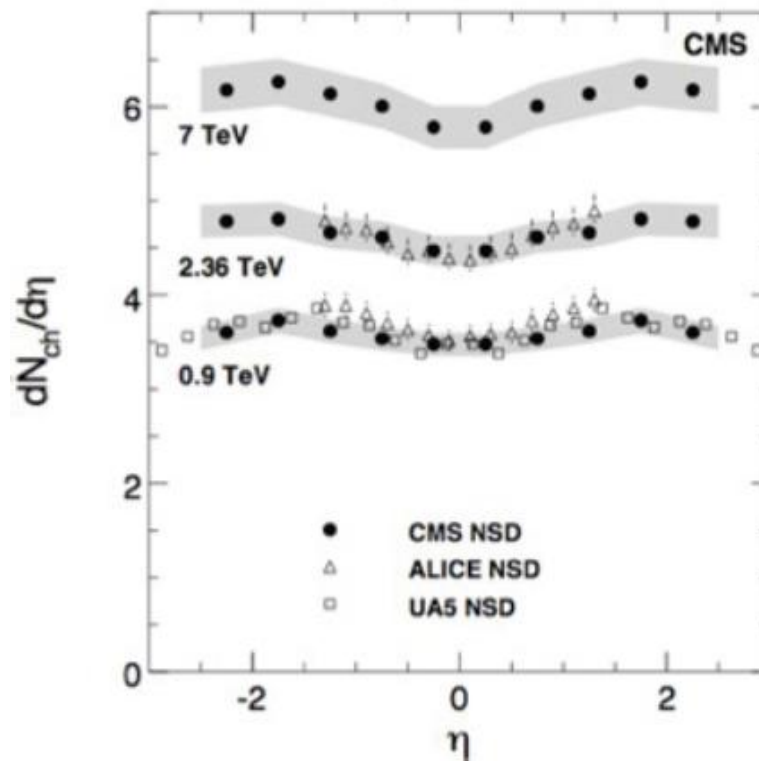
# Min bias event in pp collisions

Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV.

By CMS Collaboration **Phys.Rev.Lett.105:022002,2010.**



- Results well-described by Tsallis fit function
  - Exponential (low- $p_T$ )
  - Power-law (high- $p_T$ )



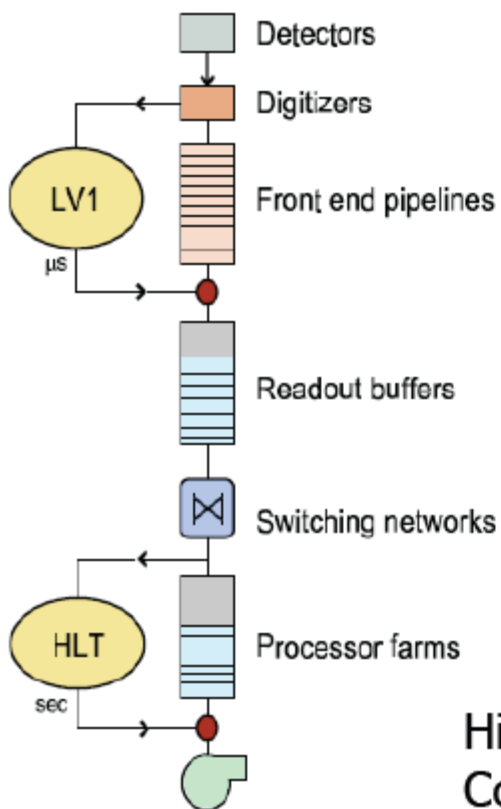
-2.4 <  $\eta$  < 2.4 CMS  
-1.0 <  $\eta$  < 1.0 ALICE



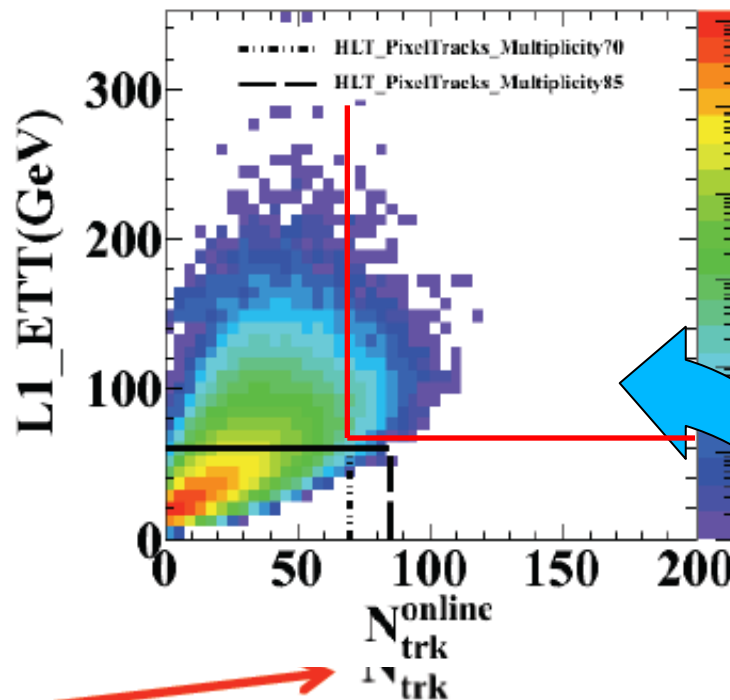
# High multiplicity events

Dedicated trigger needed to record highest multiplicities

G. Roland, Report at CERN seminar Sep.21.2010



Level-1:  
Require  $E_T > 60 \text{ GeV}$   
in calorimeters



High-Level trigger:  
Count number of tracks with  $p_T > 0.4 \text{ GeV}/c$ ,  $|\eta| < 2$ ,  
within  $dz < 0.12 \text{ cm}$  of a **single** vertex with  $z < 10 \text{ cm}$

Отбор событий с высокой множественностью pp столкновения  
при  $\sqrt{s_{NN}} = 7 \text{ TeV}$ .





# Двух -частичная корреляция в $pp$

# Long-range near-side angular correlations

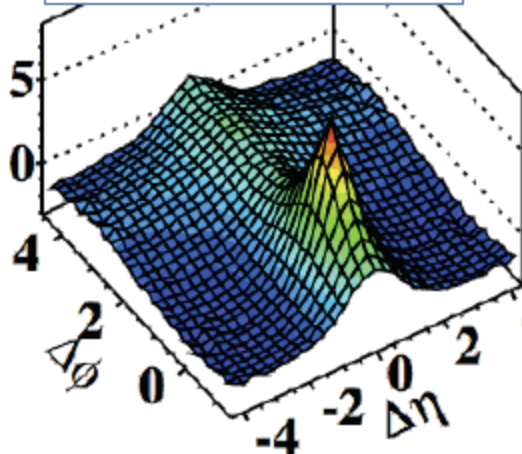
- $p_T$ -inclusive two-particle angular correlations in minimum bias collisions

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

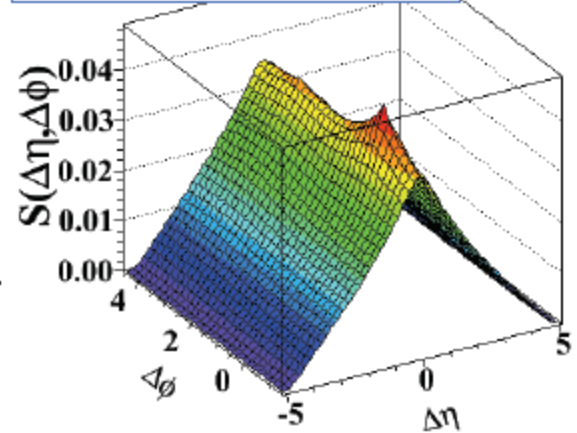
$$R = \frac{S - B}{B}$$

$$\begin{cases} S_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \\ B_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N^2} \frac{d^2 N^{bkg}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \end{cases}$$

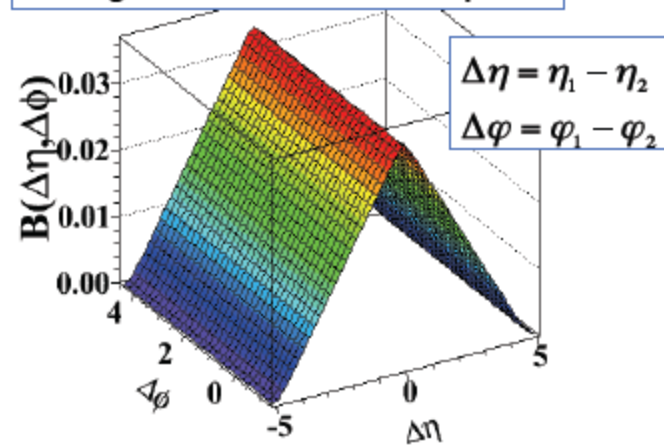
Ratio Signal/Background



Signal = same event pairs



Background = mixed-event pairs





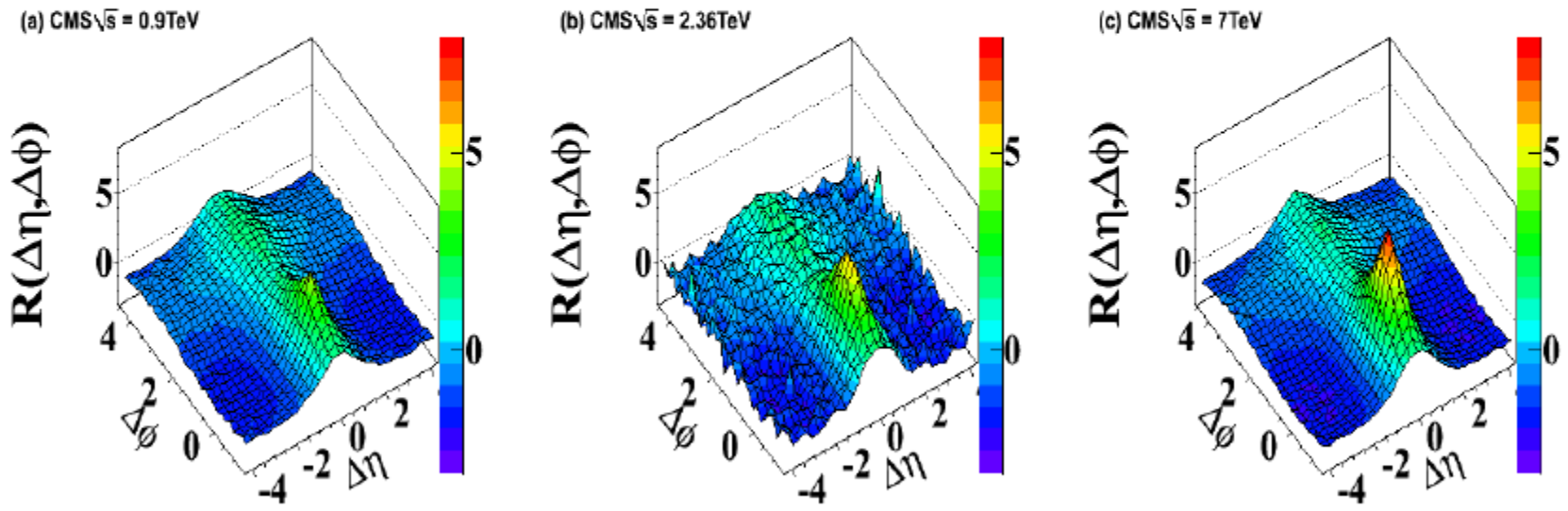
# Min bias events in pp collisions at 0.9, 2.36 and 7 TeV

We started studying the correlation function  
For minimum bias events at different energies  
in  $p_T$  inclusive distributions

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

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

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



$p_T$ -inclusive two-particle angular correlations in Minimum Bias collisions

**Ридж- эффект отсутствует в событиях без «отбора»  
в pp столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 0.9, 2.36, 7\text{ TeV}$ .**



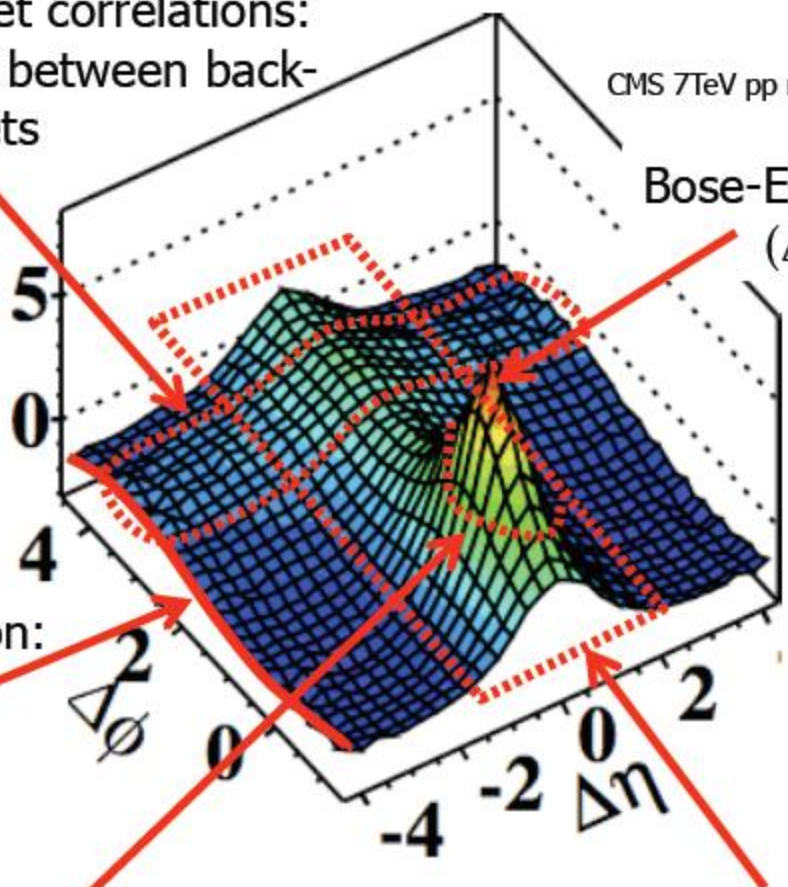
# Обсуждаемые и принятые интерпретации без Ридж эффекта

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

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$$
$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

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

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



CMS 7TeV pp min bias

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

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

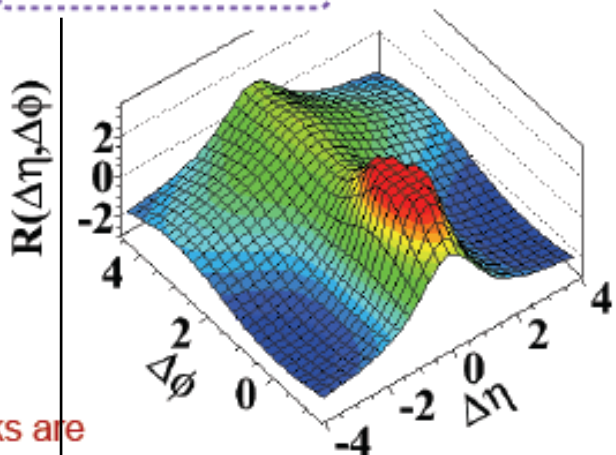


# **Двух -частичная корреляция в pp столкновении при**

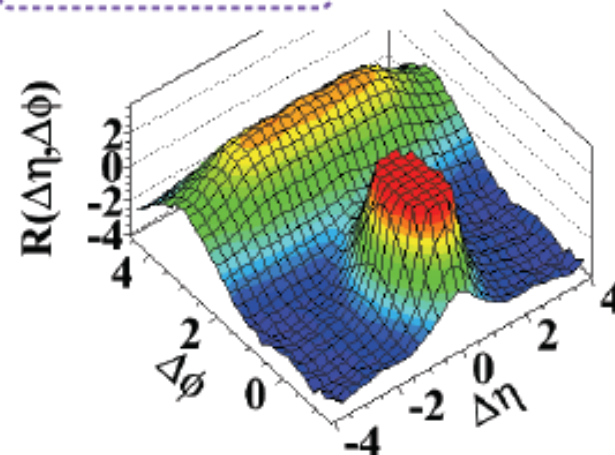
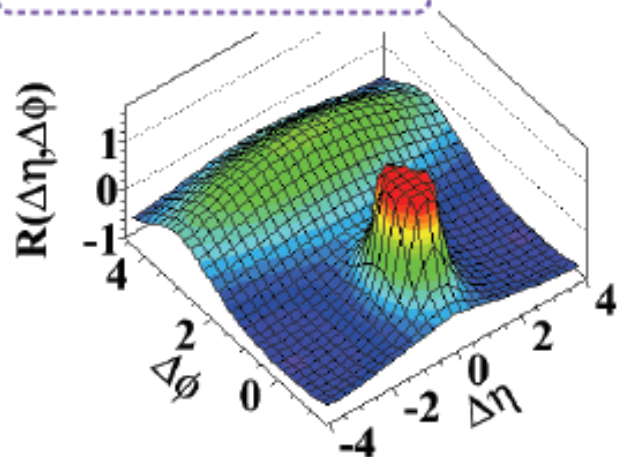
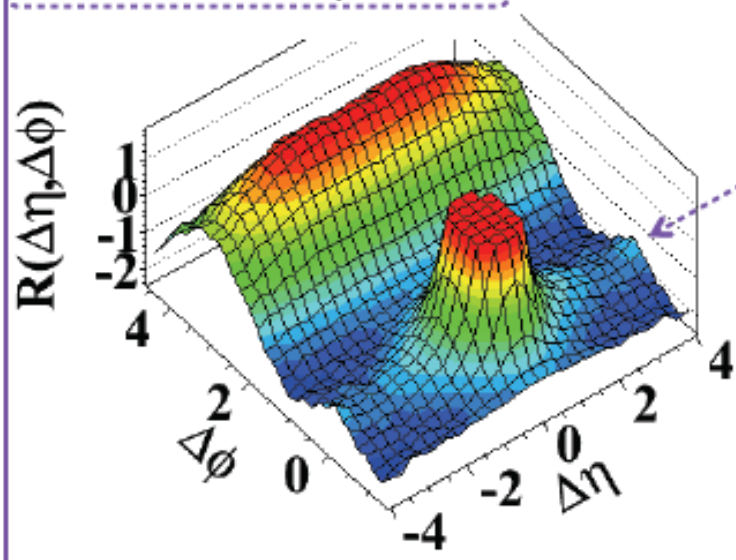
**1.  $N > 110$**

**2.  $1.0 < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$**

# Long-range near-side angular correlations

(a) MinBias,  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$ 

Peaks are truncated!

(c)  $N > 110$ ,  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$ (b) MinBias,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$ (d)  $N > 110$ ,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$ 

new ridge-like structure at  $\Delta\phi \sim 0$



# Ридж эффект в p-p столкновениях

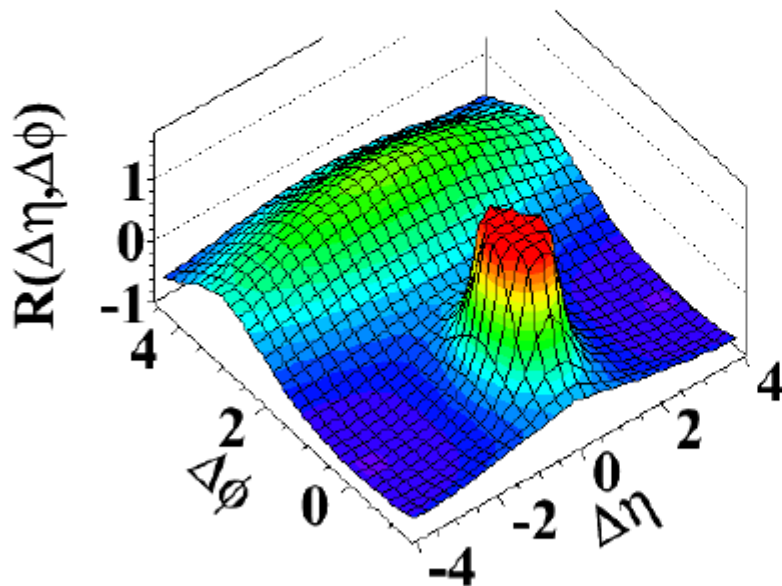


## Results for intermediate $p_T$ : 1-3 GeV/c

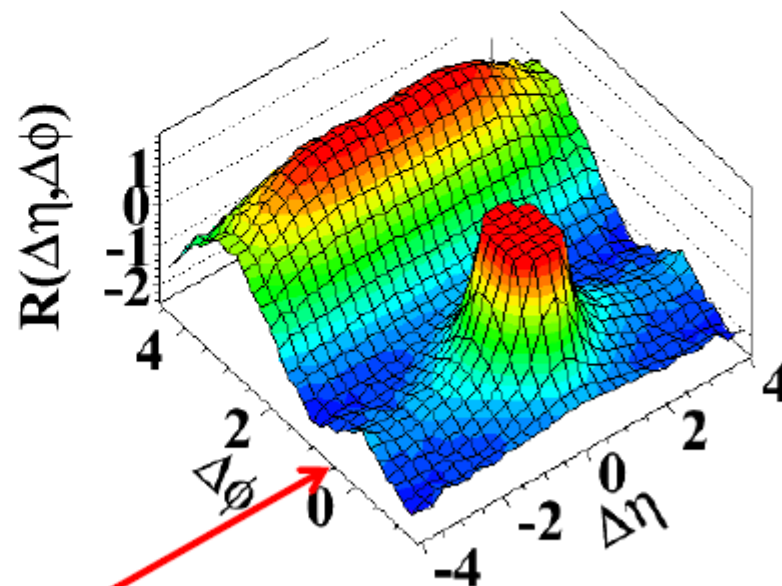
Minimum Bias  
no cut on multiplicity

High multiplicity data set  
and  $N > 110$

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



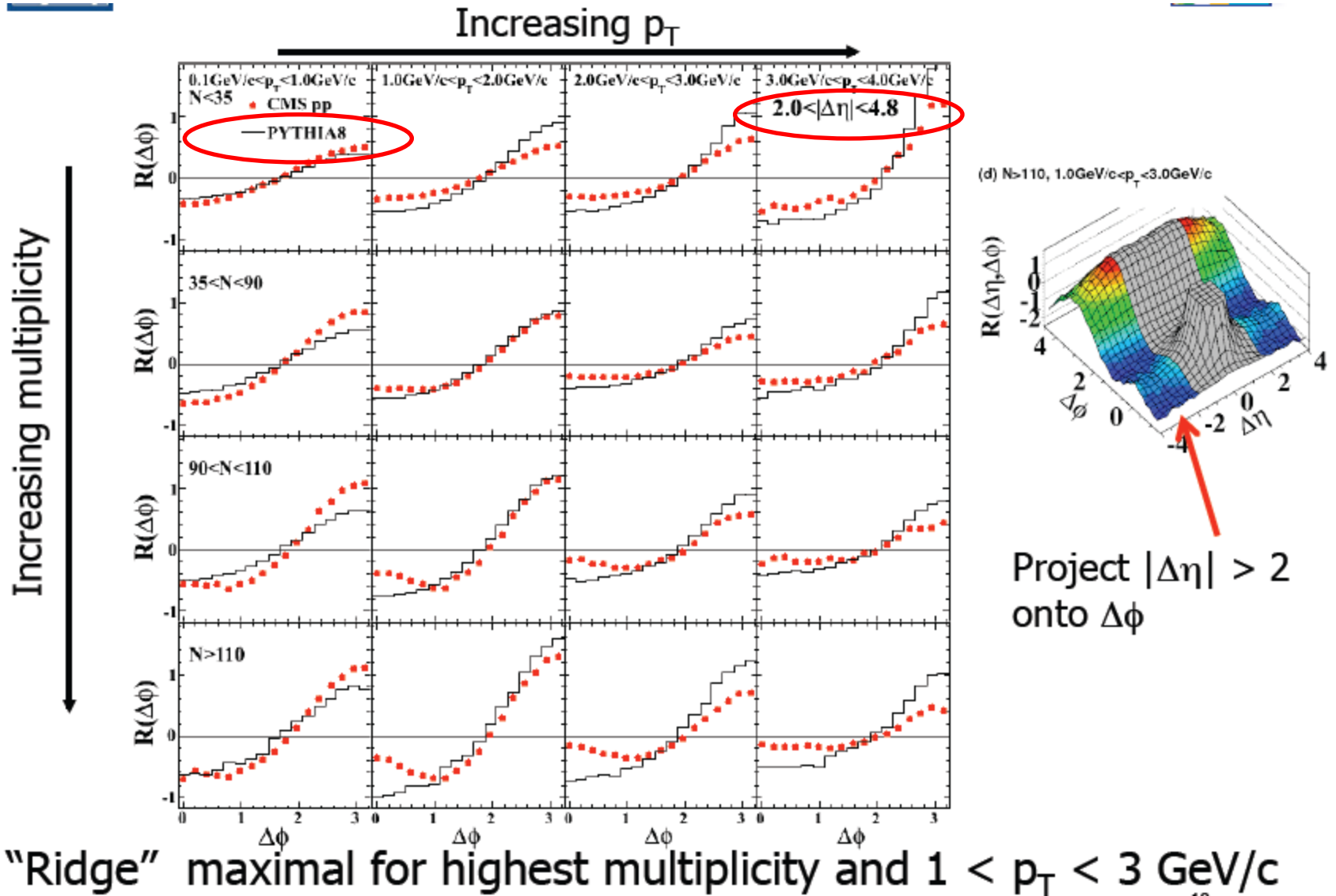
(d)  $N > 110$ ,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



**New “ridge-like” structure extending to large  $\Delta\eta$  at  $\Delta\phi \sim 0$**

Протяжённая (длинно-действующая) корреляция на большом интервале  $\Delta\eta = (-4, +4)$  и  $\Delta\phi \approx 0$ .

# Зависимость Ридж эффекта от множественности и $p_T$ при $\Delta\eta > 2$



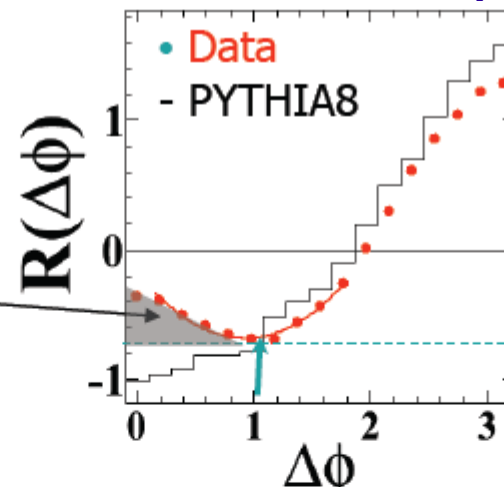




# Зависимость Ридж эффекта от множественности и $p_T$

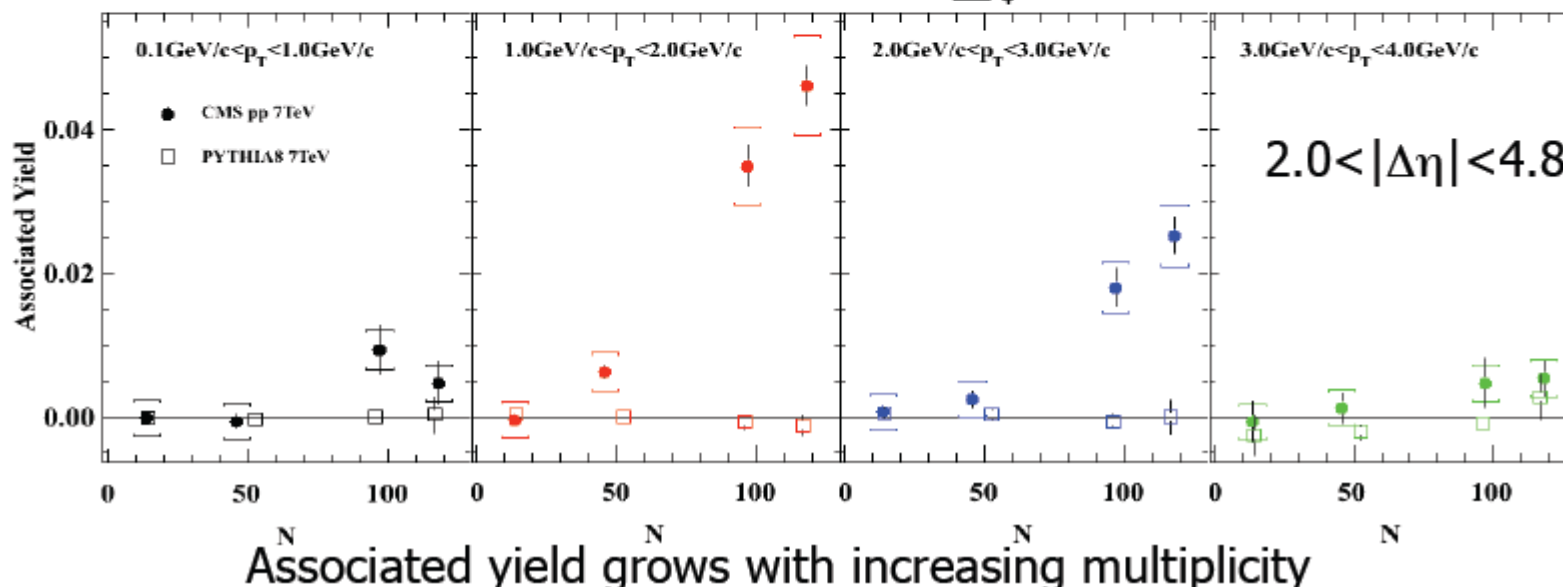
Zero Yield At Minimum (ZYAM)

Associated yield:  
correlated multiplicity per particle



$N > 110$   
 $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$   
 $1 \text{ GeV}/c < p_T < 2 \text{ GeV}/c$

Minimum of R



Величина эффекта растет с увеличением множественности в промежуточной области поперечных импульсов  $p_T = 1-3 \text{ GeV}/c$  и  $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$ .

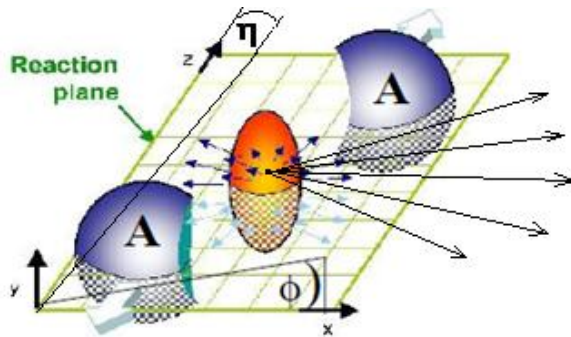
# Эксперимент CMS на Большом Адронном Коллайдере

## Ридж- эффект в протон- протонных столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=7$ ТэВ

Вееро- подобный разлет частиц, впервые измеренный в p-p столкновениях (LHC) и наблюдавшийся ранее в Au-Au (RHIC)

**Является ли этот эффект результатом взрыва сгустка КГП ?**

V.Khachatryan et al., JHEP 1009:091,2010

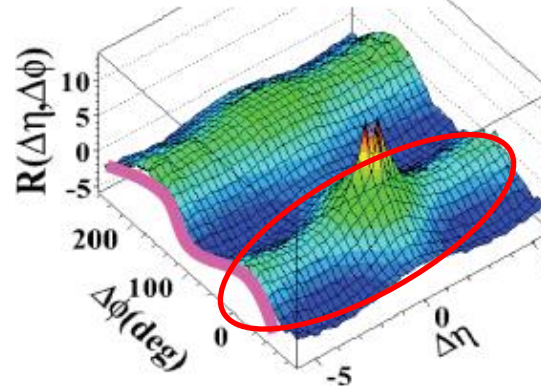


$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$$

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

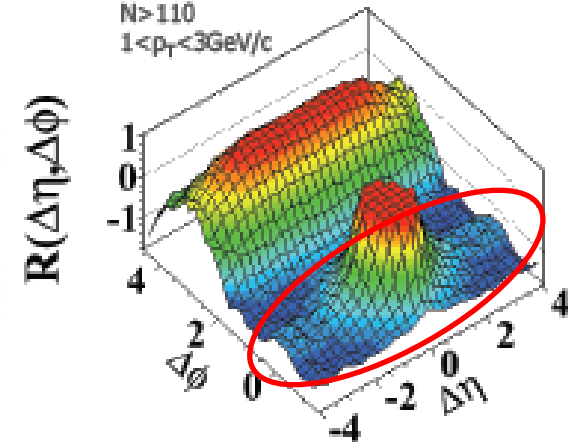
RHIC, Au-Au, 200 GeV

PHOBOS Au+Au 0-10%



CMS LHC, p-p, 7000 GeV

$N > 110$   
 $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$



### Интерпретации:

- КХД- длинно-действующие корреляции
- Коллективные эффекты кварк-глюонной среды
- Взаимодействие партонов со средой
- Другие ???

### Свойства Ридж- эффекта:

- При высокой множественности,  $N > 100$
- Большая область разности быстрот,  $|\Delta\eta| < 4.8$
- Узкая область азимутальных углов,  $|\Delta\varphi| < 1.0$
- Небольшие значения поперечных импульсов,  $1.0 < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

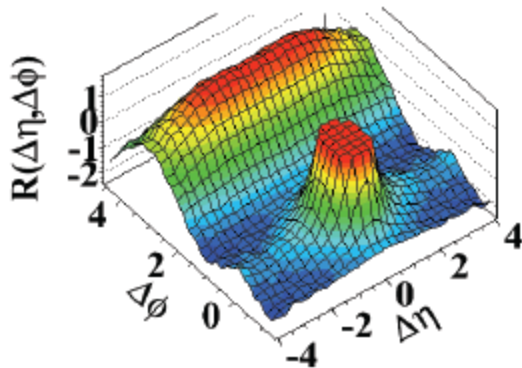


## Основные свойства Ridge-эффекта, впервые наблюдаемого в p-p столкновениях

- Эффект мал, но ясно виден при  $\sqrt{s} = 7$  TeV в событиях с большой множественностью частиц  $N > 90$ .
- Он наблюдается при большой разности быстрот,  $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$ .
- Эффект проявляется в промежуточной области поперечных импульсов  $p_T = 1-3$  GeV/c.
- Увеличивается с ростом множественности.
- Отсутствует в событиях со струями с  $E_T(\text{jet}) > 20$  GeV и в multi-jet событиях с  $N_{\text{jet}} > 4$ .
- Его свойства совпадают со свойствами в Au-Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ (RHIC results), но должны быть изучены на других характеристиках, не измеренных ещё на CMS, и в экспериментах ALICE и ATLAS.

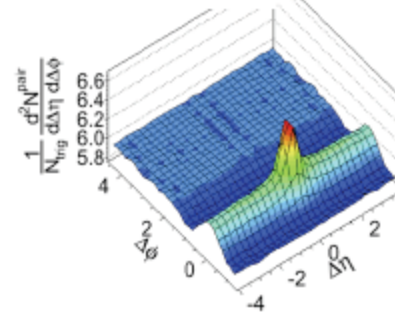
# Ридж- эффект на ЛНС в pp и PbPb

pp 7 TeV, high multiplicity ( $N > 110$ )



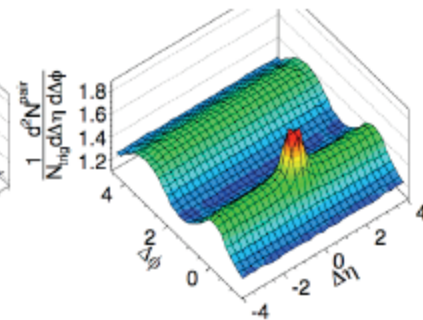
PbPb 2.76 TeV

0-5% central



CMS Preliminary

35-40% peripheral

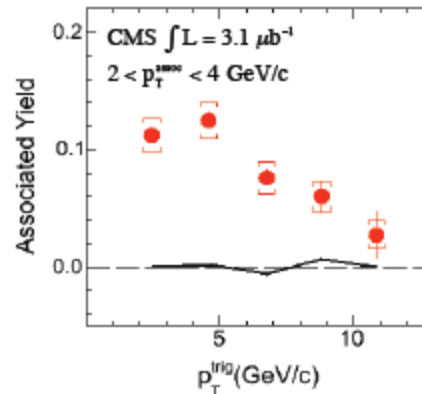
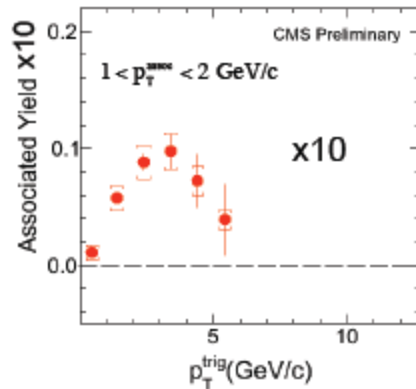


JHEP 09 (2010) 091

JHEP 07 (2011) 076

CMS PAS HIN-11-006

Similar  $p_T$  dependence of ridge yield in pp and PbPb



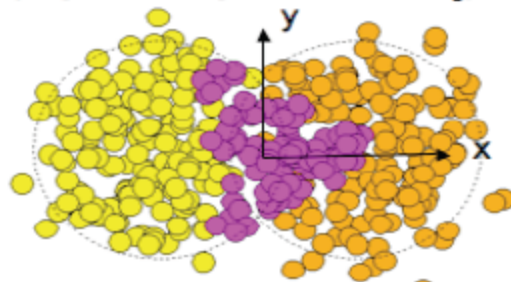
Long-range rapidity  
dihadron correlations

→ Early-time dynamics!

# Ридж- эффект на ЛНС в РbРb и анализ с помощью Фурье разложения

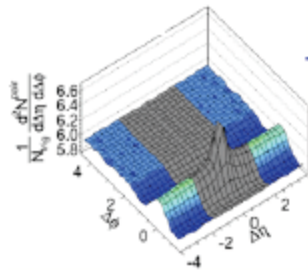
## Higher-order flow harmonics ( $v_n$ , $n>2$ )

Fluctuating initial condition  $\rightarrow$   
higher-order flow harmonics  
(e.g., "triangular flow",  $v_3$ )

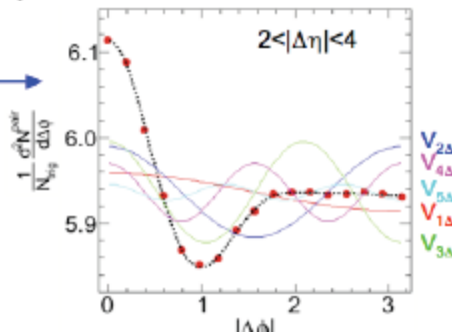


*Phys. Rev. C81:054905, 2010*

Fourier series: 
$$\frac{1}{N_{\text{trig}}} \frac{dN^{\text{pair}}}{d\Delta\phi} = \frac{N_{\text{assoc}}}{2\pi} \left( 1 + 2 \sum_{n=1} V_{n\Delta} \cos(n\Delta\phi) \right)$$

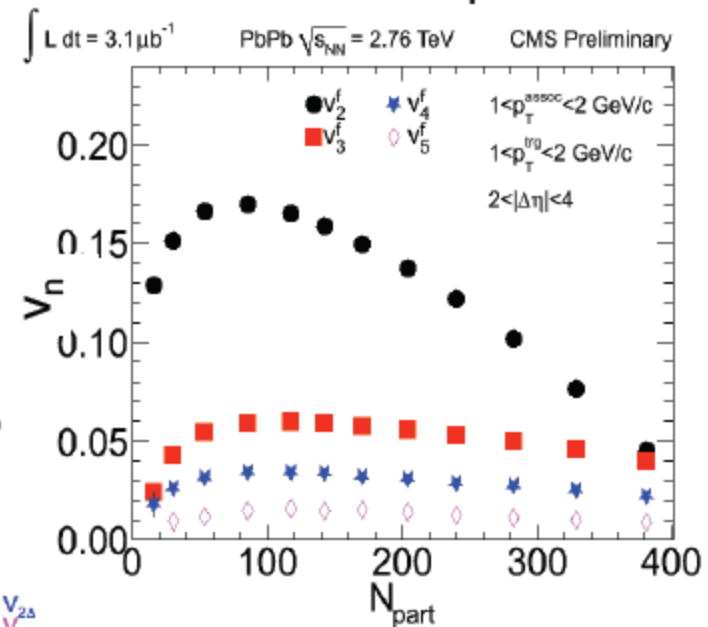


Short-range non-flow effects excluded!



CMS PAS HIN-11-006

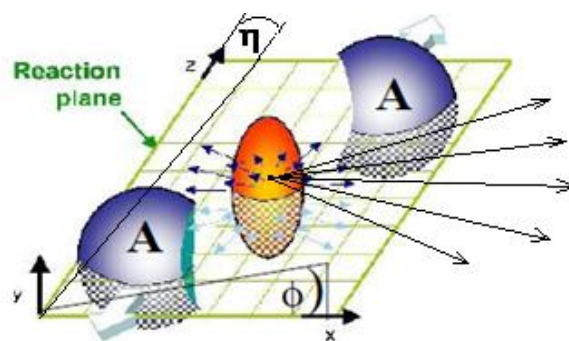
### Full harmonic spectrum



Additional constraints to the hydrodynamic properties of QGP

Основной вклад в Ридж дают 2-ая и 3-я гармоники

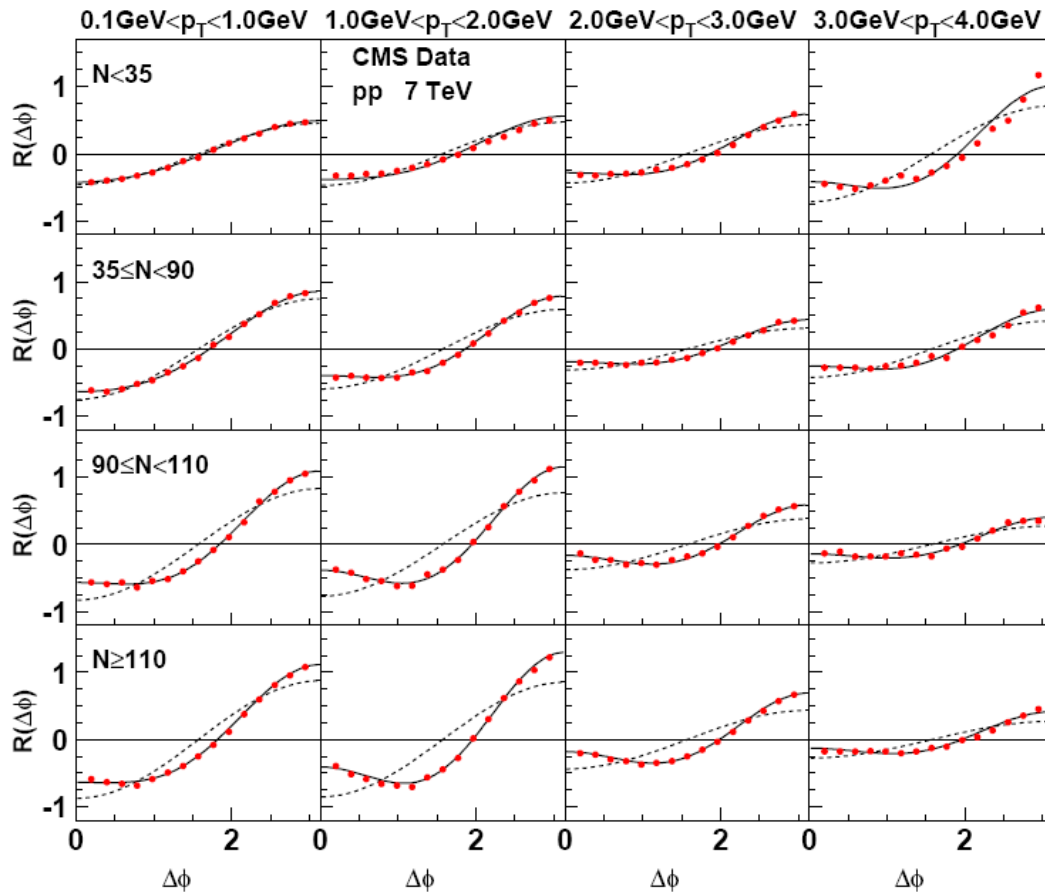
# Гипотеза – Ридж-эффект как следствие взрыва сгустка КГМ



# Интерпретация Ридж эффекта – следствие образования КГМ в **pp** столкновении

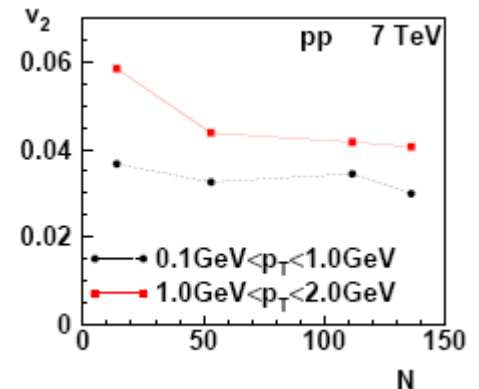
<http://arxiv.org/abs/1010.0405> (Bozek)

Elliptic flow in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV



Два важных момента в этой работе:

1. Закон сохранения энергии импульса
2. Предположение об образовании жидкой термодинамической капли



**$v_2 = 4 - 5 \%$**

**в pp столкновениях !!!**

# Вопросы (л. 8)

*Какие свойства «обратного» пика в двух-частичных корреляциях свидетельствуют о прохождении партонов через среду?*

*Как интерпретируются необычные свойства обратного пика в двух-частичных корреляциях?*

*Что такое Ридж-эффект и какие его свойства говорят о новой среде КГП ?*

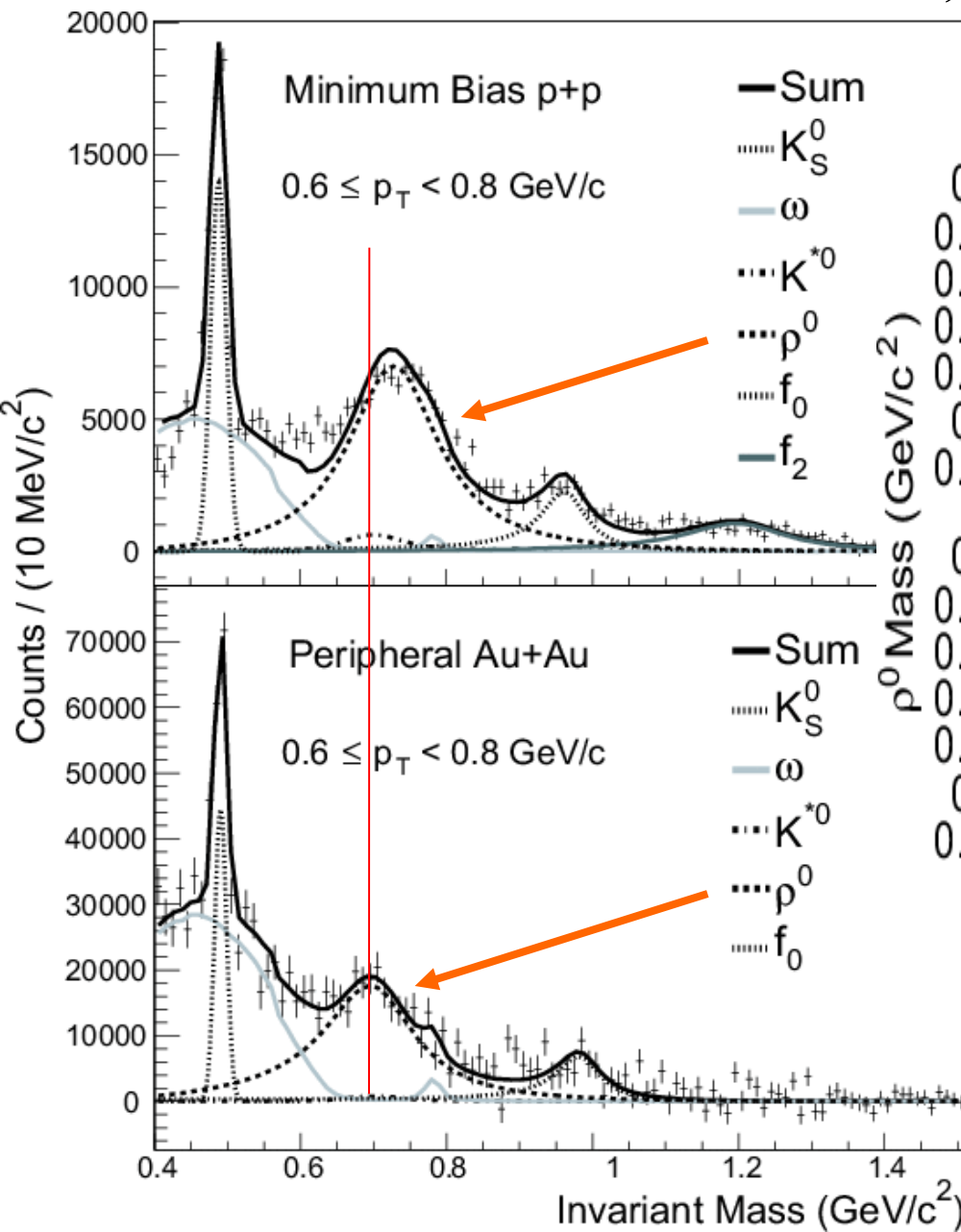


А-А столкновения

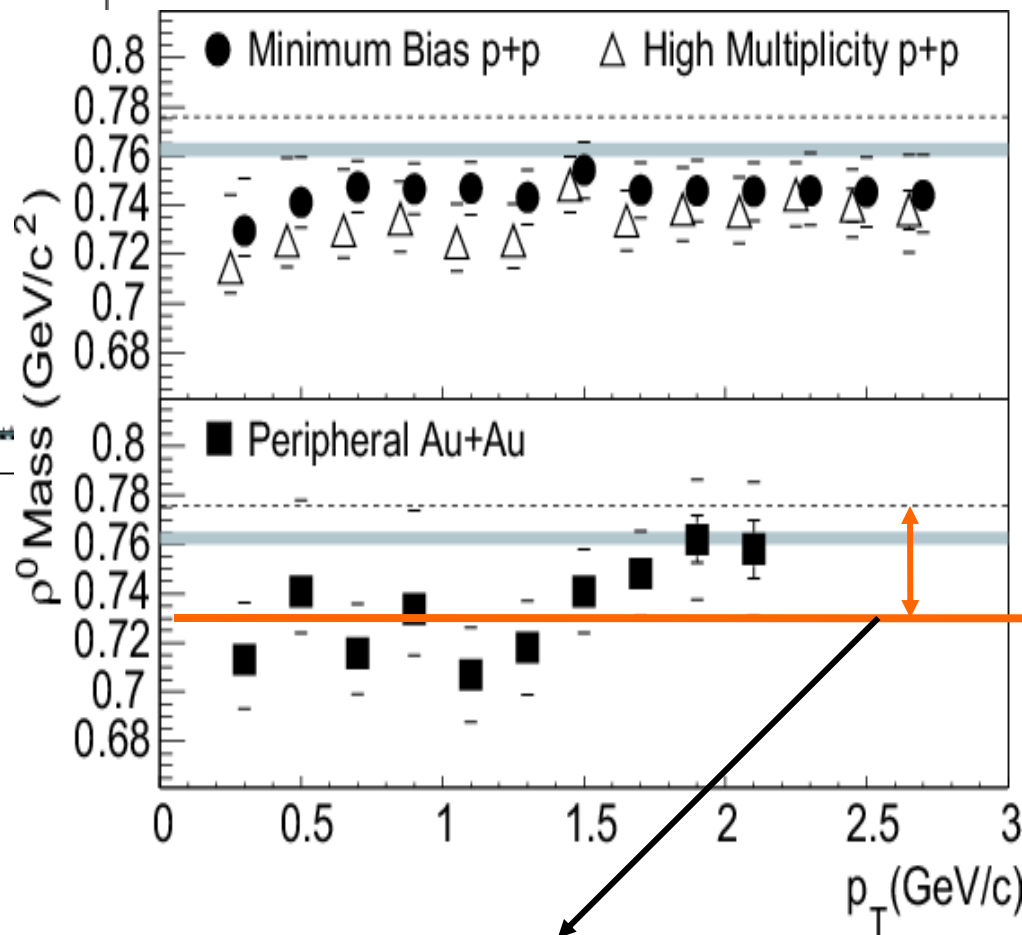
**«Плавление» резонансов**

# Сдвиг массы $\rho^0$ (770) в p+p и Au+Au столкновениях при

$$\sqrt{s} = 200 \text{ ГэВ}, 3.3 < |\eta| < 5.0$$



J.Adams et al (STAR), nucl-ex/0307023

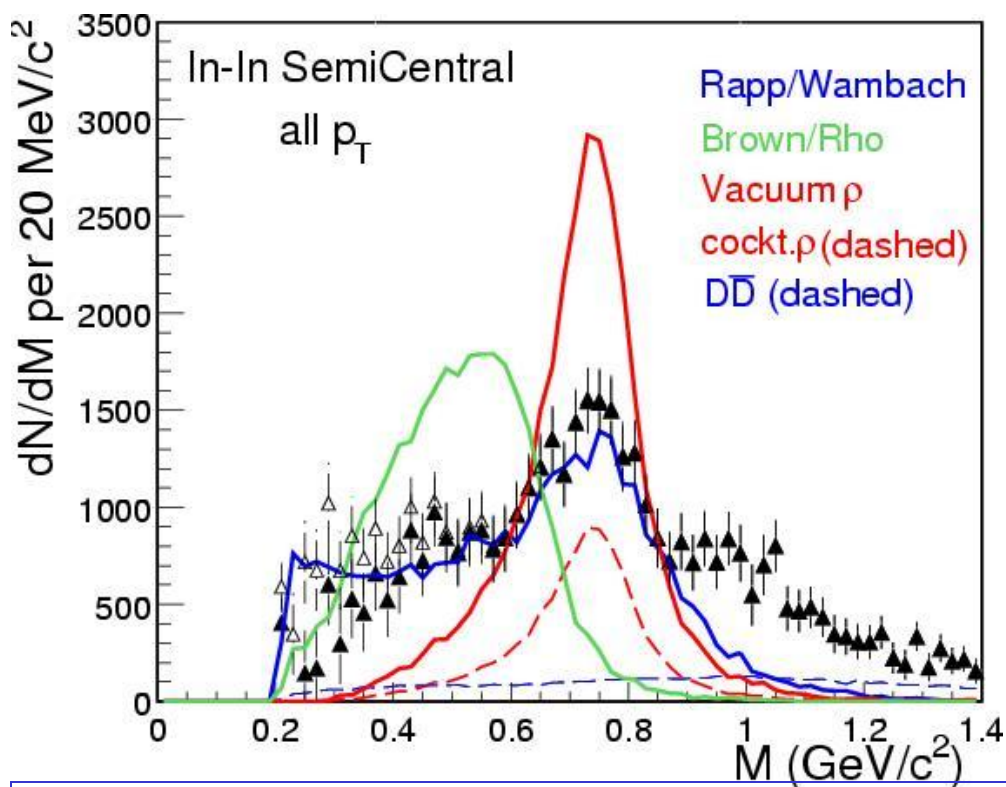


$\Delta \rightarrow$  сдвиг  $\cong -50 \text{ MeV} \text{ !!!}$

1. Эффект перерассеяния  $\pi^+\pi^-$
2. Взаимодействие с ядерной материей

Рис.18

## «Уширение» $\rho^0(770)$ - мезона в In+In на SPS



В эксперименте NA60 регистрировался редкий ( $\Gamma(\mu^+\mu^-) = 5 \cdot 10^{-5}$ ) лептонный распад  $\rho(770)$ - мезона. На мюоны не действует взаимодействие в конечном состоянии.

Предварительные данные свидетельствуют, что ширина увеличивается, но описание в теоретических моделях – противоречивое.

Спектр по эффективной массе  $\mu^+\mu^-$  в квази-центральных столкновениях In+In на SPS(NA60). Модели:  $\rho(770)$ - мезон в вакууме, в адронной плотной среде на границе при  $T \sim 190$  МэВ, в партонной среде кирального конденсата и др.

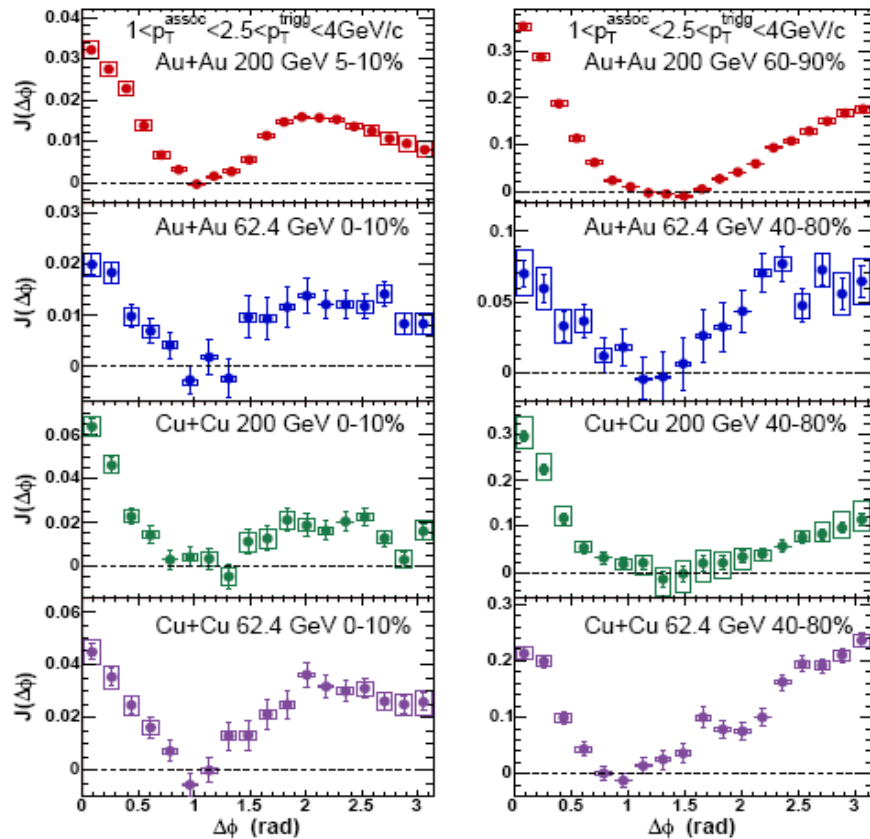
# «Плавление» резонансов

1. Обычно экспериментально измеряемые массы нестабильных адронных резонансов постоянны так же, как стабильных частиц.
2. Наблюдение в эксперименте на RHIC уменьшение массы  $\rho(770 \text{ МэВ})$  - мезона на  $50 \text{ MeV}$  у является удивительным результатом
3. Это может быть связано с
  - а) эффектами перерасеяния  $\pi^+$  на  $\pi^-$  и наоборот,
  - б) взаимодействием  $\rho$  - мезона с ядерной материей, а также с прохождением его через КГП .
4. Предварительные данные свидетельствуют, что ширина  $\rho$  - мезона увеличивается, но описание в теоретических моделях – противоречивое. Если результат подтвердится, то это будет сильным аргументом в пользу термализованной новой материи.

Запасные слайды

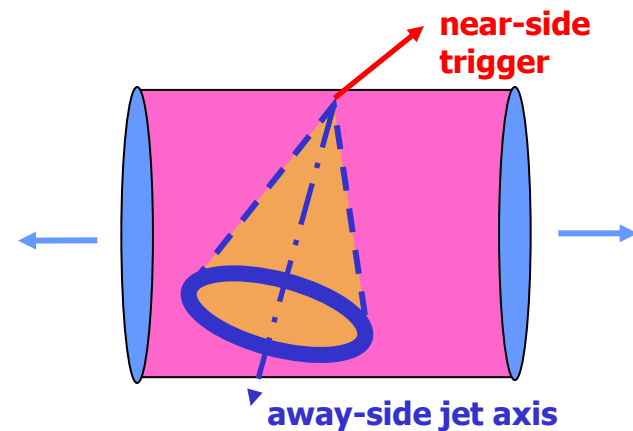
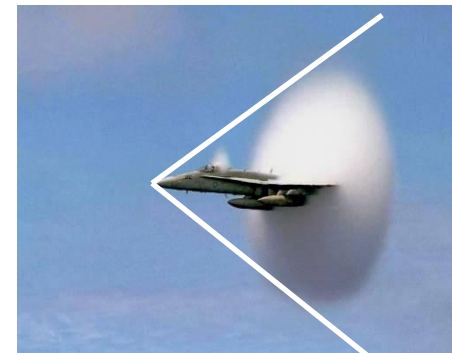
# Струйная томография в 2-х частичных корреляциях. Подробности в следующем докладе

**PHENIX, nucl-ex/0611019.**

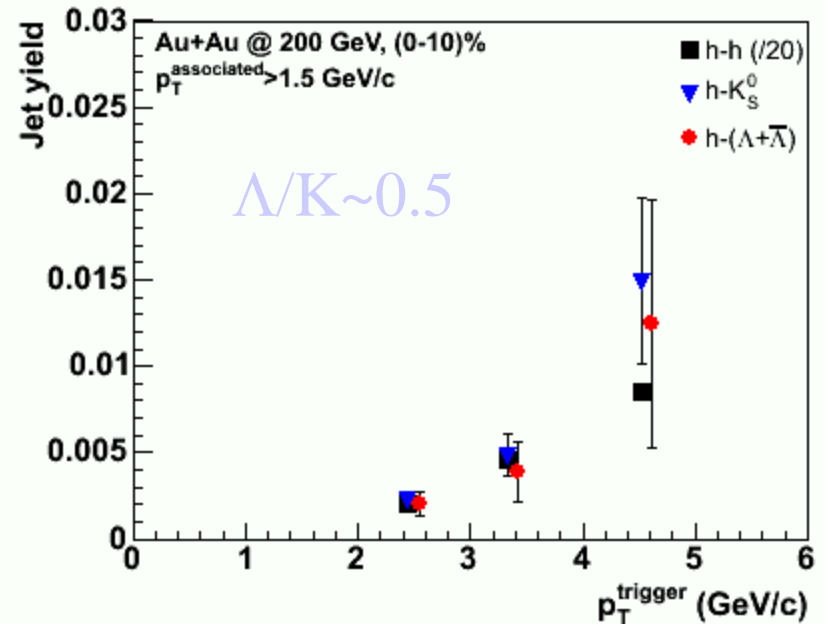
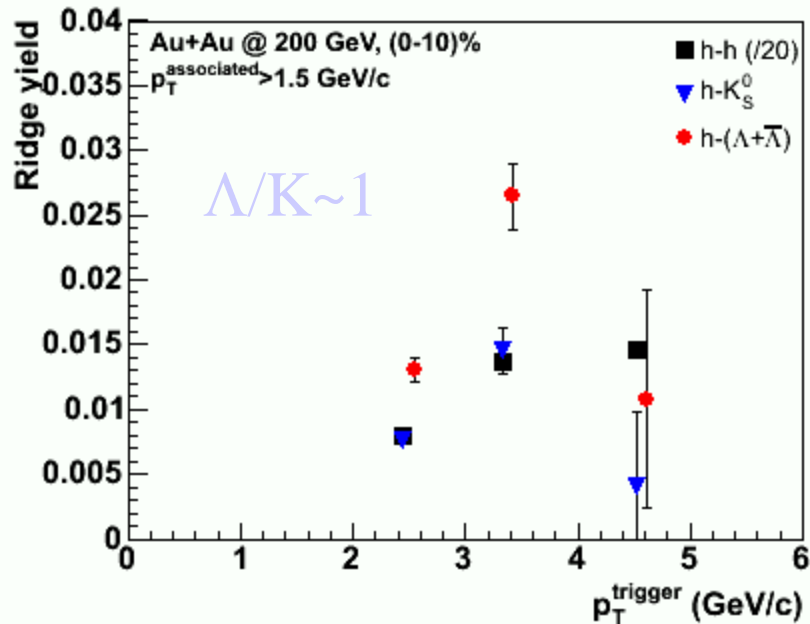
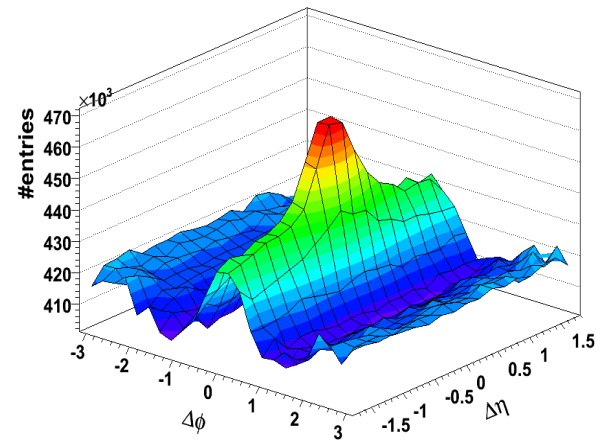


Эффект наблюдается в AuAu и CuCu  
 системах, при разных энергиях

**Ударная волна, конус Маха?**



# Particle production in jet distinctly different than in medium





# Комментарии в SLAC arXiv

- Interpretations are going fast:
  - <http://arxiv.org/abs/1009.4635> (Shuryak)
  - <http://arxiv.org/abs/1009.5295> (Dumitru et al)
  - <http://arxiv.org/abs/1009.5229> (Troshin and Turyin)
  - <http://arxiv.org/abs/1010.0405> (Bozek)
  - <http://arxiv.org/abs/1010.0918> (Dremin, Kim)
  - <http://arxiv.org/abs/1010.0964>( Tannenbaum, Weiner)





# Systematic uncertainties

Авторы работы выполнили многочисленные проверки устойчивости сигнала к погрешностям детекторов, реконструкции треков и способу анализа.

## Среди них:

- Не чувствительность к фону в пучке протонов.
- Не чувствительность к вкладу “pile up”.
- Независимости от расстояния до центра пучка.
- Независимость от заряда частиц (+,-), (+,+),(-,-).
- Сигнал проверен в 3-х независимых кодах анализа.
- Независимость от HLT Trigger Bias.
- Сигнал виден в корреляции с  $\pi^0$  в ECAL (supercluster).
- ...

Summary of main systematics for the new analysis

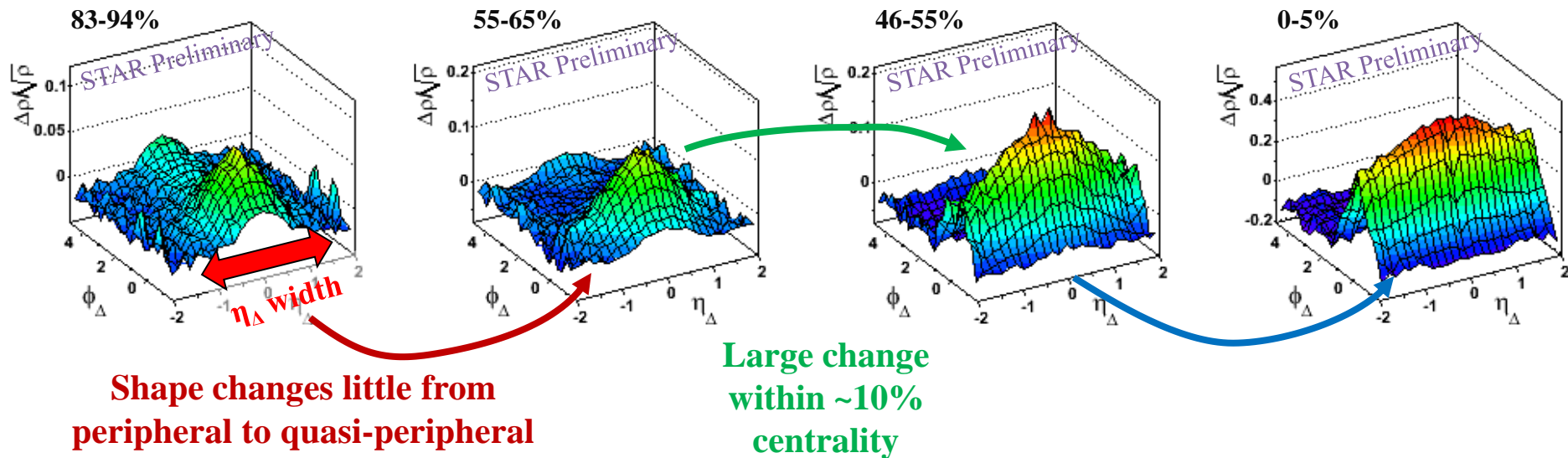
Sources	Syst. on ridge yield
Pileup	15%
HLT efficiency	4-5%
Tracking	1-2%
ZYAM	0.04

**Перекрёстные проверки не “убили”  
Ridge !**

# Свойства Ридж в Au-Au столкновениях

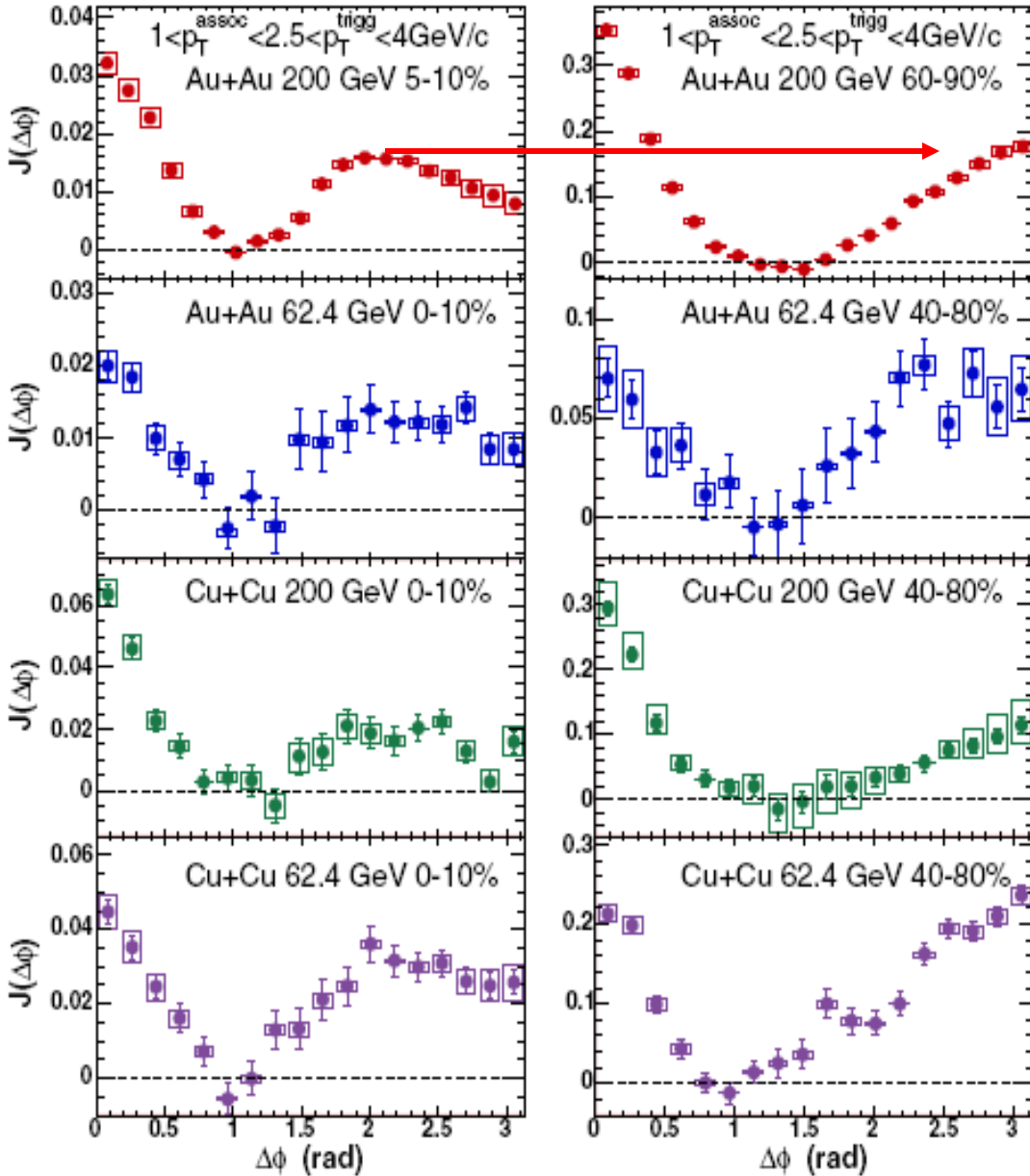
M. Daugherty for the STAR Collaboration, QM2008

data - fit (except same-side peak)



*С увеличением центральности столкновения (с ростом множественности) вклад Ridge эффекта увеличивается*

# Зависимость от энергии и типа сталкивающихся систем



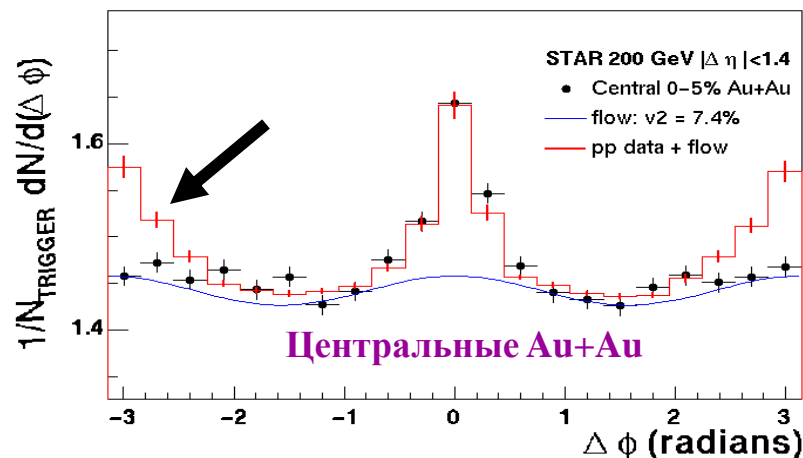
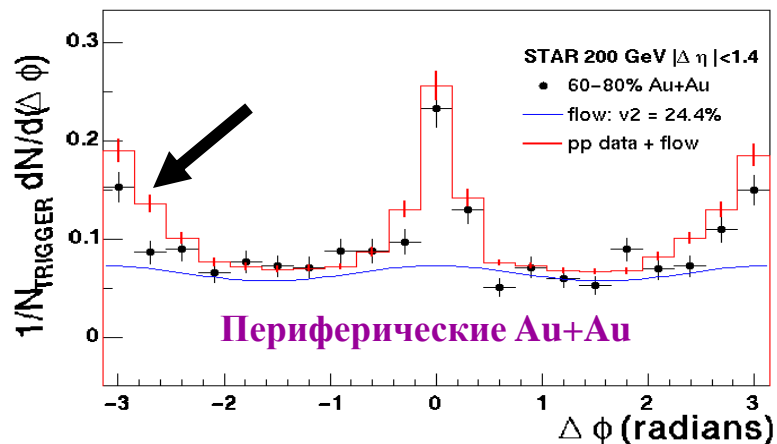
Характеристики обратного пика зависят от центральности, но не зависят от энергии и типа сталкивающихся ядер.

*A. Adare et al., Phys.Rev.Lett. 98, 232302 (2007).*

# $\Delta\phi$ -корреляции пар адронов

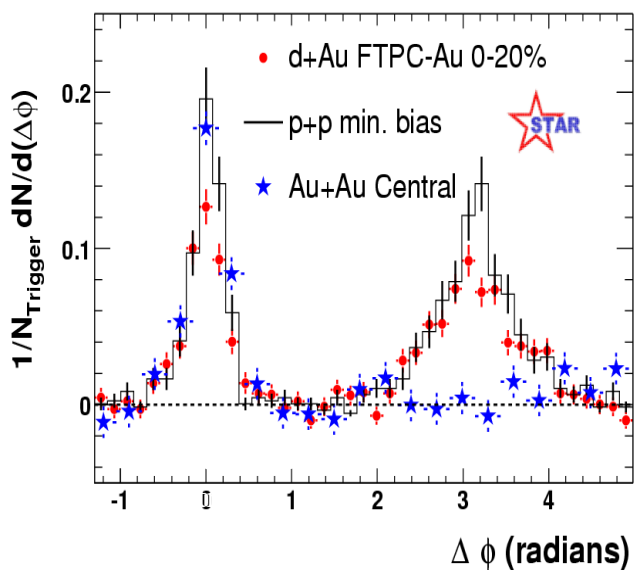
В ходе экспериментальных исследований ранее были получены согласованные результаты:

- Наблюдается сильное подавление пика при  $\Delta\phi \approx \pi$  в Au+Au столкновениях по сравнению с p+r взаимодействиями, причем данный эффект усиливается с ростом центральности взаимодействий. C. Adler et al., *Phys.Rev.Lett.* 90, 032301 (2003); *Phys.Rev.Lett.* 90, 082302 (2003).



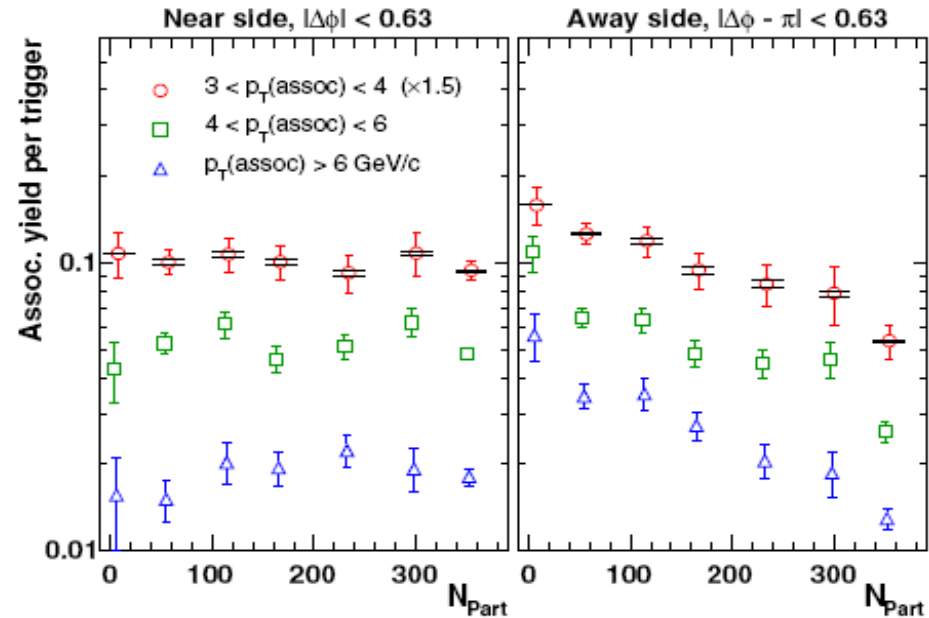
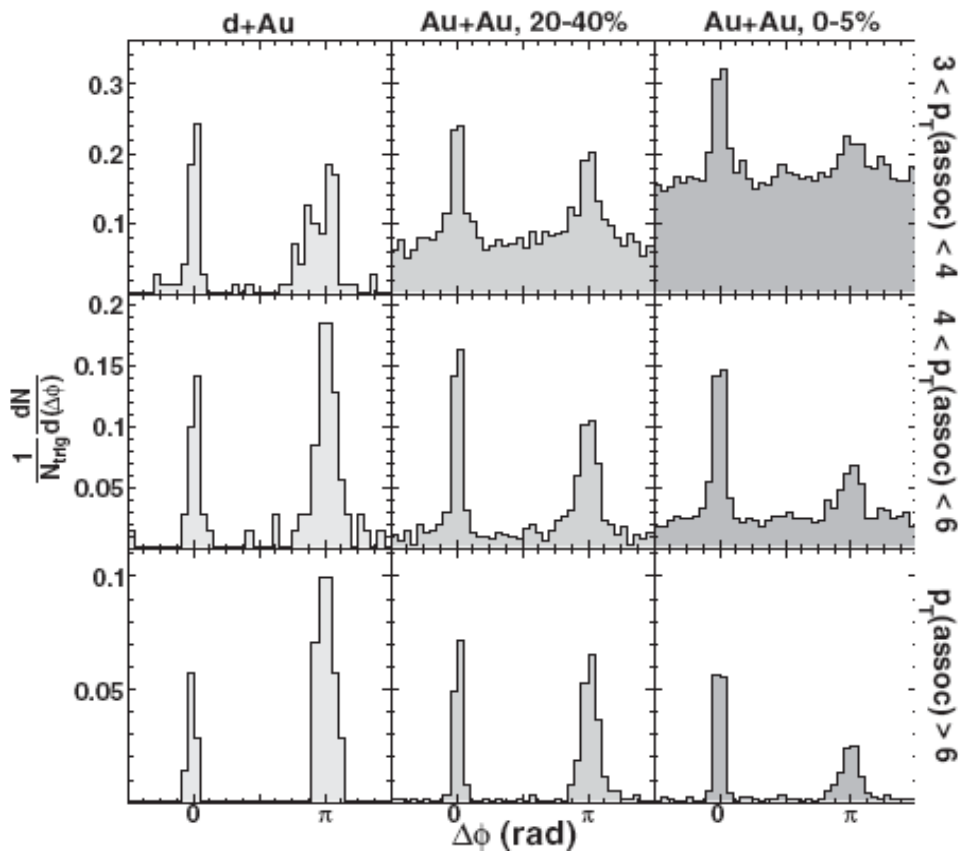
- Эффект подавления обратного пика является эффектом конечного состояния.

J.Adams et al., *Phys.Rev.Lett.* 91, 072304 (2003); S.S. Adler et al., *Phys.Rev.Lett.* 96, 222301 (2006); S.S. Adler et al., *Phys.Rev.Lett.* 97, 052301 (2006).



В конечном состоянии в центральных АА-столкновениях образуется новое состояние материи, характеризующейся большими потерями энергии и непрозрачностью для партонов с большими  $p_T$  и продуктов их фрагментации.

# Влияние среды: большие $p_T^{(assoc)}$



*J. Adams et al., Phys.Rev.Lett. 97, 162301 (2006).*

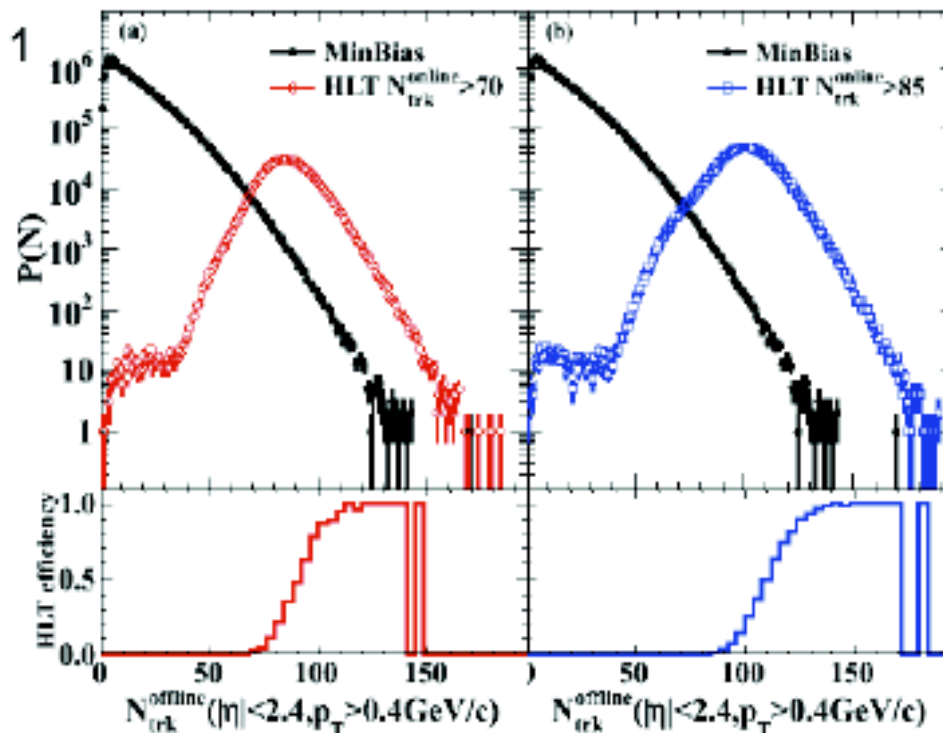
При больших  $p_T$  наблюдается два явных пика, соответствующих двухструйной структуре, как в d+Au, так и в полуцентральных и даже центральных Au+Au столкновениях, причем в последнем случае обратный пик существенно подавлен (как и при более умеренных  $p_T$ ).

Это первое прямое наблюдение двухструйной структуры события в центральных AA-столкновениях.

Выходы ассоциированных частиц зависят от центральности для обратного пика и не зависят для «прямого пика»



# Triggering on High Multiplicity



Multiplicity binning uses  
 $p_T > 0.4 \text{ GeV/c}$   
 $|\Delta\eta| < 2.4$



Multiplicity bin ( $N_{\text{trk}}^{\text{offline}}$ )	Event Count	$\langle N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \rangle$
MinBias	21.43M	15.9
$N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 35$	19.36M	13.0
$35 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 90$	2.02M	45.3
$90 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 110$	302.5k	96.6
$N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$	<b>354.0k</b>	117.8

**out of  $5 \times 10^{10}$  collisions**

Two different HLT thresholds:  
 $N_{\text{online}} > 70$  and  $N_{\text{online}} > 85$

HLT85 trigger range un-prescaled  
 for full  $980 \text{ nb}^{-1}$

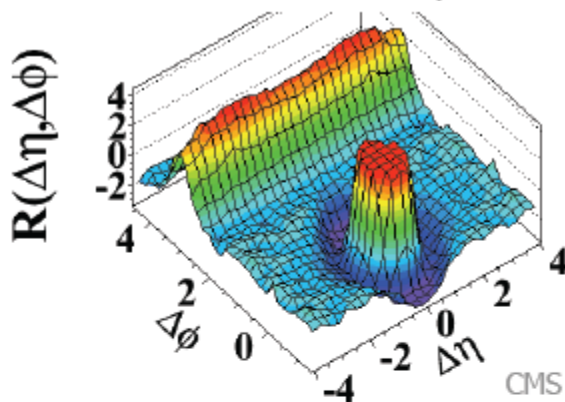
CERN Seminar September 21 2010

Statistics for high multiplicity events enhanced by  $O(10^3)$ .  
 Total datasets corresponding to  $980 \text{ nb}^{-1}$

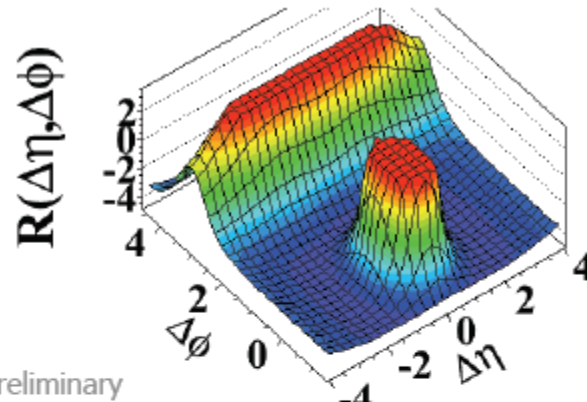


# Correlation in pp event generators at high multiplicity

PYTHIA D6T MinBias,  $N > 70$



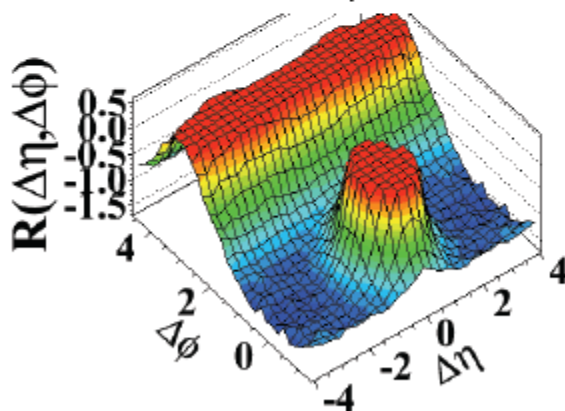
PYTHIA D6T, Dijet 80-120GeV



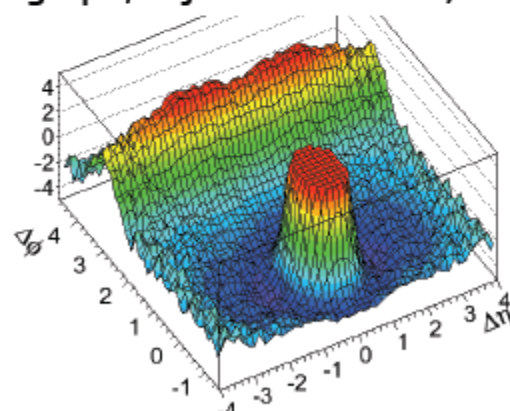
CMS preliminary

$1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$

HERWIG++,  $N > 110$



Madgraph, Dijet 100-250GeV,  $N > 90$



No ridge effect in these models (with the tunes used)



# Интерпретации

## Physics of the ridge

### Jet-Jet or Jet-proton remnant:

- Many questions about the role of jets
- Should predict ridge is always aligned with jet in  $\phi$

### Hydrodynamic flow:

- Original motivation of the analysis
- Possible although degree of thermalization is hard to evaluate

### Glasma tube from BNL group

- Glasma tube+radial flow  $\rightarrow$  ridge in HI
- Intrinsic ridge in pp even without radial flow
- Similar  $p_T$  dependence as the data



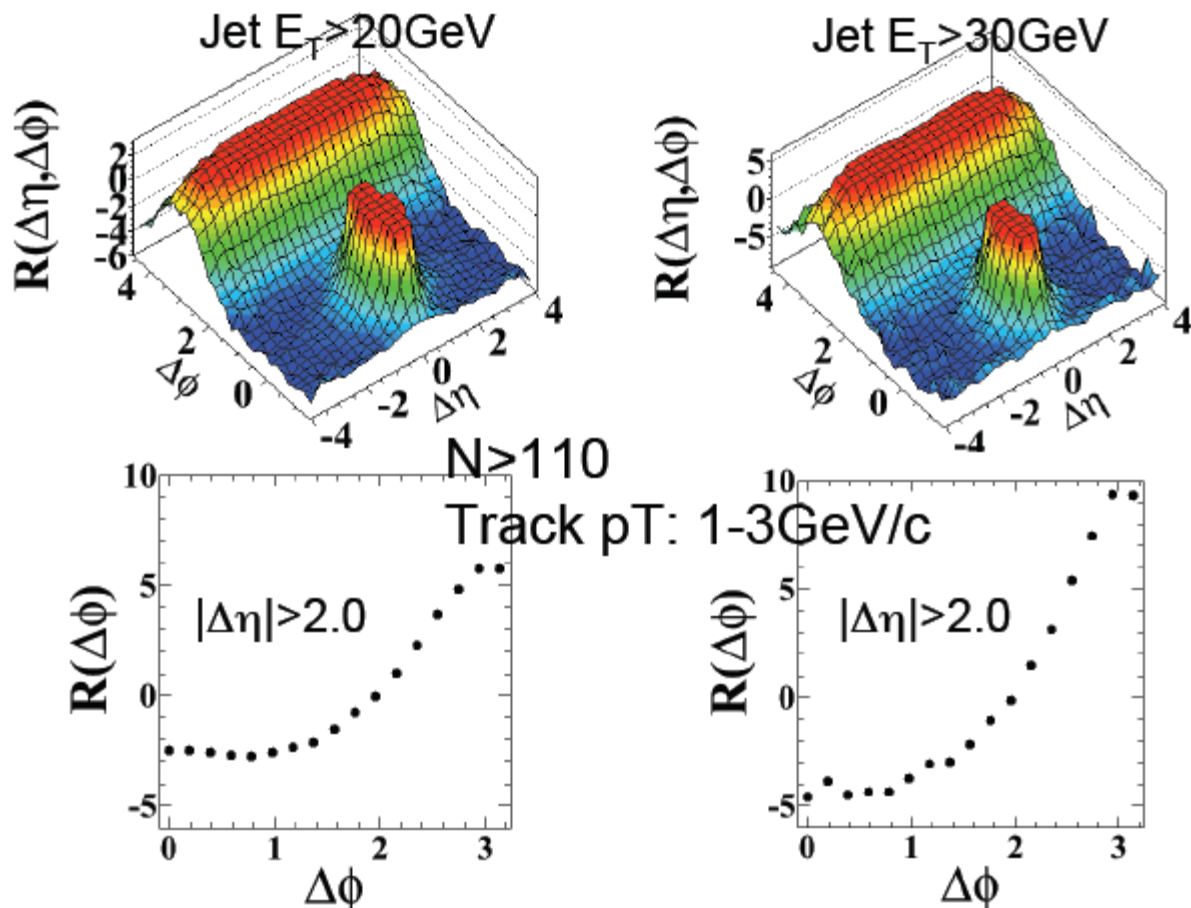


**No Ridge в событиях со струями**



# Physics of the ridge - Jet

A quick look at jet-hadron correlations:

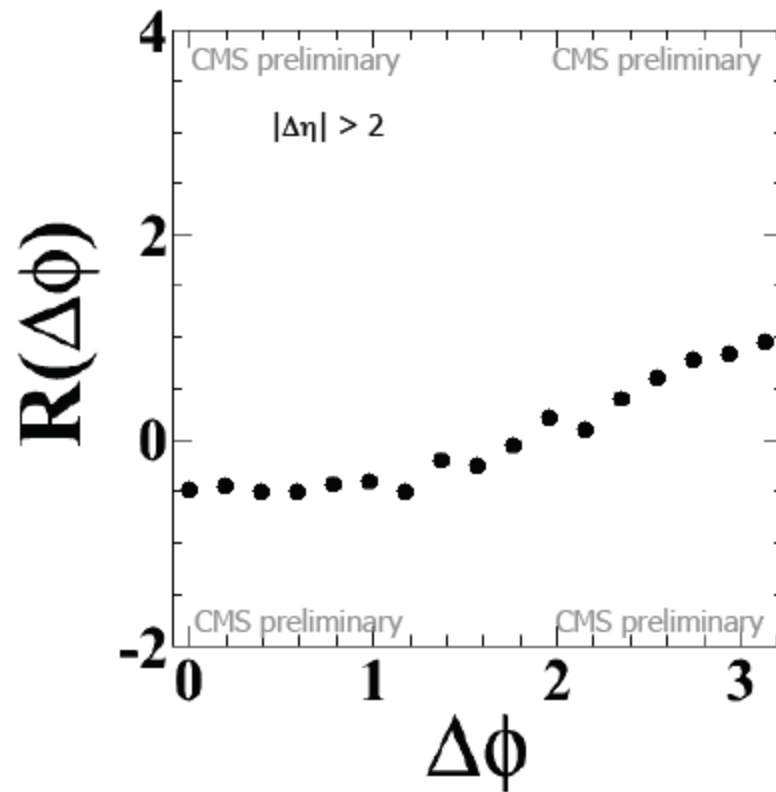
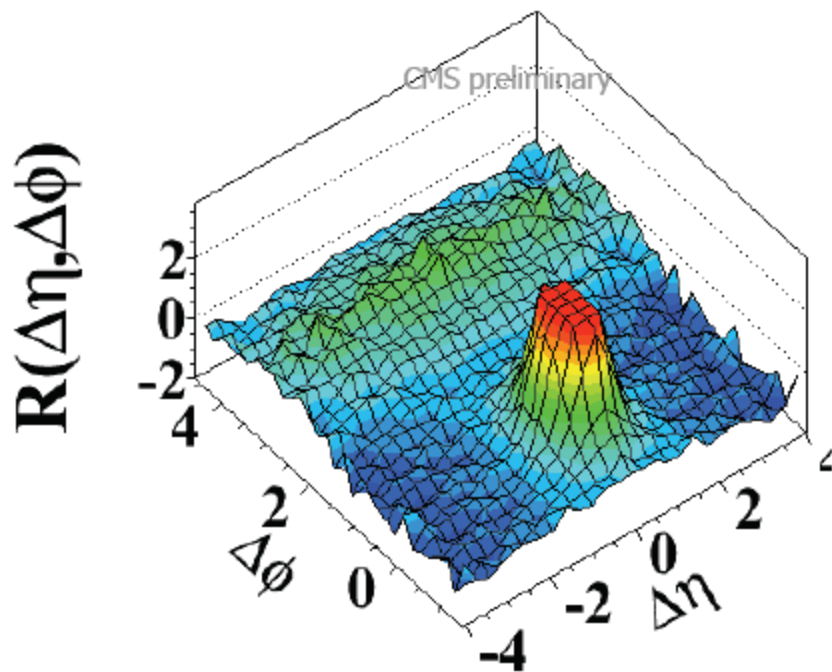


Ridge has no correlations with high  $E_T$  jets



# Multi- jet events

$N_{\text{jet}} \geq 4, N_{\text{trk}} < 50, 1 < p_T < 2 \text{ GeV}/c$



More work needed to explore connection to jet correlations