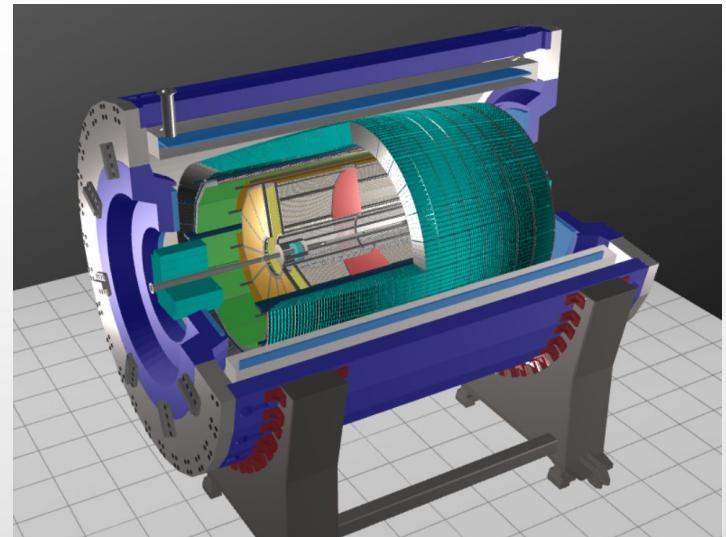


# Участие ОФВЭ в эксперименте MPD-NICA

---

## Ю. Рябов (для ПИЯФ MPD группы)



# Multi-Purpose Detector (MPD) Collaboration



*MPD International Collaboration was established in 2018  
to construct, commission and operate the detector*

**12 Countries, >500 participants, 38 Institutes and JINR**

## Organization

**Acting Spokesperson:** *Victor Riabov*  
**Deputy Spokespersons:** *Zebo Tang, Arkadiy Taranenko*  
**Institutional Board Chair:** *Alejandro Ayala*  
**Project Manager:** *Slava Golovatyuk*

### *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna;*

*A.Alikhanyan National Lab of Armenia, Yerevan, Armenia;*

*SSI "Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*University of Plovdiv, Bulgaria;*

*Tsinghua University, Beijing, China;*

*University of Science and Technology of China, Hefei, China;*

*Huzhou University, Huzhou, China;*

*Institute of Nuclear and Applied Physics, CAS, Shanghai, China;*

*Central China Normal University, China;*

*Shandong University, Shandong, China;*

*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China;*

*University of South China, China;*

*Three Gorges University, China;*

*Institute of Modern Physics of CAS, Lanzhou, China;*

*Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia;*

*Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan;*

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico;*

*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Mexico;*

*Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Mexico;*

*Universidad Autónoma de Sinaloa, Mexico;*

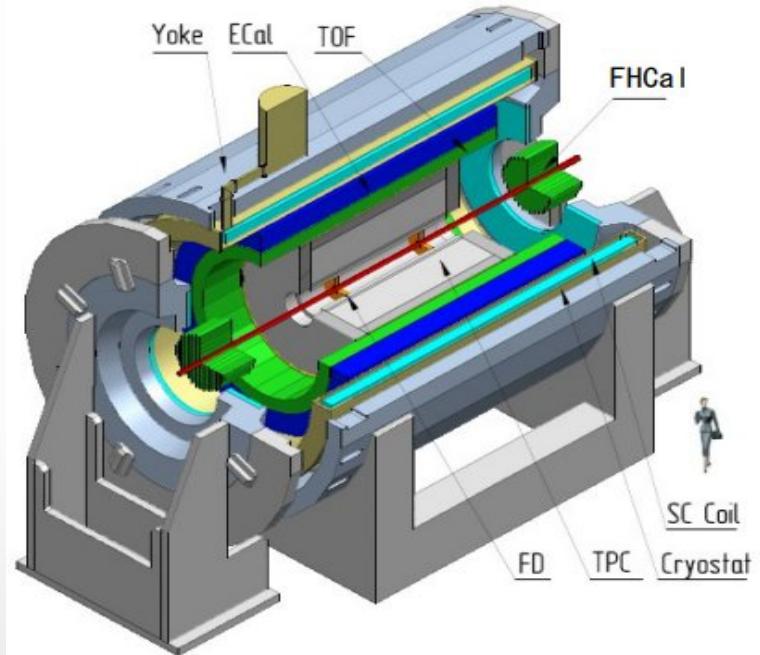
*Universidad de Colima, Mexico;*

*Universidad de Sonora, Mexico;*

*Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Mexico*

*Institute of Applied Physics, Chisinev, Moldova;*

*Institute of Physics and Technology, Mongolia;*



*Belgorod National Research University, Russia;*

*Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia;*

*High School of Economics University, Moscow, Russia*

*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia;*

*Moscow Institute of Science and Technology, Russia;*

*North Ossetian State University, Russia;*

*National Research Center "Kurchatov Institute", Russia;*

*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia;*

*St.Petersburg State University, Russia;*

*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia;*

*Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia;*

*Vinča Institute of Nuclear Sciences, Serbia;*

*Pavol Jozef Šafárik University, Košice, Slovakia*



# Меморандум

- «Соглашение о научно-техническом сотрудничестве в области ядерной физии, физики элементарных частиц и смежных областях» между НИЦ «Курчатовский институт» и ОИЯИ (№ СОГ 23/р 15.08.2018)
 

*(стороны признают важность объединения усилий для проведения научно-исследовательских и инновационных разработок на базе международных проектов класса мега-сайенс на территории Российской Федерации и за рубежом (МЦНИ ПИК, NICA, ИССИ-4, ИГНИТОР, FAIR, XFEL, CERN-LHC и др.)*
- 2021 – меморандум между НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ и коллаборацией MPD на 1 год, продлен (как минимум до 2026 года) в 2023 году специальным дополнением.

## Signatures

The undersigned Parties declare that they agree on to the present Memorandum of Understanding for the MPD Experiment.

For JINR:  
Prof. Vladimir Kekelidze  
JINR Vice Director



Date: 27.09.2021

For the MPD Collaboration:  
Prof. Adam Kisiel  
MPD Collaboration Spokesperson

Date: 24.9.2021

For the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute»:  
Sergey Gorchakov  
Director of NRC «Kurchatov Institute» - PNPI

Date:

Dr. Viktor Riabov  
Group Leader

Date: 16.09.2021

## Addendum 1

To the Memorandum of Understanding

dated June 09<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup>, 2021

between

MPD Collaboration,  
Joint Institute for Nuclear Research  
and  
Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov  
of National Research Centre «Kurchatov Institute»  
(hereinafter – NRC «Kurchatov Institute» - PNPI)

for  
performing the MPD Experiment for Studies of Baryonic Matter at the NICA Collider

## Signatures



For JINR:  
Prof. Vladimir Kekelidze  
JINR Vice Director

Date: 17.02.2023

For the MPD Collaboration:  
Prof. Viktor Riabov  
MPD Collaboration Spokesperson

Date: 16.02.2023

For the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute»:



Sergey Gorchakov  
Director of NRC «Kurchatov Institute» - PNPI  
Yuriy Ryabov  
Group Leader

Date: 09.02.2023

Date: 09.02.2023

# Multi-Purpose Detector (MPD) Collaboration

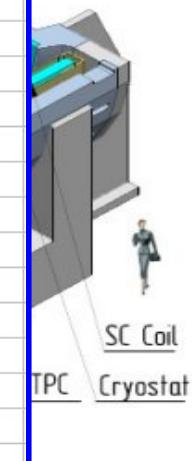


*MPD International Collaboration was established in 2018  
to construct, commission and operate the detector*

**12 Countries >500 participants 38 Institutes and JINR**

1	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Rinat Abdulin abdullin_rr@pnpi.nrcki.ru
2	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Nazar Burmasov nazar.burmasov@cern.ch
3	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Alexander Dyachenko dyachenko_a@mail.ru
4	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Aleksei Ezhilov ezhilov_ae@pnpi.nrcki.ru
5	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Oleg Fedin Oleg.Fedin@cern.ch
6	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Dmitrii Ivanishchev ivanishchev_da@pnpi.nrcki.ru
7	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Alexey Khanzadeev khanzadeev_av@pnpi.nrcki.ru
8	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Leonid Kochenda kochenda_lm@pnpi.nrcki.ru
9	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Dmitrii Kotov dmitriy.kotov@gmail.com
10	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Petr Kravtsov pkravt@gmail.com
11	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Evgeny Kryshen Evgeny.Kryshen@cern.ch
12	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Anna Kyrianova kirianova_as@pnpi.nrcki.ru
13	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Maksim Maksimov maximov_mv@pnpi.nrcki.ru
14	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Mikhail Malayev mikhail.malaev@cern.ch
15	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Victor Maleev maleev_vp@pnpi.nrcki.ru
16	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Yuri Naryshkin naryshkin_yg@pnpi.nrcki.ru
17	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Marina Pokidova pokidova_mv@pnpi.nrcki.ru
18	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Denis Pudzha dennis.pudzha@cern.ch
19	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Yuriy Riabov yuriy.g.ryabov@cern.ch
20	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Andrei Riabov andrei.riabov@cern.ch
21	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Vladimir Samsonov vladimir.samsonov@cern.ch
22	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Alexander Vasilyev vasilliev@gmail.com
23	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Marat Vznuzdaev vznuzdaev@gmail.com
24	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Georgy Zalite goshaza1995@gmail.com
25	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA Mikhail Zhalov m.zhalov@gmail.com
26	RUSSIA Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, RUSSIA / MEPhI Victor Riabov Viktor.Riabov@cern.ch

FHCaI



Universidad de Colima, Mexico;  
Universidad de Sonora, Mexico;

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Mexico

Institute of Applied Physics, Chisinev, Moldova;

Institute of Physics and Technology, Mongolia;

St.Petersburg State University, Russia;

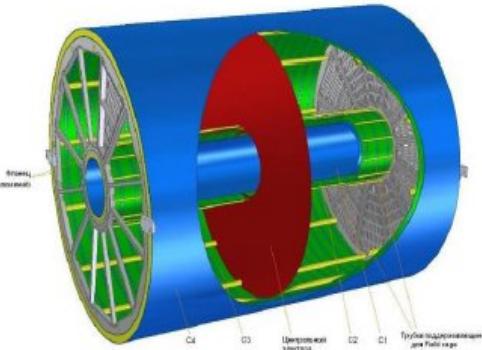
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia;  
Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia;

Nica Institute of Nuclear Sciences, Serbia,  
Pavol Jozef Šafárik University, Košice, Slovakia



# TPC gas system

Карта TPC/ MPD



length	340 см
outer Radii	140 см
inner Radii	27 см
gas	90%Ar+10%CH <sub>4</sub>
drift velocity	5.45 cm / $\mu$ s;
drift time	< 30 $\mu$ s;
# R-O chamb.	12 + 12
# pads/ chan.	<b>95 232</b>
max rate	< 7kGz ( $L = 10^{27}$ )



18.04.2018

TPC MPD gas system was designed in 2014 and assembled at PNPI in 2016. It provides (Ar + 10% Methane) gas mixture to the TPC detector at the correct differential pressure (2mbar). The system operates nominally as a closed circuit gas system with the majority of gas recirculation through the detector. The TPC MPD gas system is the first system designed in our laboratory with two recirculation circuits. The inner circuit provides fast gas mixture exchange in the detector at large flowrate. The outer one provides quality control of the mixture, fresh gas supply, pressure stabilization etc. The slow control for the gas system is based on single DAQ32 module.

<https://lkst.pnpi.nw.ru/projects/nica/tpc/>

# Возможности триггерной системы



PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE NAMED BY B.P. KONSTANTINOV  
OF NATIONAL RESEARCH CENTRE «KURCHATOV INSTITUTE»



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Ya. Berdnikov, D. Ivanishchev, D. Kotov, M. Malaev, V. Riabov, Yu. Ryabov

Задача: Исследование возможностей спектрометра MPD (ст. 1) производить отбор событий в различных сталкивающихся системах при различной энергии.

Особенности столкновений на NICA:

- Малая множественность  $\sim 1000$  на событие ( $Au+Au \sqrt{s_{NN}}=11 \text{ ГэВ}$ )
- Большинство заряженных частиц не релятивистские
- Особые требования к детекторам передней области
- Частота столкновений  $50 \text{ Гц} - 7 \text{ кГц}$

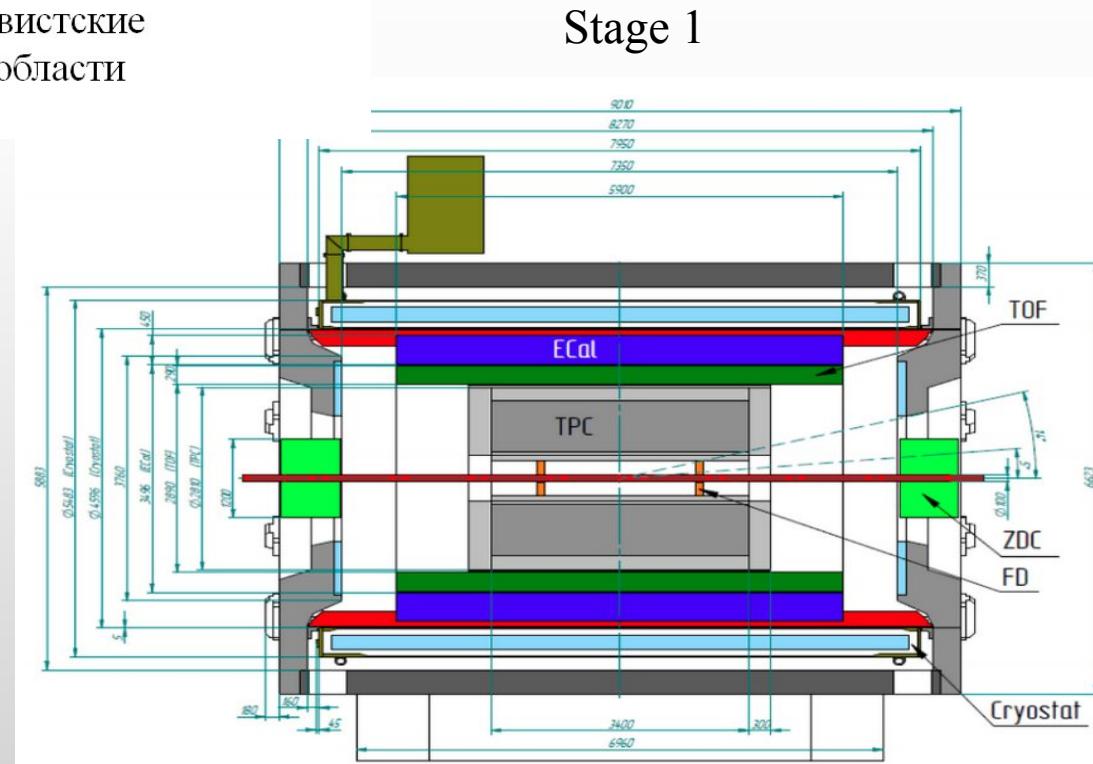
## MPD Триггерные подсистемы

FFD:  $| \vec{\eta} - \vec{\phi} | < 2\pi, 2.7 < | \vec{p}_T | < 4.1$

FHCAL:  $| \vec{\eta} - \vec{\phi} | < 2\pi, 2 < | \vec{p}_T | < 5$

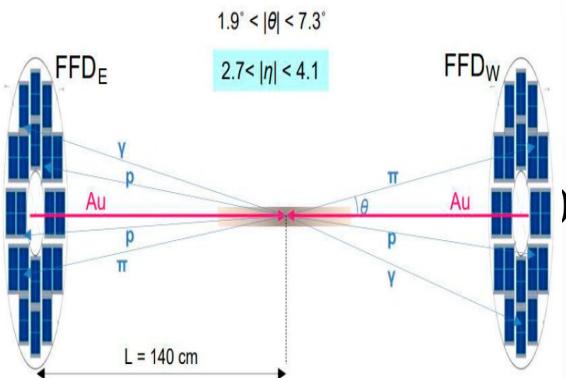
TOF:  $| \vec{\eta} - \vec{\phi} | < 2\pi, | \vec{p}_T | \otimes 1.4$

- Достаточно быстры
- Оснащены подходящей электроникой
- Покрывают различные области псевдобыстрот
- Измеряют разные сигналы
- Дополняют друг друга



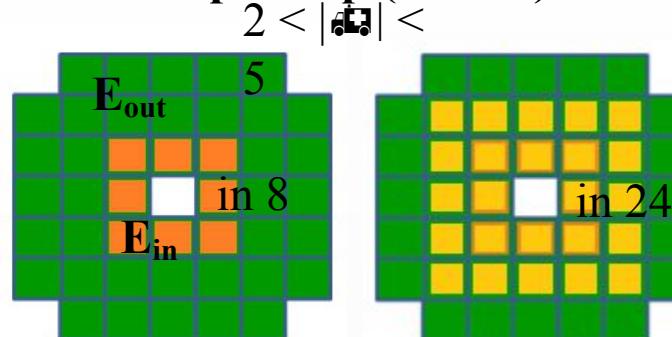
# Возможности триггерной системы

## Быстрый передний детектор (FFD)



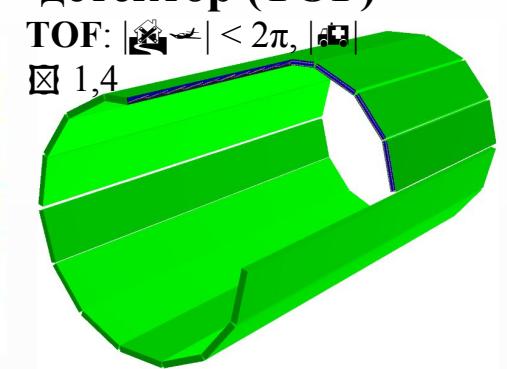
- $2 \times 20$  (черенковских модулей)  $\times 4$  (канала) =  $2 \times 80$  каналов
- Регистрирует фотоны и релятивистские заряженные частицы
- Измеряет  $T_0$  для TOF и EMC
- Измеряет z-вершину
- Проектное временное разрешение  $\leq 50$  пс (временное разрешение TOF  $\leq 60$  пс)
- Разрешение z-вершины  $\sim 2$  см

## Передний адронный калориметр (FHCal)



- $2 \times 44$  калориметрических модулей – многослойная структура перемежающихся слоев свинец/сцинтилятор
- Измерение энергетических и пространственных распределений нуклонов и ядерных фрагментов (спектаторов) – центральность и плоскость реакции
- Временное разрешение  $\leq 1,3$  нс
- Разрешение z-вершины  $\sim 30$  см
- Аксептанс  $>$  FDD
- Энергетическое разрешение  $60\%/\sqrt{E}$

## Время-пролетный детектор (TOF)



- Классический TOF детектор на основе многозazorных резистивных плоских камер (МРПК)
- 14 (секторов)  $\times 2$ (модулей)  $\times 10$  МРПК детекторов =  $2 \times 140$  МРПК детекторов
- Временное разрешение  $\leq 50$ -60 пс
- Идентификация пионов/каонов до 1,5 ГэВ/с
- Идентификация (анти)протонов до 3 ГэВ/с
- Триггерный сигнал – число сработавших детекторов

# Возможности триггерной системы

## ➤ Collision systems:

- p+p, p+Bi, C+C, Xe+Xe and Bi+Bi.
- $\sqrt{s_{NN}} = 4, 7$  and  $11 \text{ GeV}$  ( $9.2 \text{ GeV}$  for results validation).

## ➤ Event generators:

- DCM-QGSM-SMM for p+Bi, C+C, Xe+Xe, Bi+Bi.
  - realistic z-vertex distribution ( $\pm 200 \text{ cm}$ ) with  $\sigma_z \sim 50 \text{ cm}$ .
  - inelastic collisions with  $b \sim 0\text{--}16 \text{ fm}$  ( $\sim 0.5 \times 10^6 \text{ -- } 1 \times 10^6$  events for every collision system).
- PYTHIA8 for p+p and p+Bi (TOF).

## ➤ Particles propagation through MPD:

- Full event reconstruction with default MpdRoot.
- Geant-4.
- FFD, FHCAL and TOF standard procedures as described in Victor Riabov presentations:  
(<https://indico.jinr.ru/event/3448/contributions/18622/attachments/14091/23624/TriggerMassProductions.pdf>)

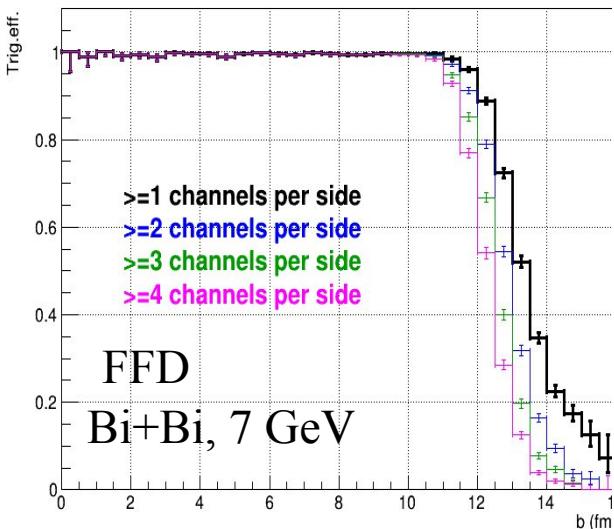
## ➤ Trigger configurations and definition:

- Different combinations of FFD, FHCAL and TOF detectors
- FFD
  - Default is  $\geq 1$  fired channel per side for symmetric and on one side for asymmetric collision system.
  - Optional:  $\geq 2, 3$  or  $4$  modules per or on one side.
  - $|z\text{-vertex}| < 140 \text{ cm}$  (should be wider by  $10\text{--}20 \text{ cm}$  during online selection).
- FHCAL:
  - Default is  $\geq 1$  fired module per side for symmetric and on one side for asymmetric collision system.
  - Optional (per or on one side):  $\geq 2$  modules,  $\geq 1$  module in inner region 8,  $\geq 1$  module in inner region 24.
  - Optional:  $\geq 1$  modules in 8, 24 or 44 inner region,  $\geq 1$  modules in 8 or 24 or 44 inner regions.
  - $|z\text{-vertex}| < 150 \text{ cm}$  (should be wider by  $20\text{--}30 \text{ cm}$  during online selection).
- TOF:
  - Default  $\geq 1$  fired detector.
  - Optional:  $\geq 2, 3, 4$  fired detectors.

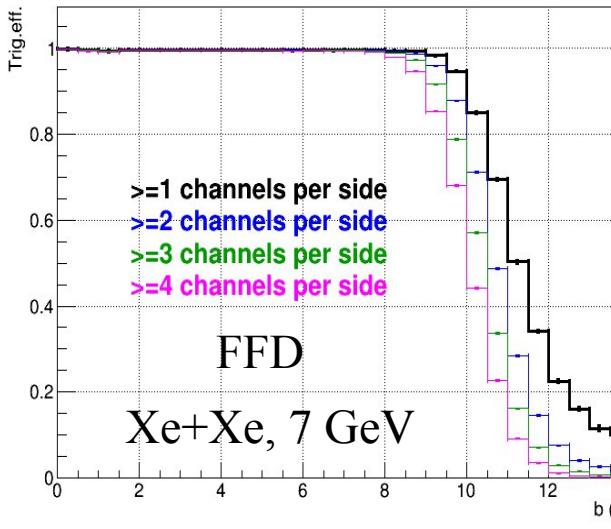
# Возможности триггерной системы

## Trigger efficiency vs impact parameter $b$ (fm)

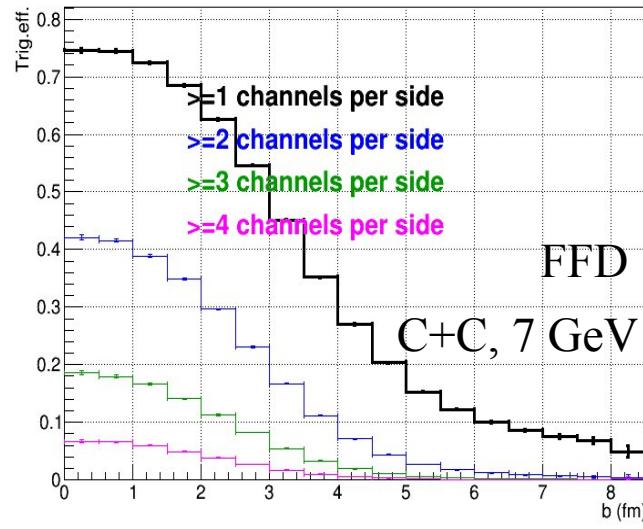
FFD trigger efficiency vs. impact parameter



FFD trigger efficiency vs. impact parameter

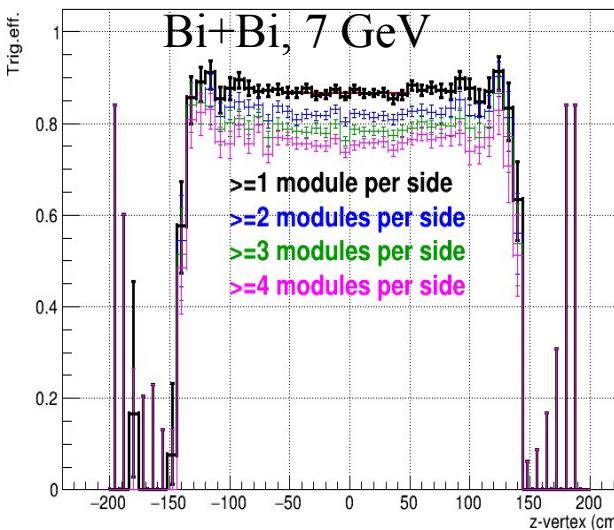


FFD trigger efficiency vs. impact parameter

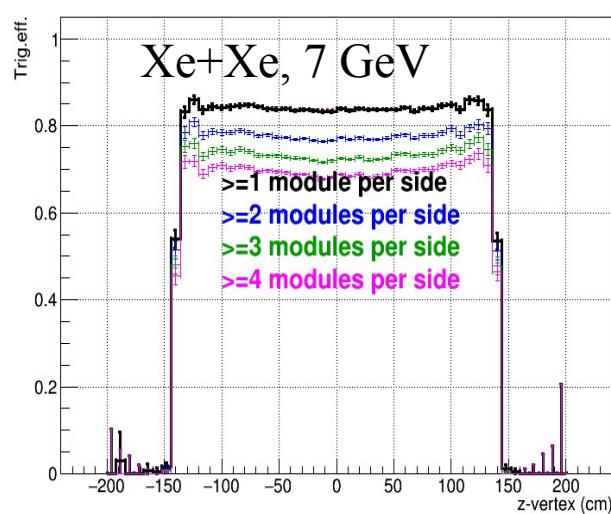


## Trigger efficiency vs z-vertex (cm)

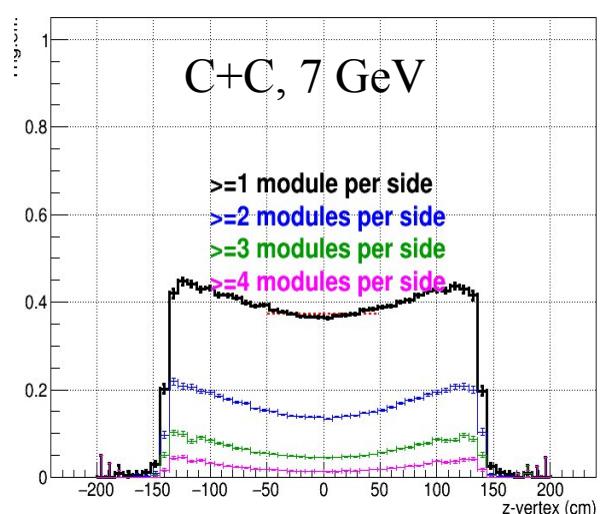
FFD trigger efficiency vs. z-vertex



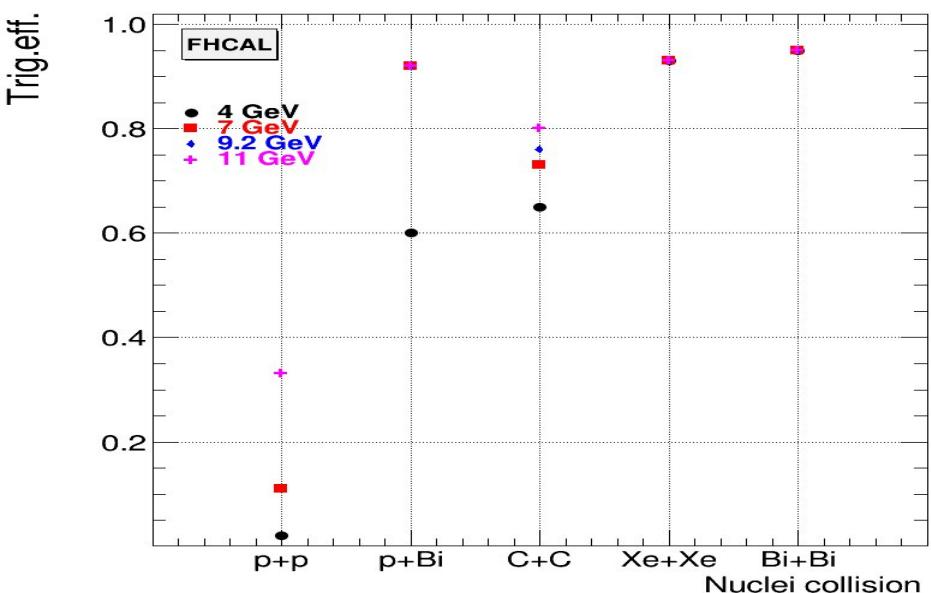
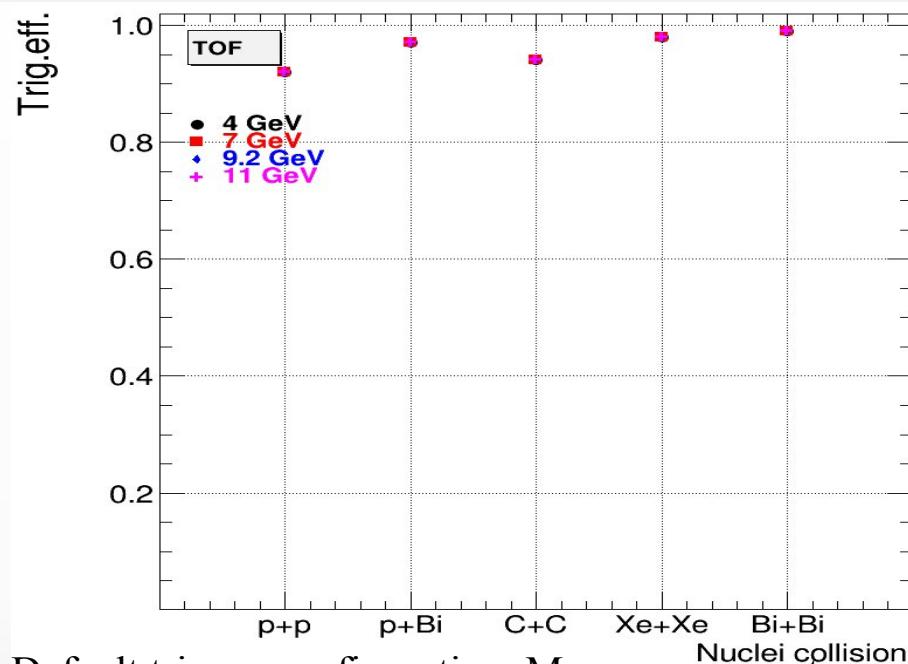
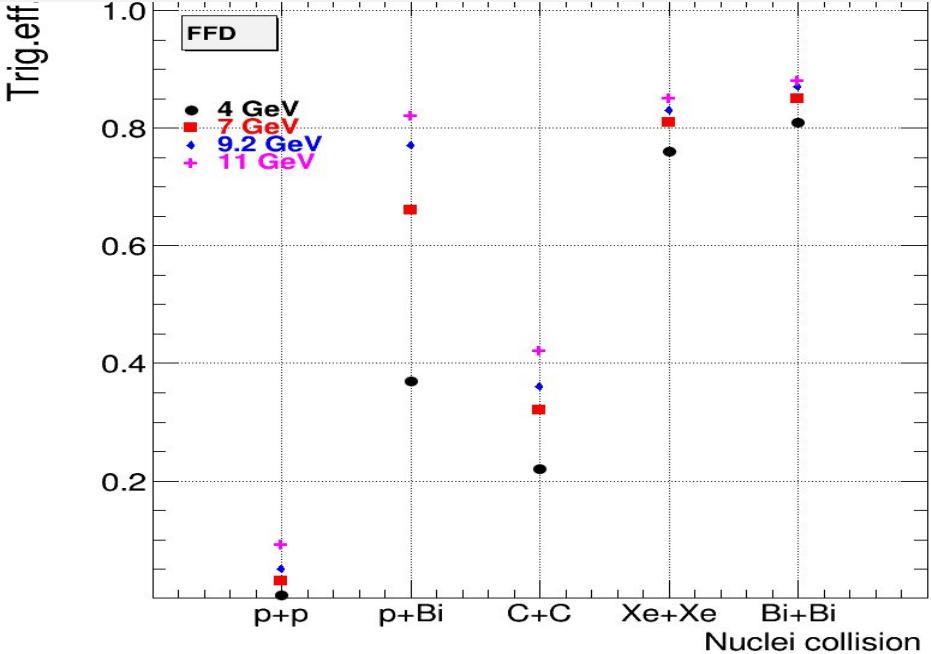
FFD trigger efficiency vs. z-vertex



FFD trigger efficiency vs. z-vertex



# Возможности триггерной системы



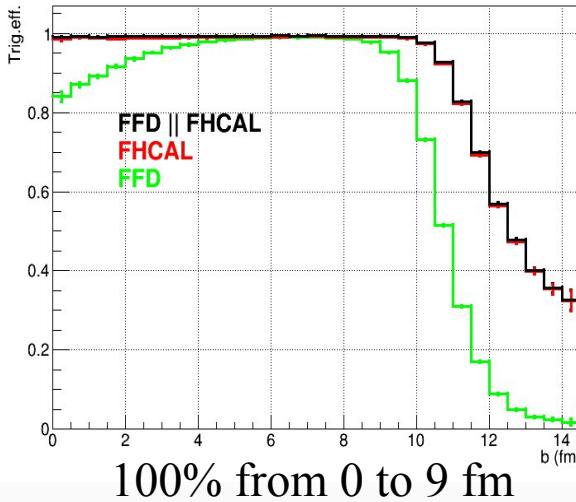
- Default trigger configuration. Mean over z-vertex.
- Trigger efficiencies are decreasing with decreasing  $\sqrt{s_{NN}}$  except TOF and FHCAL in Xe+Xe and Bi+Bi.
- Xe+Xe and Bi+Bi:  
TOF(98-99%)>FHCAL(93-95%)>FFD(76-88%).
- p+p, p+Bi and C+C:  
TOF(92-97%)>FHCAL(2-92%)>FFD(0.5-82%).

# Возможности триггерной системы

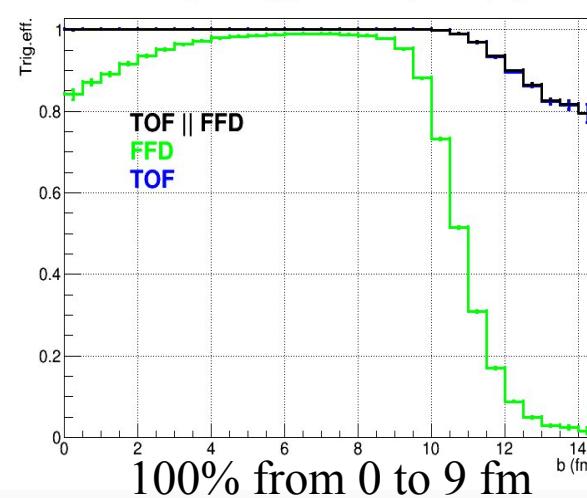
Xe+Xe, 4 GeV

## Trigger efficiency vs impact parameter b (fm)

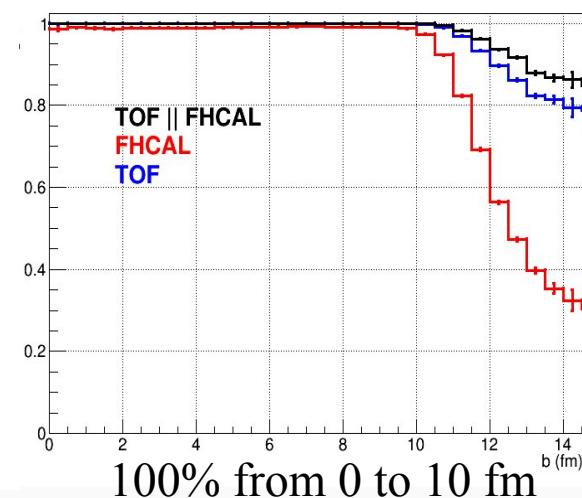
FFD||FHCAL trigger efficiecnv vs. b (fm)



FFD||TOF trigger efficiecnv vs. b (fm)

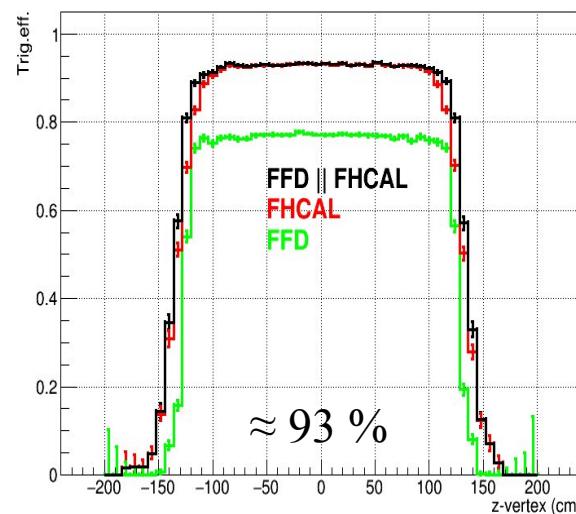


FHCAL||TOF trigger efficiecnv vs. b (fm)



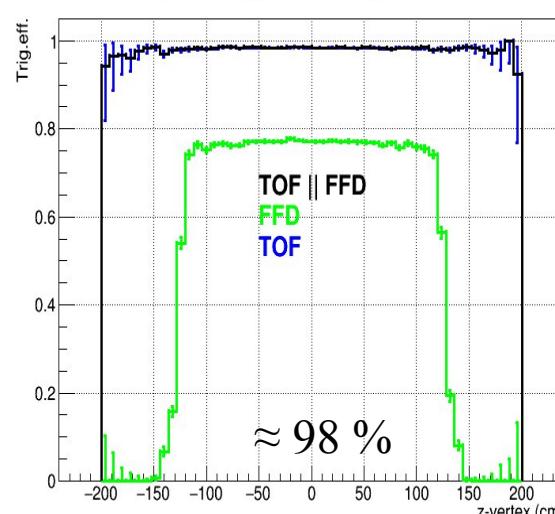
## Trigger efficiency vs z-vertex (cm)

FFD||FHCAL trigger efficiecnv vs. z-vertex

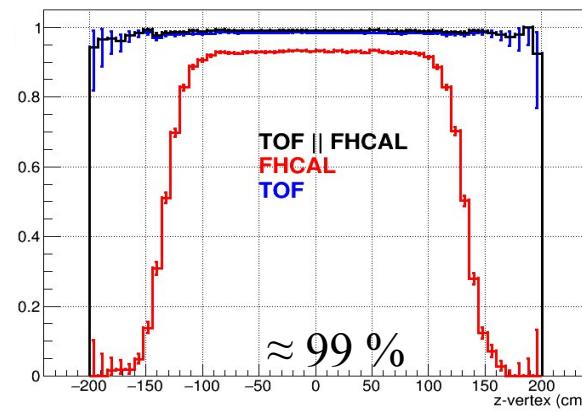


FFD||FHCAL ~ FHCAL

FFD||TOF trigger efficiecnv vs. z-vertex

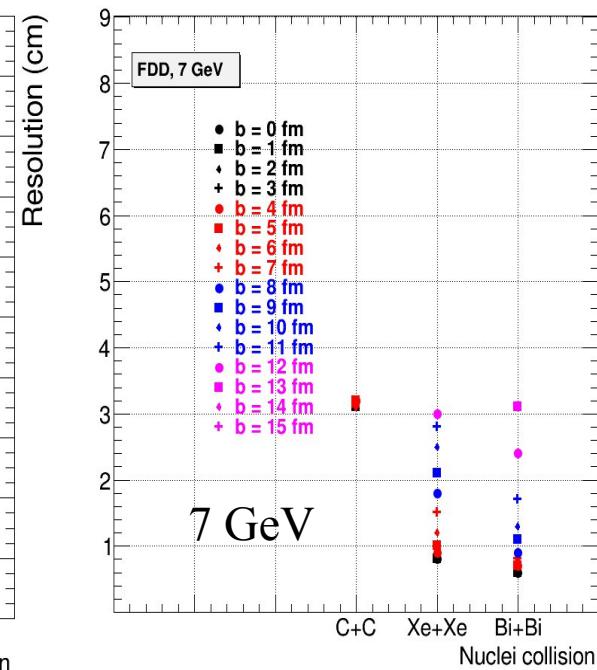
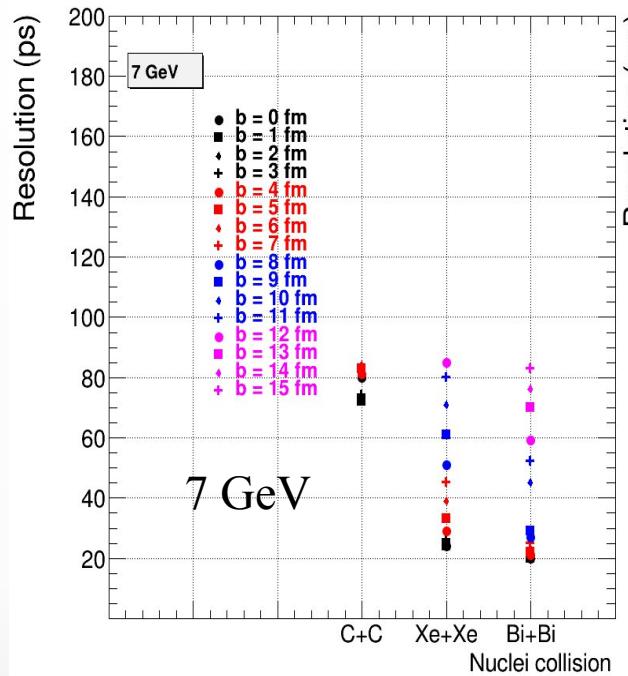
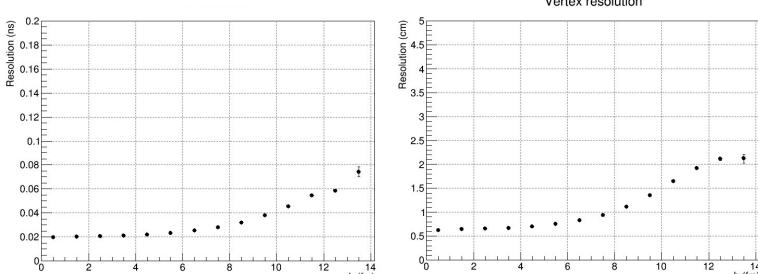
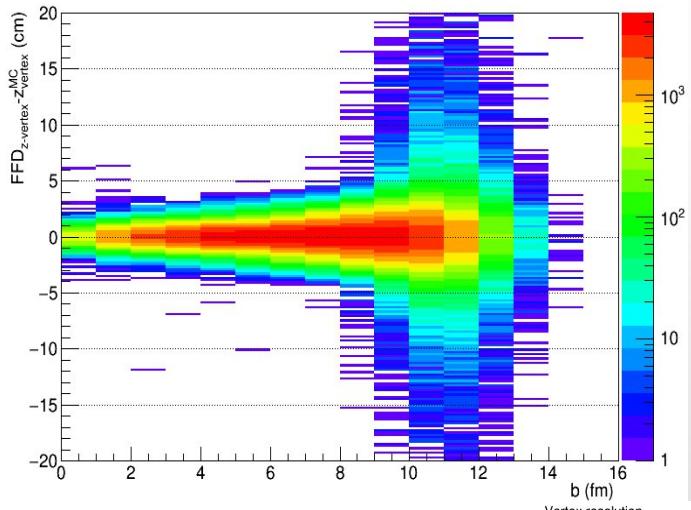
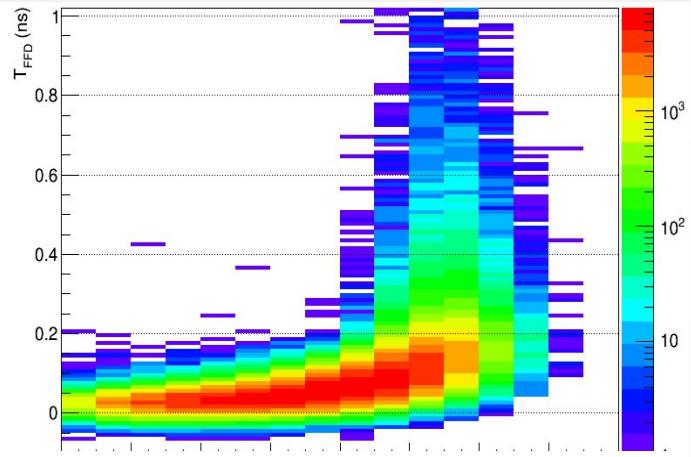


FHCAL||TOF trigger efficiecnv vs. z-vertex



TOF||FHCAL > TOF,  
especially in the region of the  
most peripheral collisions

# Возможности триггерной системы



- $T_0$  resolution is worsen with increasing impact parameter and decreasing  $\sqrt{s}_{NN}$ .

- Bi+Bi and Xe+Xe:  $> 15 - 50$  ps for the most central and  $< 45 - 85$  ps for the most peripheral collisions.

- z-vertex resolution is worsen with increasing impact parameter and decreasing  $\sqrt{s}_{NN}$ .

- Bi+Bi and Xe+Xe:  $> 0.5 - 1$  cm for the most central and  $< 1.5 - 4$  cm for the most peripheral collisions.

# Возможности триггерной системы

- ✓ Отбор событий в столкновениях тяжелых ядер и ядер промежуточной массы при  $\sqrt{s_{NN}} = 4,5,6,7, 9,2$  и  $11$  ГэВ может осуществляться с помощью подсистем FFD, FHCAL и их комбинаций
- ✓ В столкновениях  $Xe + Xe$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 4$  ГэВ FDD не имеет области со 100%-ной эффективностью в зависимости эффективности триггера от прицельного параметра, необходимо привлекать TOF.
- ✓ Эффективность триггера FFD и FHCAL недостаточно высока для выбора событий в легких и асимметричных системах столкновений ( $p+p$ ,  $p+Bi$  и  $C+C$ ), поэтому TOF имеет решающее значение для выбора событий в таких системах.
- ✓ Логика, основанная на сочетании TOF и FHCAL в конфигурации по умолчанию, является наиболее перспективной.
- ✓ Добавление FFD к этой комбинации незначительно увеличивает эффективность.
- ✓ Разрешение FFD по времени ( $T0$ ): 15–150 пс в зависимости от центральности и системы столкновений.
- ✓ Разрешение z-вершины FFD: 0,5–8 см. Разрешение z-вершины FHCAL составляет около 20–40 см.

# Resonances in heavy-ion collisions



PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE NAMED BY B.P. KONSTANTINOV  
OF NATIONAL RESEARCH CENTRE «KURCHATOV INSTITUTE»



ПОЛИТЕХ  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Ya. Berdnikov, D. Ivanishchev, D. Kotov, M. Malaev, V. Riabov, Yu. Ryabov

- Wide variety of resonances in the PDG, most often/easily measured are:

$\rho(770)$   $K^*(892)^0$   $K^*(892)^+$   $\phi(1020)$   $\Sigma(1385)^\pm$   $\Lambda(1520)$   $\Xi(1530)$



Copiously produced in heavy-ion collisions at  $\sim$  GeV energies, large branching ratios in hadronic decay channels  $\rightarrow$  possible to measure

Particle	Mass (MeV/c <sup>2</sup> )	Width (MeV/c <sup>2</sup> )	Decay	BR (%)
$\rho^0$	770	150	$\pi^+\pi^-$	100
$K^{*+}$	892	50.3	$\pi^+K_s$	33.3
$K^{*0}$	896	47.3	$\pi K^+$	66.7
$\phi$	1019	4.27	$K^+K^-$	48.9
$\Sigma^{*+}$	1383	36	$\pi^+\Lambda$	87
$\Sigma^{*-}$	1387	39.4	$\pi\Lambda$	87
$\Lambda(1520)$	1520	15.7	$K^-\bar{p}$	22.5
$\Xi^{*0}$	1532	9.1	$\pi^+\Xi^-$	66.7

Probe reaction dynamics and particle production mechanisms vs system size and

$\Theta_{SNN}$ :

- ✓ hadron chemistry and strangeness production,  $\Xi$  with hidden strangeness is one of the key probes
- ✓ reaction dynamics and shape of particle  $p_T$  spectra,  $p/K^*$ ,  $p/\Xi$  vs  $p_T$
- ✓ lifetime and properties of the hadronic phase
- ✓ spin alignment of vector mesons in rotating QGP (polarization of quarks from spin-orbital interactions)
- ✓ flow, comparison with  $e^+e^-$  measurements, jet quenching, background for other probes etc

- Resonances have small lifetime of  $\tau \sim 1 - 45$  fm/c, part of them decays in the fireball

increasing lifetime  $\longrightarrow$

	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\Sigma(1385)$	$\Lambda(1520)$	$\Xi(1530)$	$\phi(1020)$
$\tau$ (fm/c)	1.3	4.2	5.5	12.7	21.7	46.2
$\sigma_{\text{rescatt}}$	$\sigma_\pi\sigma_\pi$	$\sigma_\pi\sigma_K$	$\sigma_\pi\sigma_\Lambda$	$\sigma_K\sigma_p$	$\sigma_\pi\sigma_\Xi$	$\sigma_K\sigma_K$

Reconstructed resonance yields in heavy ion collisions are defined by:

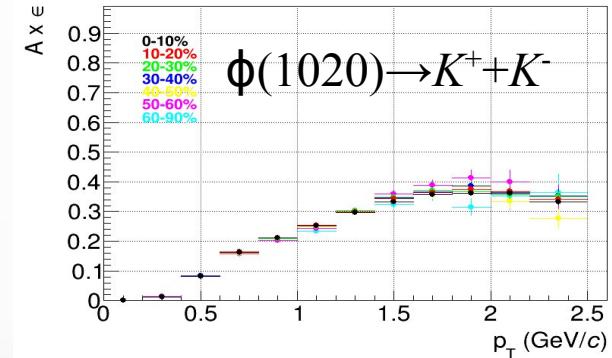
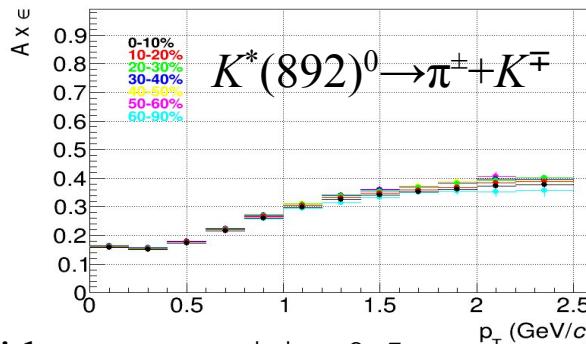
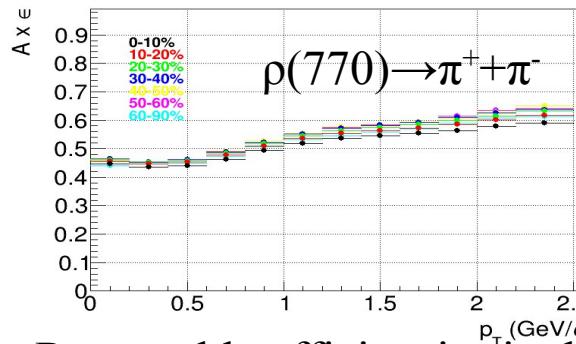
- ✓ resonance yields at chemical freeze-out
- ✓ hadronic processes between chemical and kinetic freeze-outs:

**rescattering:** daughter particles undergo elastic scattering or pseudo-elastic scattering through a different resonance  $\hookrightarrow$  parent particle is not reconstructed  $\hookrightarrow$  loss of signal

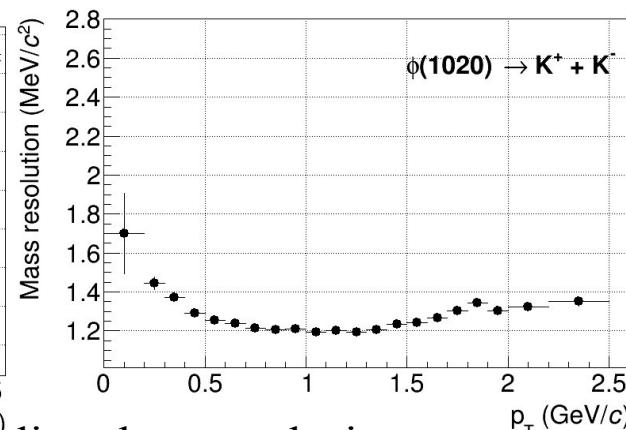
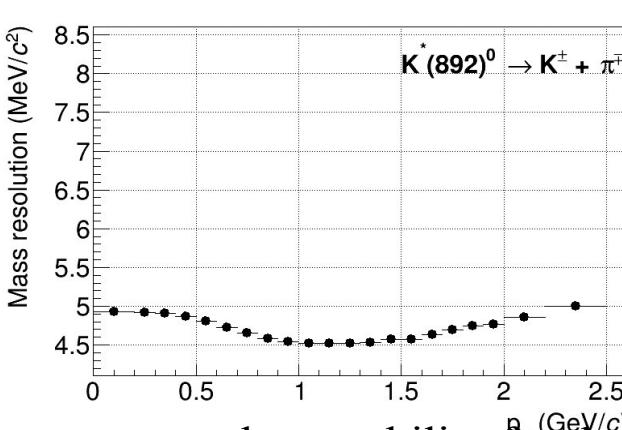
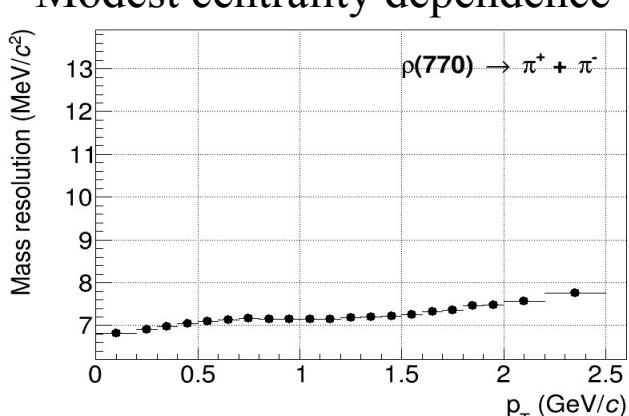
**regeneration:** pseudo-elastic scattering of decay products ( $\Xi K \hookrightarrow K^*0$ ,  $KK \hookrightarrow \Xi$  etc.)  $\hookrightarrow$  increased yields

# Reconstruction efficiencies and Mass resolutions

- Full chain simulation and reconstruction with UrQMD v.3.4 (BiBi@9.2 GeV, 50M events)
- Particles propagation through the MPD with ‘mpdroot’ (Geant v.4):
  - ✓ realistic simulation of subsystem response (raw signals)
  - ✓ track/signal reconstruction and pattern recognition
- Typical reconstruction efficiencies ( $A \times \epsilon$ ) at different centralities,  $|y| < 0.5$



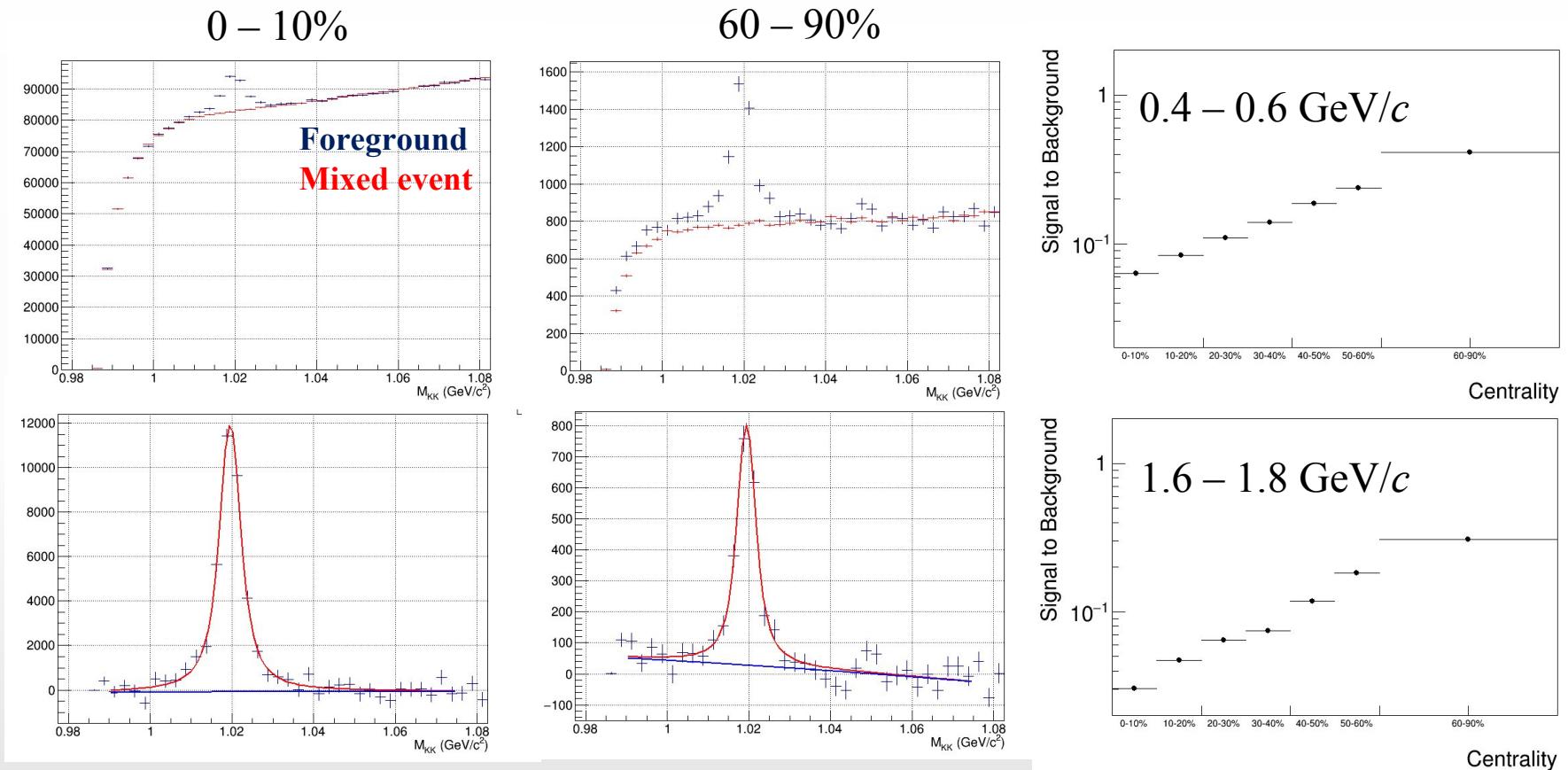
- Reasonable efficiencies in the wide  $p_T$  range,  $|y| < 0.5$
- Measurements are possible from 0 momentum for  $K^*(892)^0$ ,  $\rho(770)$  and from  $0.2 - 0.4$  GeV/c for  $\phi(1020)$
- Modest centrality dependence



- Mass resolution is good enough to preserve the capability for the line shape analysis

# $\phi(1020)$ , Reconstructed peaks

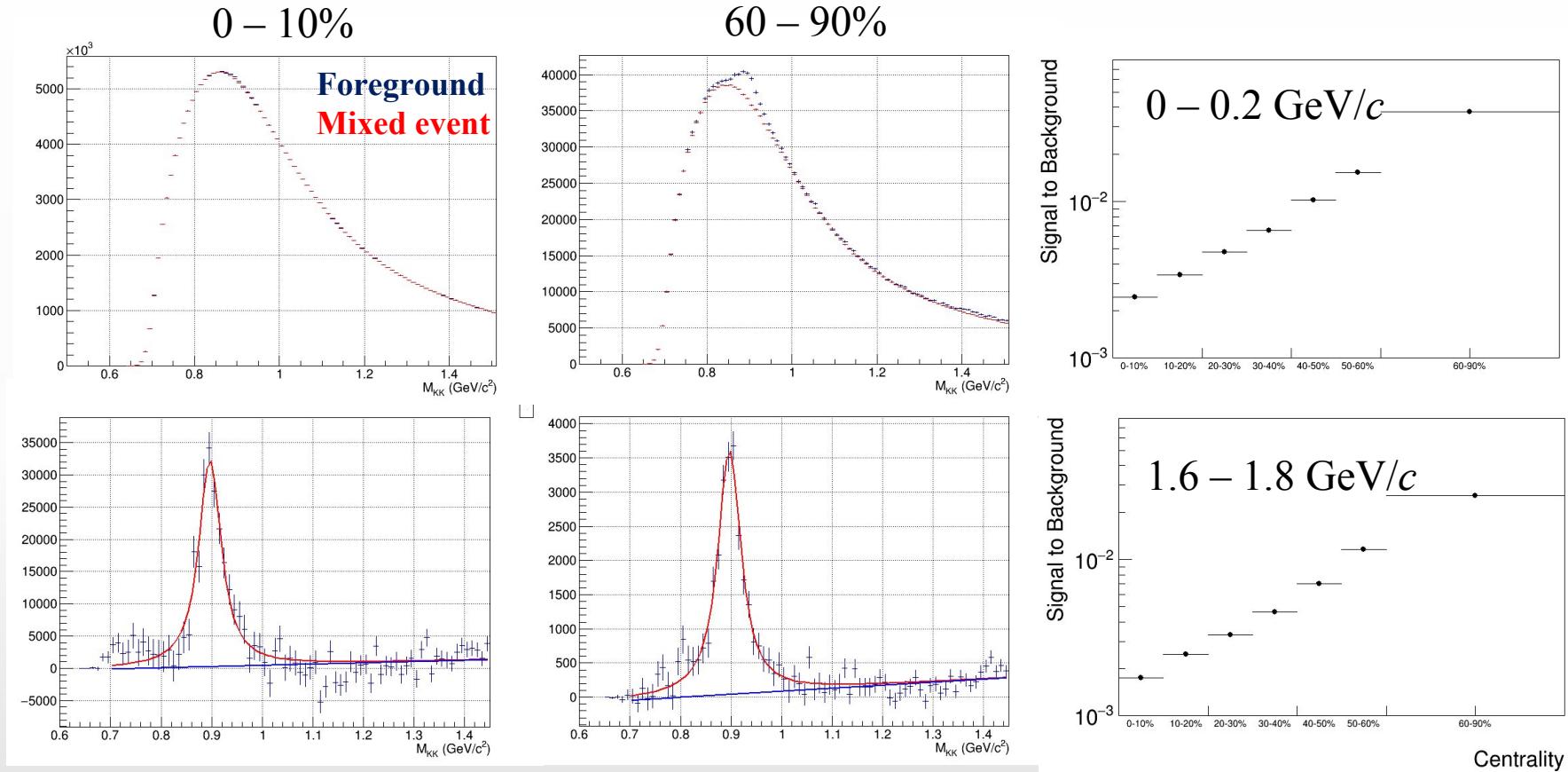
- Full chain simulation and reconstruction,  $p_T = 0.4 - 0.6 \text{ GeV}/c$ ,  $\phi(1020) \rightarrow K^+ + K^-$ ,  $|y| < 0.5$



- Mixed-event combinatorial background is scaled to foreground at high mass and subtracted
- Distributions are fit to Voigtian function + polynomial (mass resolution fixed to estimated value,  $\Gamma$  – free parameter)
- Signal can be reconstructed at  $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$ , high- $p_T$  reach is limited by available statistics
- S/B ratios deteriorates with increasing centrality

# $K^*(892)^0$ , reconstructed peaks

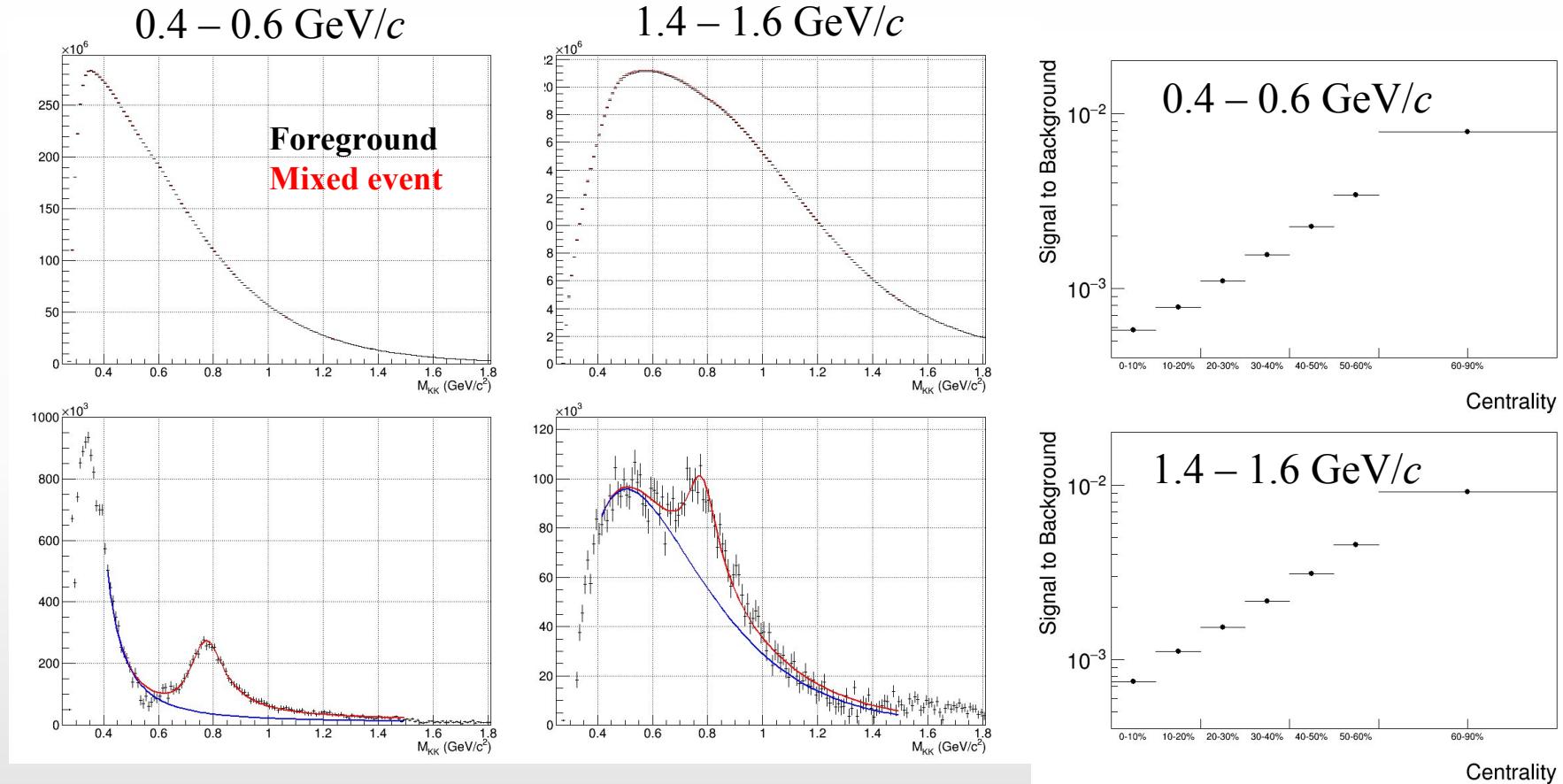
- Full chain simulation and reconstruction,  $p_T = 0.0 - 0.2 \text{ GeV}/c$ ,  $K^*(892)^0 \rightarrow \pi^\pm + K^\mp$ ,  $|y| < 0.5$



- Mixed-event combinatorial background is scaled to foreground at high mass and subtracted
- Distributions are fit to Voigtian function + polynomial (mass resolution fixed to estimated value,  $\Gamma$  – free parameter)
- Signal can be reconstructed at  $p_T > 0$ , high- $p_T$  reach is limited by available statistics
- S/B ratios deteriorates with increasing centrality

# $\rho(770)$ , reconstructed peaks

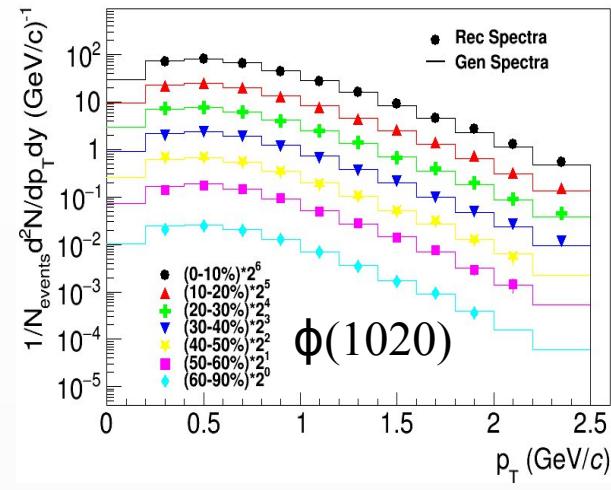
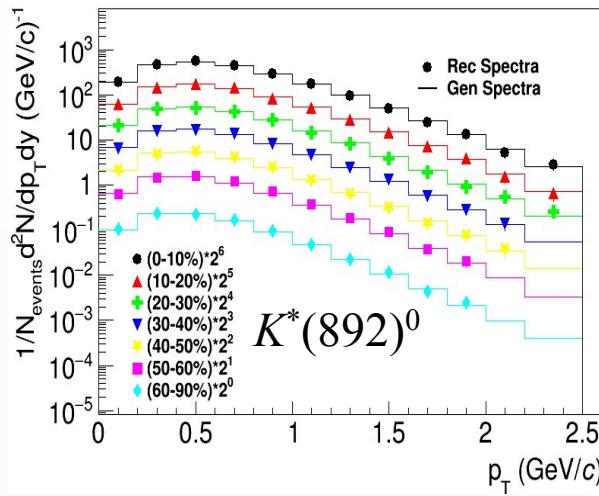
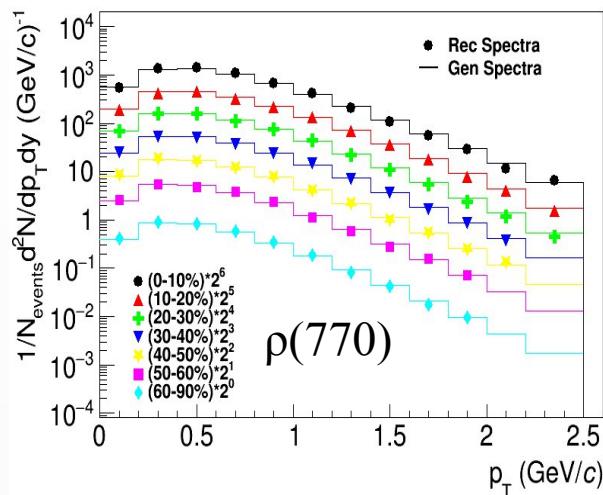
- Full chain simulation and reconstruction, centrality 0-10%,  $\rho(770) \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ,  $|y| < 0.5$



- Mixed-event combinatorial background is scaled to foreground at high mass and subtracted
- Distributions are fit to Voigtian function + polynomial (mass resolution fixed to estimated value,  $\Gamma$  – free parameter)
- Signal can be reconstructed at  $p_T > 0$ , high- $p_T$  reach is limited by available statistics
- S/B ratios deteriorates with increasing centrality

# Production spectra and MC closure test

- Full chain simulation and reconstruction, ranges are limited by the possibility to extract signals,  $|y| < 0.5$



- Reconstructed spectra match the generated ones within uncertainties
- First measurements for resonances in centrality dependent analysis will be possible with accumulation of  $\sim 10^8$  Bi+Bi@9.2 GeV events
- Measurements are possible starting from  $\sim$  zero momentum sample most of the yield, sensitive to possible modifications

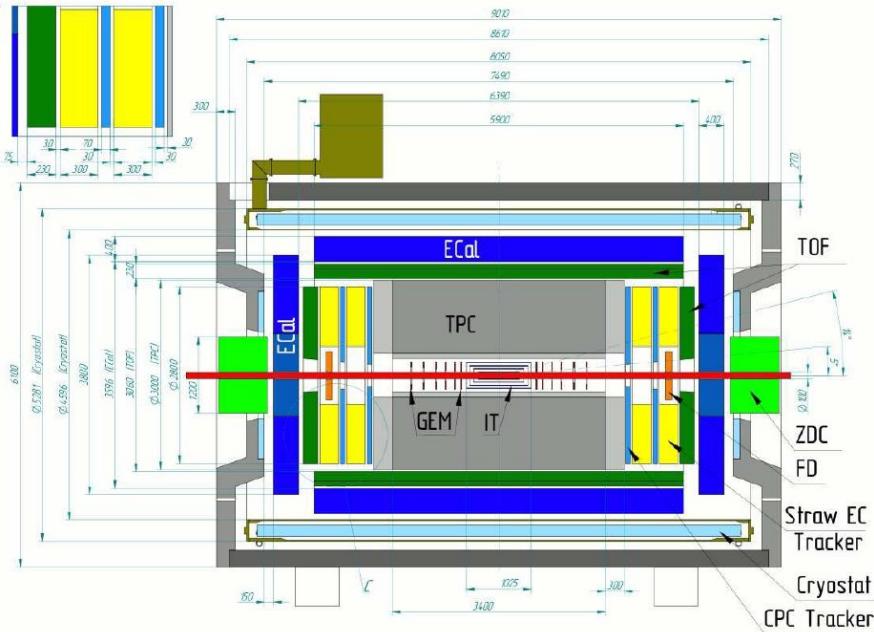
## Conclusions and outlook

- Measurement of resonances contribute to the MPD physical program
  - ✓ hadronic phase properties, strangeness production, hadronization mechanisms and collectivity, hydrochemistry, spin alignment etc ...
- First measurements for  $\rho(770)$ ,  $K^*(892)^0$ ,  $\phi(1020)$  resonances in centrality dependent analysis will be possible with  $\sim 10^8$  sampled Bi + Bi collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  GeV
- Measurements are possible starting from very low momenta (for most of the cases from zero momenta) with decent mass resolution → high sensitivity to different physics phenomena most prominent at low  $p_T$
- Feasibility study of the reconstruction of other resonances such as  $K^*(892)^\pm \rightarrow \pi^\pm K_s$ ,  $\Sigma(1385)^\pm \rightarrow \pi^\pm \Lambda$ ,  $\Lambda(1520) \rightarrow p K^-$  in Bi + Bi collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  GeV is required for systematic study of resonance production and is in progress

# Форвардный трековый детектор.

O. Fedin, E. Kryshen, Yu. Riabov, N. Burmasov, M. Zhalov

Задача: разработка концепции форвардных трековых детекторов для эксперимента MPD.



## On straw tracker:

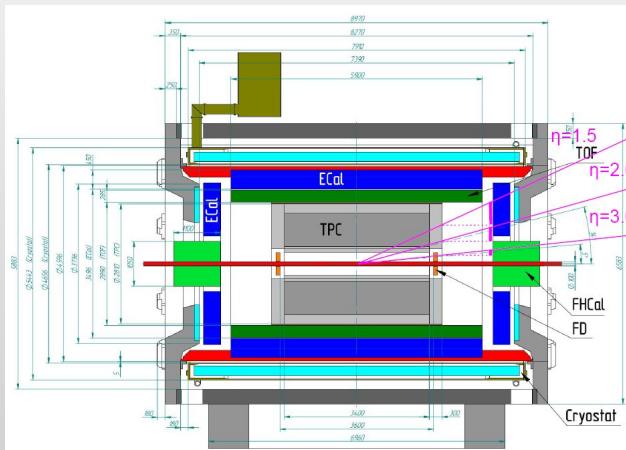
- V. Kekelidze, V. Peshekhonov, N. Topilin, Phys. Part. Nucl. Lett. 9 (2012) 180
- J. Fedorishin, PoS Baldin ISHEPPXXII (2015) 130

## On cathod pad chambers:

- J. Fedorishin, O. Rogachevsky, Y. Kiryushin, PoS Baldin ISHEPP-XXI (2012) 004

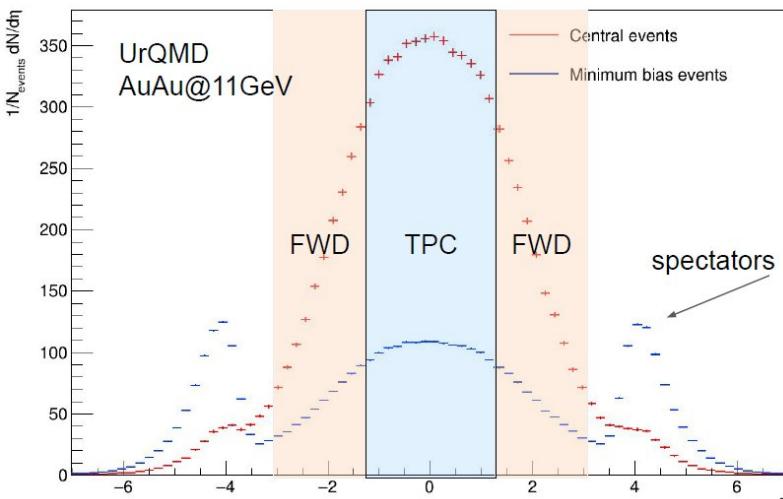
- ✓ Были исключены в финальном варианте первой стадии спектрометра;

Status and initial physics..., EPJA 58 (2022) 140



# Форвардный трековый детектор.

## Pseudorapidity coverage

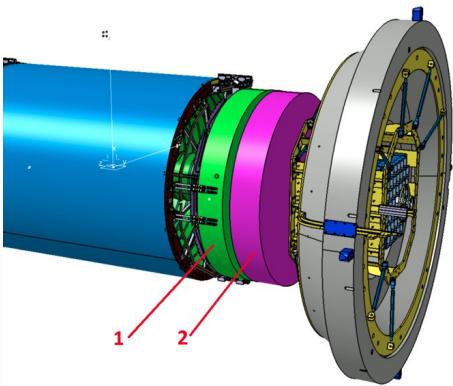


- ❖ ТРС позволяет регистрировать примерно 55% частиц, рождающихся в центральных столкновениях. Форвардный трековый детектор может поднять этот показатель > 80 %.
- ❖ Позволяет улучшить точность различных наблюдаемых и открывает возможности для изучения новых эффектов:
  - ✓ Определение полных выходов и отношений выходов частиц и тестирование различных эффектов статистической модели, таких как the kink, the horn, the step, the dale и др.;
  - ✓ Расширенный диапазон по псевдобыстроте открывает возможность исследований барионной аномалии в форвардной области в диапазоне импульсов от 1 до 4 ГэВ, где с точки зрения модели коалесценции оказывается важен именно полный импульс частиц;

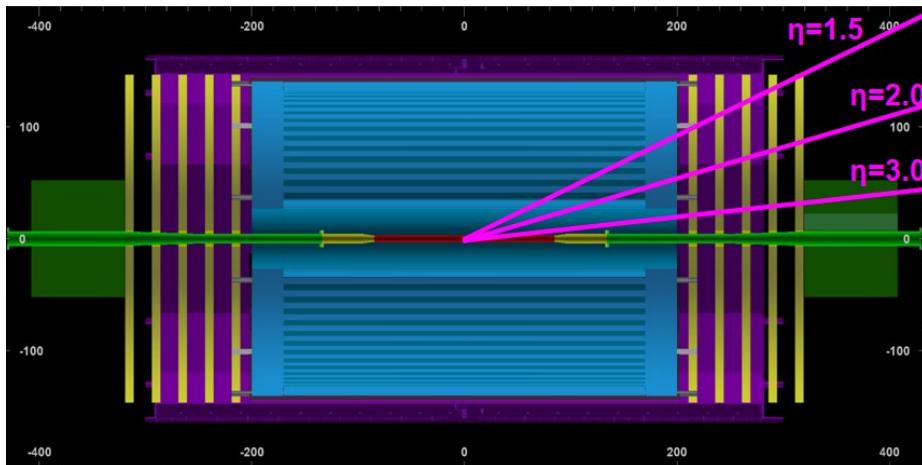
- ✓ Расширенный диапазон по псевдобыстроте открывает возможность исследований барионной аномалии в форвардной области в диапазоне импульсов от 1 до 4 ГэВ, где с точки зрения модели коалесценции оказывается важен именно полный импульс частиц;
- ✓ Расширяет возможности исследования двухчастичных корреляций, так как позволяет лучше изолировать пик, связанный с корреляциями частиц в струях и распадах резонансов. Кроме того, расширенный диапазон по псевдобыстроте значительно увеличивает статистику в исследованиях многочастичных корреляций;
- ✓ Важно для прецизионных измерений зависимости направленного потока (коэффициента  $v_1$ ) от псевдобыстроты, изменение знака которого ожидается при энергиях коллайдера NICA;
- ✓ Измерения полных выходов частиц также важны для исследований флуктуаций барионного заряда и поиска критической точки на диаграмме ядерной материи;
- ✓ Позволяет расширить программу других исследований, например позволяет исследовать зависимость поляризации  $\Psi$ -гиперонов от быстроты, изучать различные аспекты непертурбативной КХД, такие как дифракционное рождение частиц, рождение инстантона и т.д.;
- ✓ Позволит более точно определять центральность столкновений и плоскость реакции;
- ✓ Внедрение триггерной электроники для форвардного трекера также позволит значительно улучшить триггерные возможности эксперимента, особенно в столкновениях малых систем;
- ✓ Работа форвардного детектора в режиме непрерывного считывания может значительно увеличить статистику, набираемую в протон-протонных столкновениях, что также позволит изучать различные аспекты физической программы эксперимента SPD.

# Форвардный трековый детектор.

## Limitations from realistic 3D model



- Radial limitations:
  - $R_{\text{inner}} = 357 \text{ mm}$
  - $R_{\text{outer}} = 1300 \text{ mm}$
- Two volumes possible:
  - Green: z from 2100 to 2450 mm
  - Pink: z from 2550 to 2950 mm
  - The gap due to beam pipe support (can be eliminated if beam pipe is fixed to the tracker volume)
- Resulting pseudorapidity coverage:
  - $\eta_{\text{min}} = 1.55$
  - $\eta_{\text{max}} = 2.47$



Разрешение по импульсу для прототипа форвардного трекера было исследовано с помощью пакета ACTS (A Common Tracking Software project). Пакет ACTS предоставляет набор инструментов для высокоуровневой реконструкции треков, включая фильтр Калмана для определения параметров треков, инструменты для поиска первичных трековых сегментов, комбинаторный фильтр Калмана для поиска треков, а также алгоритмы реконструкции вершин. Кроме того, пакет ACTS содержит простой и быстрый транспортный алгоритм FATRAS, который позволяет моделировать траектории частиц в магнитном поле с учетом потерь энергии и отклонения траектории заряженных частиц в веществе в результате многократного рассеяния.

## Getting used to ACTS tracking algorithms...

Considering “ideal” tracker:

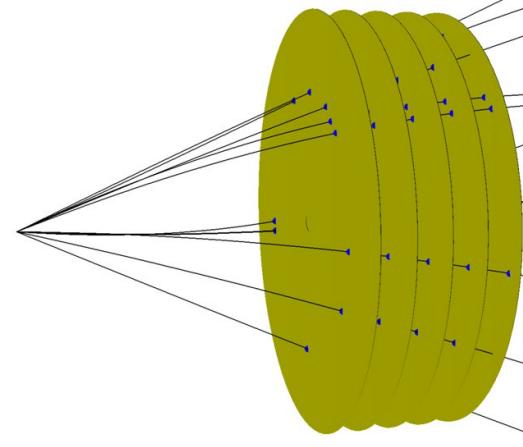
- 5 tracking layers placed between 210 and 300 cm
- $R_{\text{inner}} = 35.7 \text{ cm} \rightarrow \eta_{\text{max}} = 2.47$
- $R_{\text{outer}} = 130 \text{ cm} \rightarrow \eta_{\text{min}} = 1.55$
- Thickness per layer: 200  $\mu\text{m}$  silicon  $\sim 0.2\% X_0$
- Gaussian smearing in x and y with  $\sigma = 80 \mu\text{m}$

Simulation config:

- Particle gun ( $\pi$  or  $p$ ) with  $p_T$  from 0.1 to 1 GeV
- Build-in fatras transport (only EM processes)
- Seed finding using hits on first three layers (adopted seed finding algorithm for cylindrical layers)
- Track finding with combinatorial Kalman filter

Study:

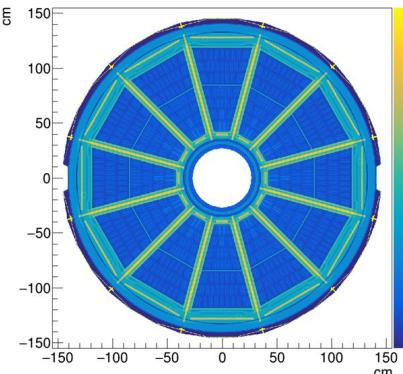
- seeding and tracking efficiency vs  $p_T$  and  $\eta$
- $p_T$  resolution vs  $p_T$  and  $\eta$
- pulls (residuals normalized to estimated uncertainty)



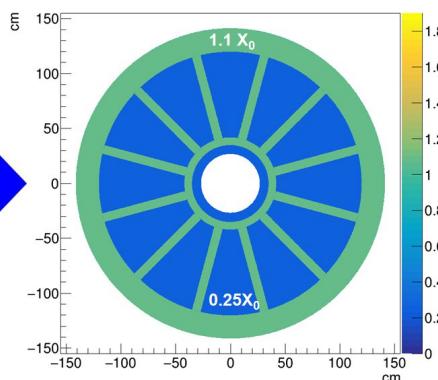
# Форвардный трековый детектор.

## Toy TPC model with realistic endcap radiation length

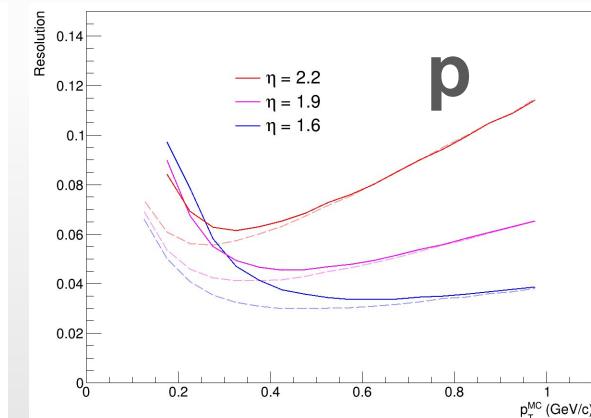
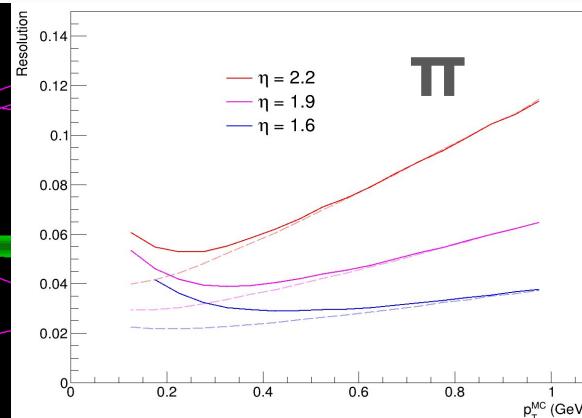
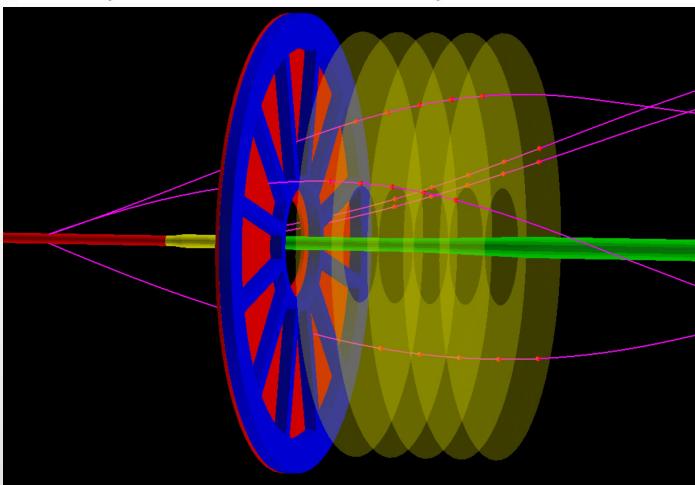
Integrated radiation length:  $160 < z < 200$  cm



Integrated radiation length:  $160 < z < 200$  cm



- Toy model with ROC-like and Frame-like layers



- Using standard fairroot tools:
  - particle gun with geantinos
  - fRun->SetRadLenRegister(kTRUE)
  - Analysing “RadLen” branch with TClonesArray of "FairRadLenPoint"
- All structures ( e.g. FEC) are clearly visible
- $\sim 0.2\text{--}0.3 X_0$  in ROC region
- $\sim 1.1 X_0$  in the frame region

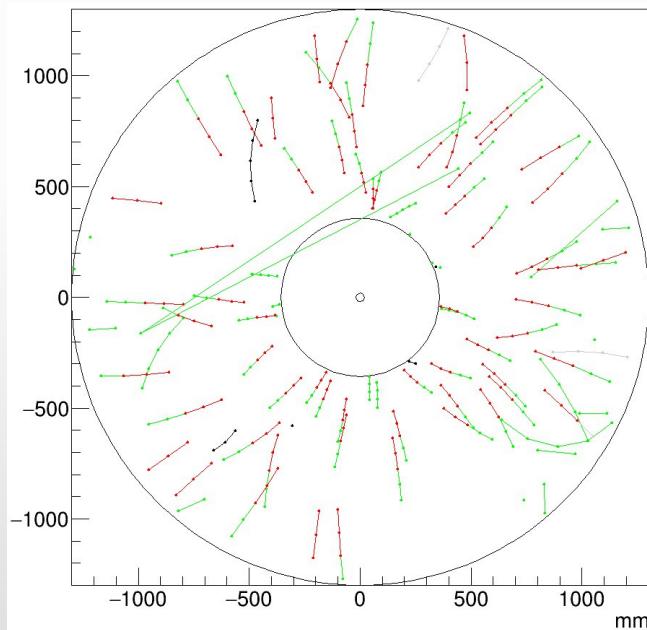
Разрешение по импульсу для рассматриваемого прототипа трекера остается в пределах 3-10% в диапазоне  $\eta$  от 1.6 до 2.2 и  $p_T < 1$  ГэВ, что достаточно для измерений. Разрешение трекера по импульсу может быть улучшено, если треки, реконструированные в форвардном детекторе, будут привязаны к трековым сегментам в ТПС. С другой стороны, треки в ТПС могут служить в качестве затравочных трековых сегментов для форвардного трекинга. Исследование обоих вариантов требует разработки специализированных алгоритмов и может быть выполнено на следующих этапах проекта.

# Форвардный трековый детектор.

Нужно исследовать эффективности поиска треков при высокой множественности, которая ожидается в столкновениях тяжелых ядер в NICA (до этого одиночные частицы).

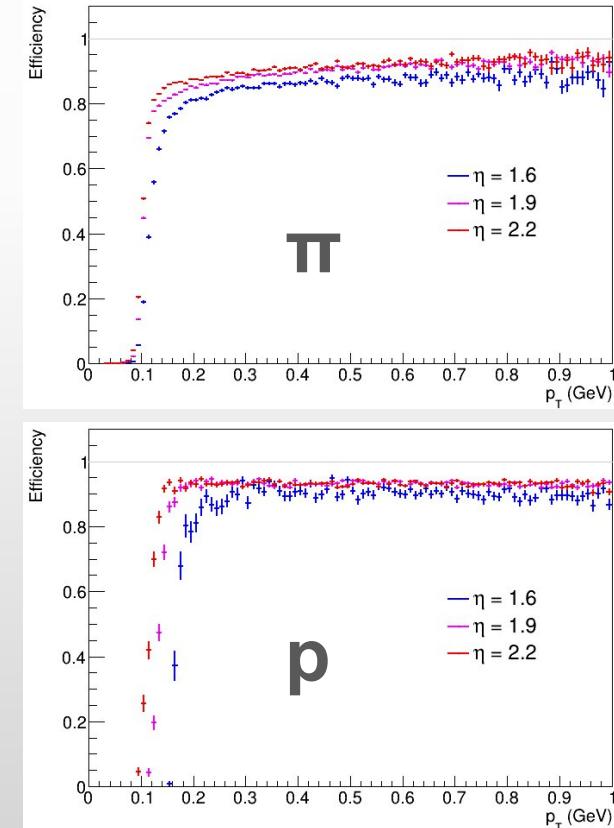
Кроме того, упрощенное моделирование в FATRAS не учитывает влияние адронных взаимодействий частиц с материалом TPC и образование вторичных частиц.

Для того чтобы оценить влияние этих эффектов на эффективность поиска треков и долю фейковых треков, в mpdroot был реализован более реалистичный прототип форвардного трекера, а для Монте-Карло моделирования первичных треков использовался генератор UrQMD (центральные Au-Au столкновения при  $\sqrt{s_{NN}}=11$  ГэВ). Информация о хитах в форвардном трекере затем использовались в качестве входных данных для реконструкции треков в ACTS.



большинство треков были правильно реконструированы, несмотря на высокую плотность хитов.

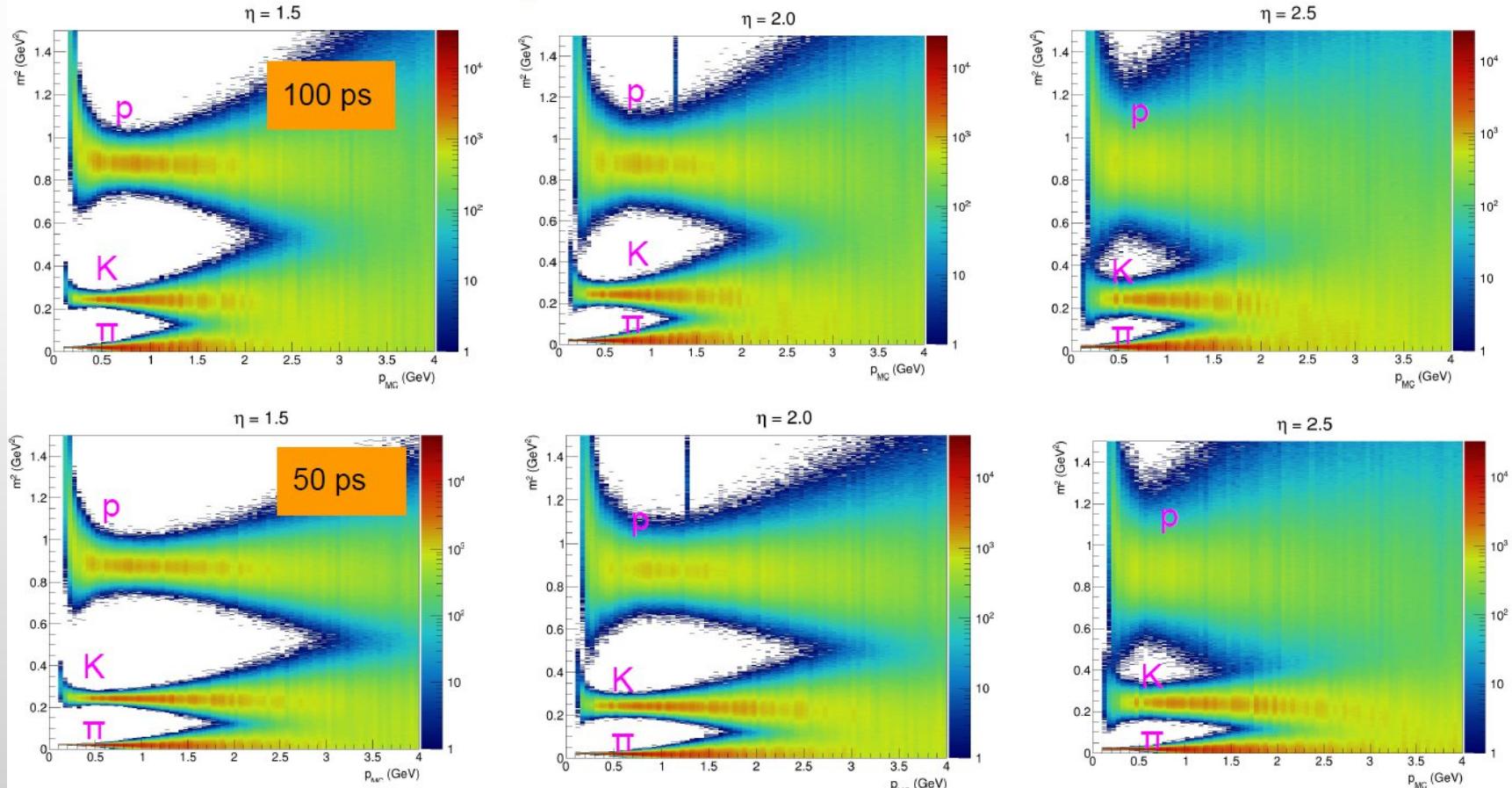
Эффективность реконструкции треков для первичных пионов и протонов в различных областях по псевдобыстроте. Эффективность достигает 90-95% в зависимости от диапазона по псевдобыстроте. Потери эффективности реконструкции связаны с распадами пионов на пути к форвардному детектору, а также с неупругими адронными взаимод. пионов и протонов с веществом на торцах TPC.



# Форвардный трековый детектор.

- ❖ Дополнительно проведено исследование возможности по идентификации.
- ❖ Рассмотрен TOF в качестве гибридной последней станции (координаты и время, RPC или TGC) с временным разрешением 50-100 пс.
- ❖ При разрешении 50 пс можно эффективно разделить протоны и каоны до импульсов  $\sim 3$  ГэВ/с, а каоны и пи-мезоны до импульсов  $\sim 1.5\text{-}2$  ГэВ/с в зависимости от диапазона по псевдобыстроте.

## TOF: squared mass distributions



# Форвардный трековый детектор.

- ❖ Первый прототип трекера, реализован в `tpdroot` ;
- ❖ Реалистичное обнаружение и подгонка трека с использованием ACTS (инструменты готовы к изучению в различных вариантах детектора);
- ❖ Импульс трека можно измерить с разумной точностью до  $\eta \sim 2,2$ ;
- ❖ Идентификация частиц с помощью TOF выглядит возможной;

**План:**

- ❖ изучение влияния эффектов разрешения импульса/ПИД на физические наблюдаемые;
- ❖ выбор технологии камер ! (трубки, тонкозазорные камеры ....) ;
- ❖ более реалистичное моделирование и дальнейшая оптимизация настройка детектора.

# Summary

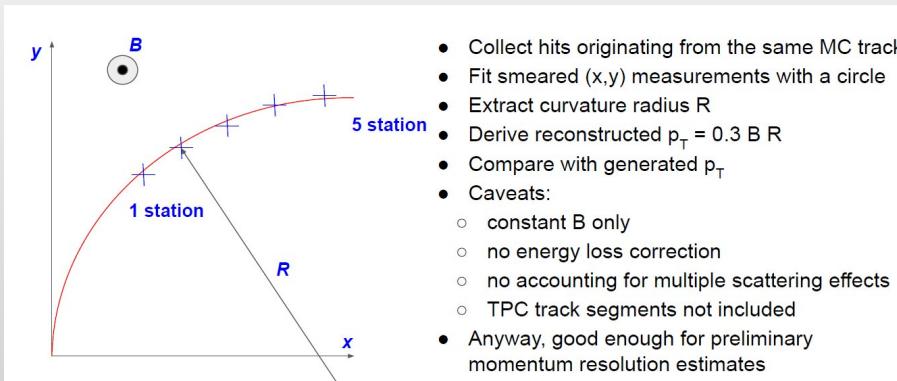
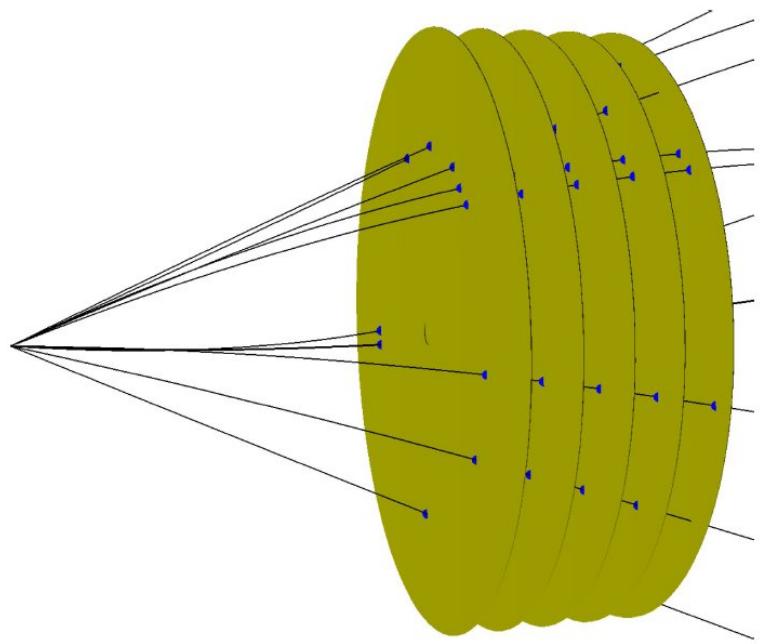


- ❖ Физическая программа эксперимента MPD не окончательная и каждый вклад важен
- ❖ Сотрудники ПИЯФ участвуют в работе многих рабочих групп в коллaborации MPD и вносят свой вклад в полученные результаты
- ❖ Планируем продолжать работы по представленным направлениям.
- ❖ Новые участники приветствуются!

**С НОВЫМ ГОДОМ!**

# BACKUP

# Форвардный трековый детектор.



Монте-Карло Генератор столкновений ядер DCM-QGSM-SMM основан на Дубненской каскадной модели DCM, кварк-глюонной струнной модели QGSM и статистической мультифрагментарной модели (SMM). Эти модели, описывают различные этапы столкновения ядер от начальных нуклон-нуклонных столкновений до образования частиц в конечном состоянии. Данный генератор специально разрабатывается в Дубне для нужд экспериментов BM@N и MPD с учетом особенностей ускорительного комплекса NICA. Генератор событий DCM-QGSM-SMM описывает экспериментальные данные эксперимента NA61. Поэтому считается, что он обеспечивает правдоподобное описание множественности заряженных частиц в области центральных и больших быстрот, а также правильно описывает образование как легких частиц, таких как лептоны и адроны, так и ядерных фрагментов и гиперфрагментов

# $\rho(770)$ , peak shape and correlated background

- Full chain simulation and reconstruction, centrality 0-10%,  $\rho(770) \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ,  $|y| < 0.5$

- Peak-like contribution from:

- ✓  $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- ✓  $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- ✓  $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  (with missing  $\pi^0$ )
- ✓  $K^*(892)^0 \rightarrow \pi^\pm K^\mp$  (with misidentified kaon)

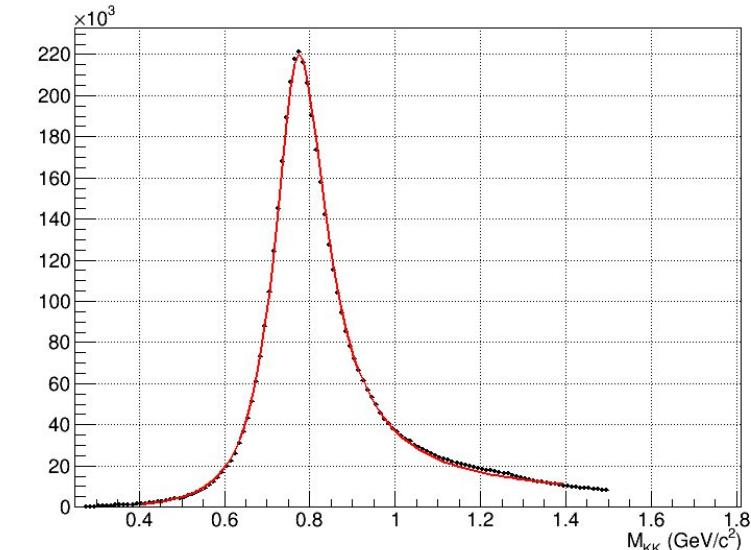
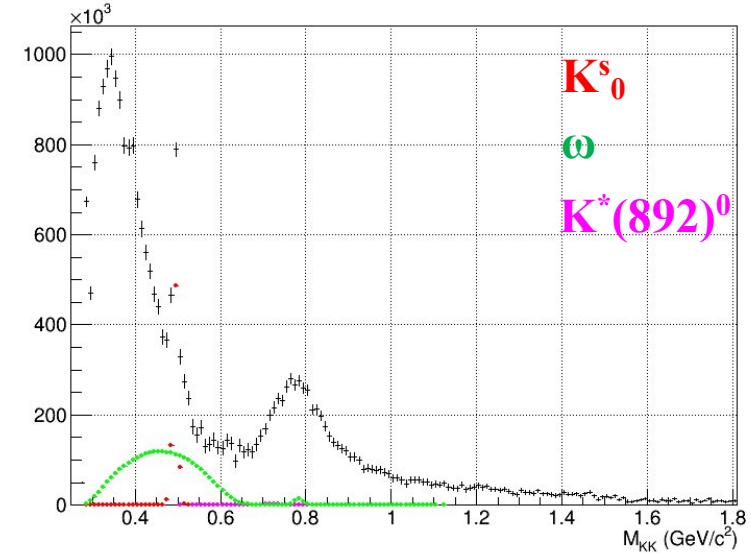
- Contributions must be measured in advance and subtracted (or accounted for)

- Resonances peak shape Breit-Wigner (BW) with peak shape modifications:

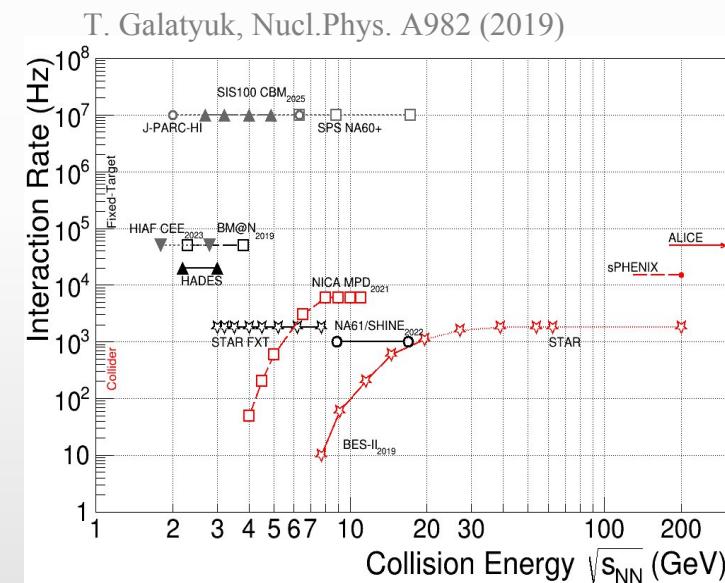
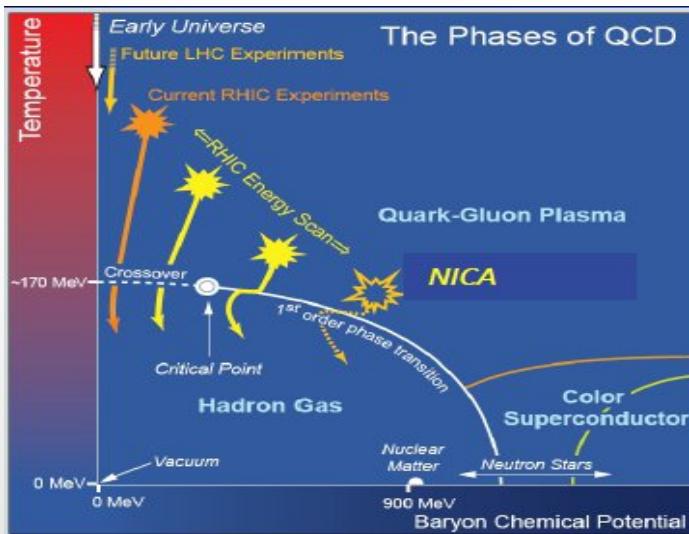
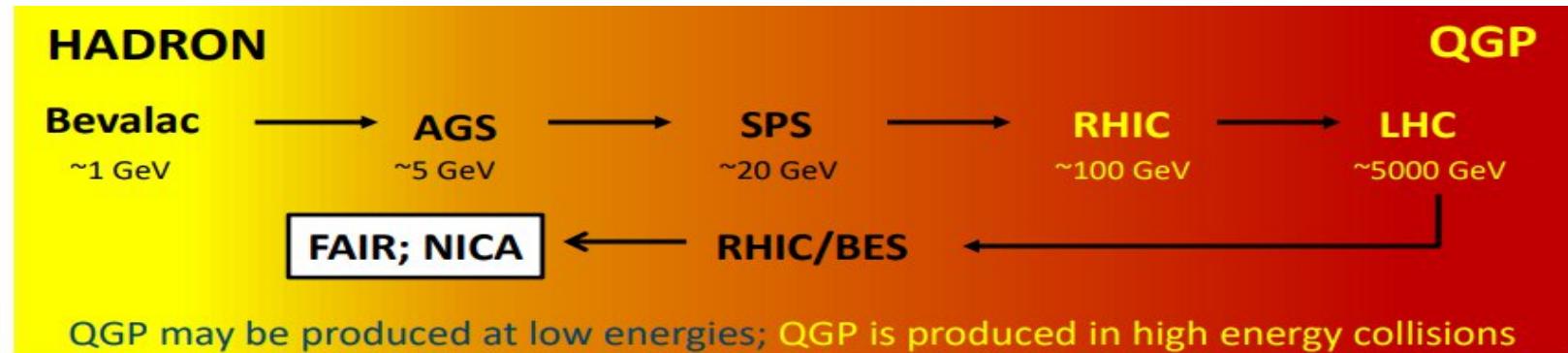
- ✓ detector mass resolution
- ✓ dependence of resonance width on mass (for wide resonances)
- ✓ phase space correction
- ✓ Bose-Einstein correlations
- ✓ mass dependence of reconstruction efficiency (for wide resonances)
- ✓ (Partial) restoration of chiral symmetry
- ✓ Hadronic phase modifications (rescattering of daughter particles, regeneration)

$$BW(M) = A \frac{MM_0\Gamma(M)}{(M_0^2 - M^2)^2 + M_0^2\Gamma(M)}$$

$$\Gamma(M) = \left[ \frac{(M^2 - 4m_\pi^2)}{(M_0^2 - 4m_\pi^2)} \right]^{3/2} * \Gamma_0 * \left( \frac{M_0}{M} \right)$$



# Introduction



- ❖ Study of the QCD medium at extreme net baryon densities, phase transition at  $X_c \sim 5 X_0$
- ❖ Studied in several ongoing and future experiments:
  - ✓ collider experiments: maximum phase space, minimally biased acceptance, free of target parasitic effects
  - ✓ fixed-target experiments: high rate of interactions, easily upgradeable, better vertex-finder for heavy flavor decays