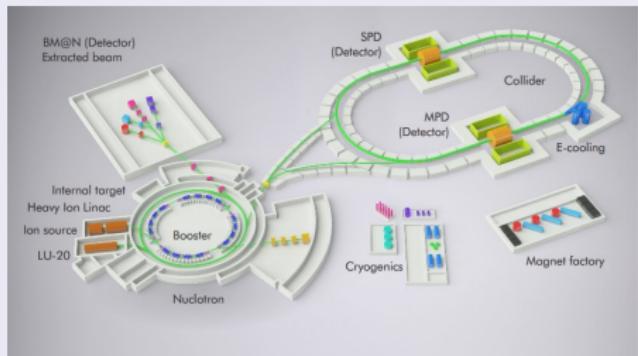


## Эксперименты BM@N и MPD на ускорительном комплексе NICA

П. Батюк, [pavel.batyuk@jinr.ru](mailto:pavel.batyuk@jinr.ru)

Лаборатория физики высоких энергий им. Векслера и Балдина (ЛФВЭ),  
Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

# Ускорительный комплекс NICA



- Набор ускорителей для обеспечения пучков частиц, которые будут использованы в экспериментах
- Экспериментальные установки
- Линии для сборки и проверки сверхпроводящих магнитов
- Помещения для проектирования и сборки детекторов
- Инновационный центр

Пучки -  $p, d \dots {}^{197}Au^{79+}$

Энергия столкновения:

$$\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11 \text{ ГэВ} \quad E_{lab} = 1 - 6 \text{ ГэВ/н}$$

Светимость:  $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Au),  
 $10^{32}(p)$

- 2 точки встречи пучков - MPD и SPD
- Эксперимент в режиме фиксированной мишени - BM@N
- 2018: Выведенные пучки аргона и криптона были доступны в эксперименте BM@N
- 2020-2021: Эксперимент MPD в стартовой конфигурации.
- 2023: Полностью готовый комплекс NICA согласно проектному заданию.

# Нуклotron (в работе с 1993)

Модернизирован в 2010 -  
2015

Параметры	Нуклotron
Тип	Сверхпроводящий синхротрон
Частицы	$\uparrow p$ , $\uparrow d$ , тяжёлые ядра
Макс. кин. энергия [ГэВ/и]	12.07 ( $\uparrow p$ ), 5.62 ( $\uparrow d$ ), 4.38 (Au)
Магнитная жёсткость [ $T \cdot m$ ]	25 - 43.25
Периметр [m]	251.52
Вакуум [Торр]	$10^{-9}$
Интенсивность, Au [ионов/сброс]	$1 \cdot 10^9$
Время медленного вывода [с]	вплоть до 10



- Проект ускорителя был одобрен в **1986**
- Сборка & первые пучки, **Март 1993**
- Медленный вывод **2000**

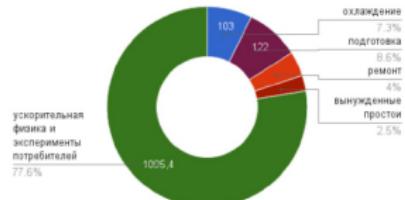
Тяжёлые ионы от  $p$  до Xe  
(C, Mg, Fe, Ar, Kr)

Поляризованные протоны и  
дейтроны

# Нуклотрон, сеансы для физиков

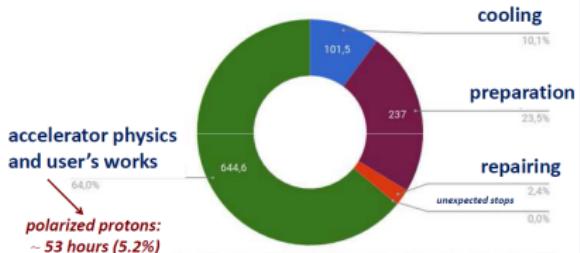
Сеанс № 53, 1450 часов, один из самых продолжительных

53 сеанс - время



Сеанс № 54, 1150 часов

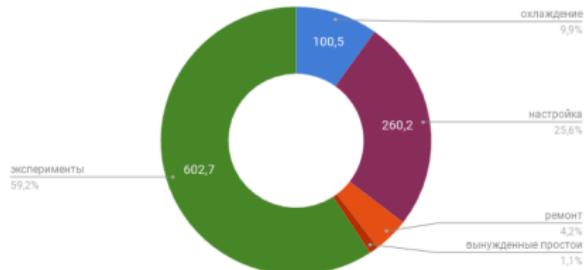
The total run duration: ≈ 1008 hours



Сеанс № 55: Февраль - Апрель, 2018

- Сеанс 53 - Поляризованные и неполяризованные дейтроны, макс. кин. энергия - 4.6 ГэВ/н
- Сеанс 54 - Пучок ионов углерода
- Сеанс 55 - Пучки ионов аргона и криптона

55 сеанс - время



# Бустер

Сборка была начата в 2018

Параметры	Бустер
Тип	Сверхпроводящий синхротрон
Частицы	ионы с $A/Z \leq 3$
Энергия вброса [MeV/u]	3.2
Энергия вывода [MeV/u]	600
Магнитная жёсткость [T · м]	1.6 - 25.0
Периметр [м]	210.96
Вакуум [Торр]	$10^{-11}$
Интенсивность [Аи ионов/сброс]	$1.5 \cdot 10^9$



Туннель для бустера



- Сборка магнитной системы закончена.
- Начало сборки - Сентябрь 2018.
- Первый (технологический) сеанс - весна 2020.
- Полное соответствие проекту - конец 2020, начало 2021 года

Первый магнит был установлен 19 сентября 2018

# Линия для сборки и проверки сверхпроводящих магнитов

## Основные элементы (зоны):

- Проверка сверхпроводящих кабелей и обмоток
- Сборка магнитов
- "Тёплые" магнитные измерения
- Проверка на предмет утечек
- "Холодные" магнитные измерения

Все магниты для Бустера  
сделаны и проверены в  
Дубне!



450 магнитов для  
ускорительных комплексов  
NICA и FAIR

# Источник тяжёлых ионов KRION 6Т

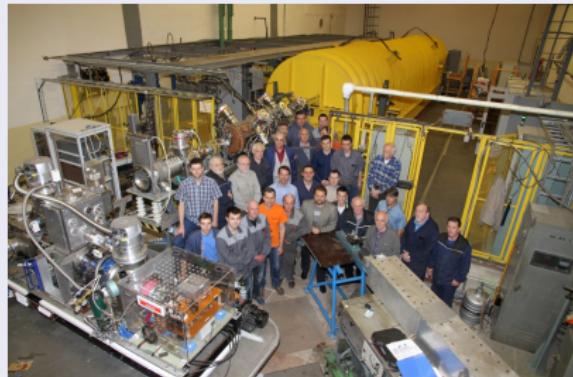
Был использован в сеансе №55



- Способен обеспечивать порядка  $2.5 \cdot 10^9$  ионов золота  $Au^{31+}$  за цикл. Частота цикла - 10 Гц.

# Линейные ускорители

## ЛУ-20



## HILAC



- **ЛУ-20 - ОИЯИ (Дубна), ИЯИ (Троицк), ИТЭФ (Москва), МИФИ (Москва) (Сборка - Май 2016)**
- **HILAC - BEVATECH OHG (Сборка - Октябрь 2018)**

	ЛУ-20	HILAC
Отношение $A/Z$	1-3	1-6
Энергия выброса [КэВ / а.е.м.]	150 for A/Z 1-3	17
Энергия вывода [МэВ / а.е.м.]	5 (A/Z 1-3)	3.24 (A/Z = 6)

# Коллайдер

Официальное начало строительства  
25 Марта 2016



# Коллайдер

<http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/205corp.htm>



## Основные характеристики:

Периметр [м]	503.04
Макс. энергия $\sqrt{s_{NN}}$ [ГэВ]	11
$\Delta p/p [10^{-3}]$	1.6
Светимость $[cm^{-2} \cdot s^{-1}]$	$10^{27}$

# Коллайдер

Сентябрь 2018

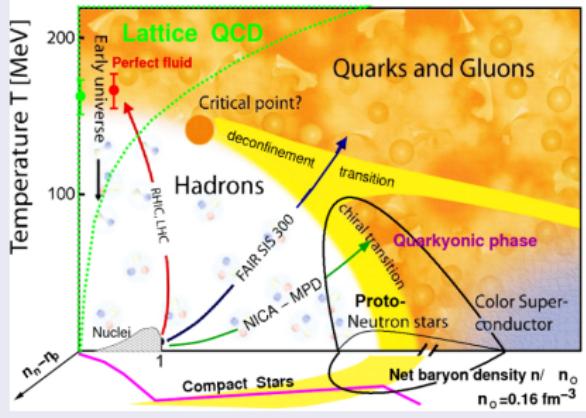


# Коллайдер

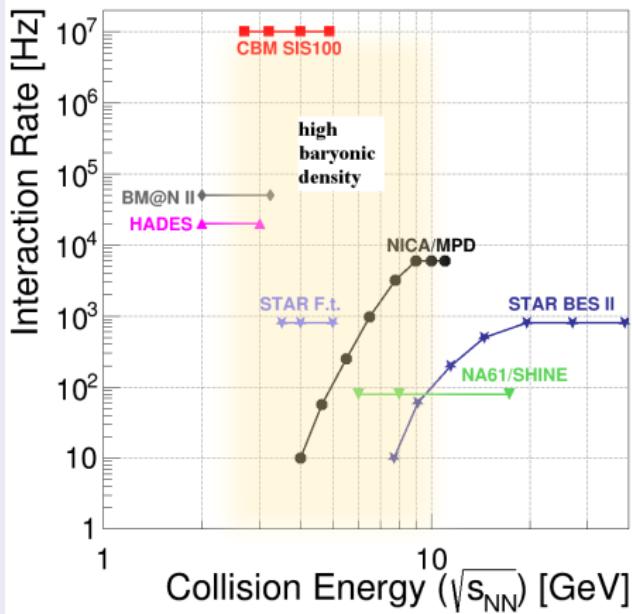
Август 2019



# Фазовая диаграмма состояния кварк-глюонной материи



## Эксперименты, изучающие фазовую диаграмму



### Высокие энергии:

- Количество барионов и антибарионов совпадает
- КХД предсказывает быстрый и гладкий переход между адронной и партонной материй

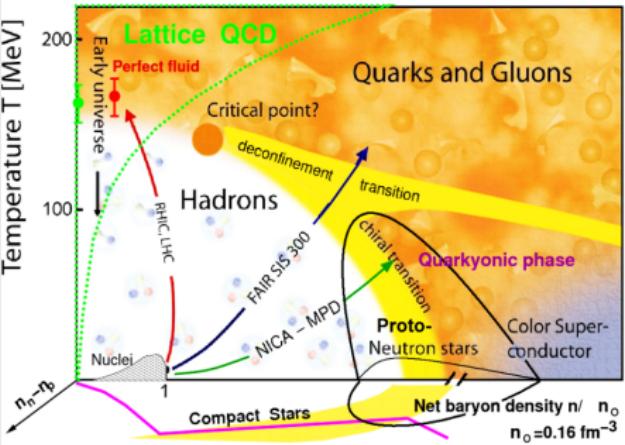
### Низкие энергии:

- Барионы доминируют
- Фазовый переход первого рода?**  
Экзотические состояния?
- BES @ RHIC, NA61, CBM, NICA/MPD, BM@N

# Немного о физике, которую мы изучаем ...

## Фазовая диаграмма

Temperature T [MeV]



## Деконфайнмент при больших барионных плотностях

увеличенный выход странных частиц (одна из физ. задач эксперимента BM@N)

## Уравнение состояния ядерной материи

выходы и спектры  
идентифицированных, частиц  
фемтоскопия, потоки

Измерения:  $\gamma, \pi, K, p, \Lambda, \Omega$ ,  
античастицы, лёгкие ядра

## Модификации адронов в ядерной среде

повышенный выход дилептонов с малыми массами

Измерения:  $\rho, \omega, \phi, e^+e^-$

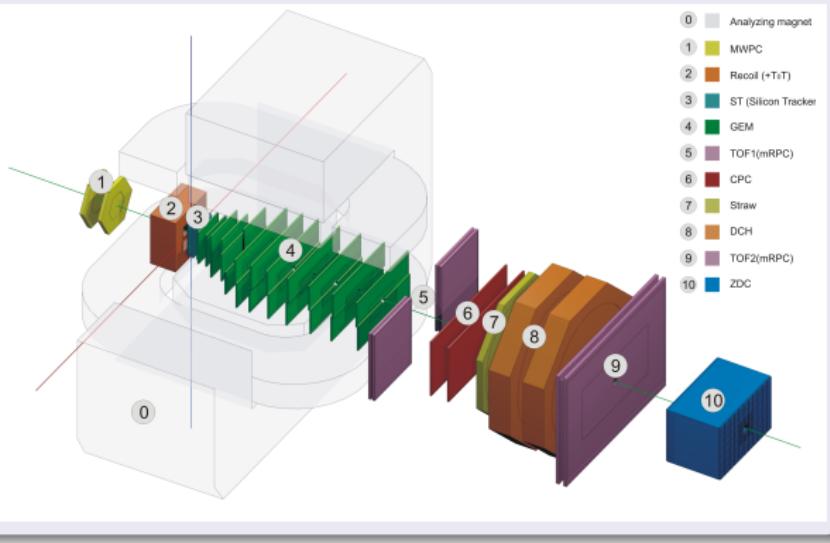
## Возможная критическая точка

Пособытийные флуктуации  
(множественности)

## Странность в ядерной материи

Гиперядра

# Экспериментальная установка BM@N

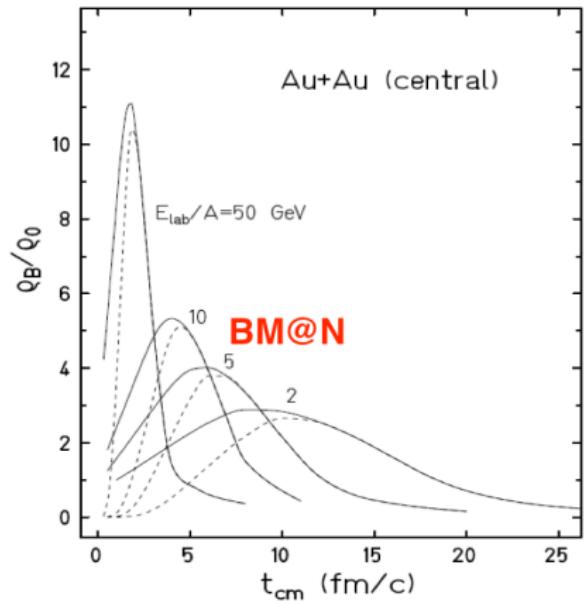
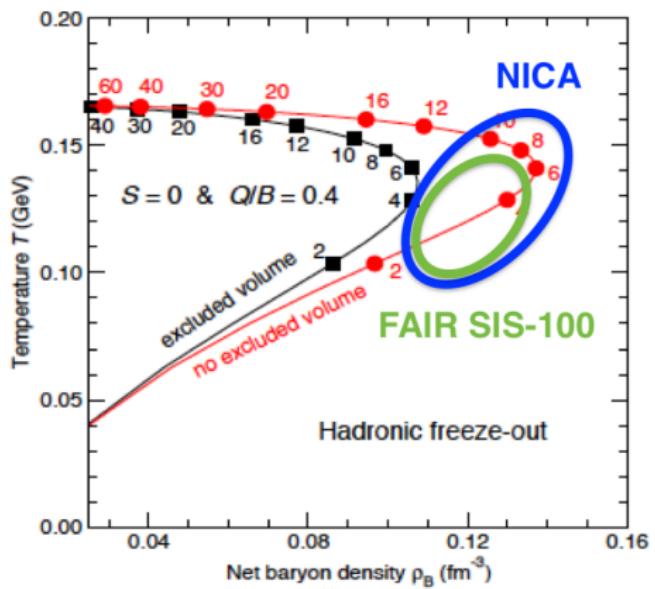


- Внутренний трекер внутри магнита для восстановления ядро-ядерных взаимодействий
- Внешний трекер за пределами магнитного поля
- Времяпролётные детекторы для идентификации адронов и лёгких ядер
- Триггерные детекторы и пучковые мониторы
- Калориметры для измерения центральности взаимодействия и восстановления нейтральных частиц

## Преимущества BM@N:

- Широкоапertureный анализирующий магнит
- Детекторные подсистемы устойчивы к большим множественностям заряженных частиц
- Идентификация частиц с помощью времяпролётной системы с широким покрытием фазового пространства

# Исследование плотной барионной материи на Нуклotronе



Нуклotron позволяет получить плотную барионную материю, имеющую сравнительно большое время жизни.

# Физика на Нуклотроне

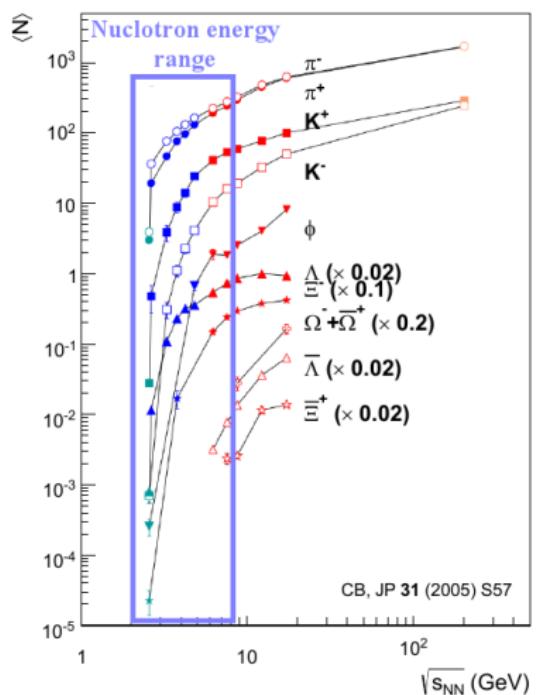
## $A + A$ -взаимодействия:

- Выход странных частиц
- Более точные данные для странных мезонов, гиперонов, гиперядер

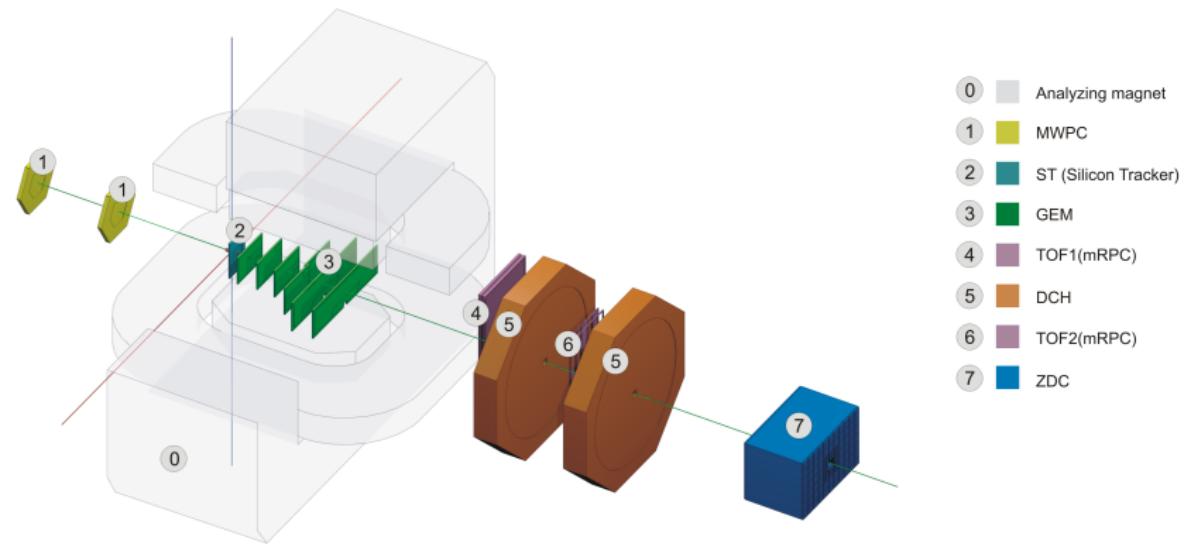
## $p + p$ , $p + n$ , $p + A$ -взаимодействия :

- Возможность изучить более детально эффекты ядерной среды

AGS NA49 BRAHMS



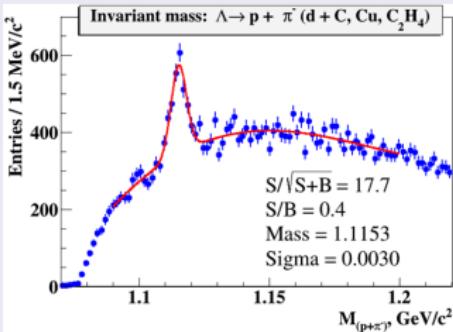
# ВМ@N, сеансы №53 (дейтроны) и 54 (углерод)



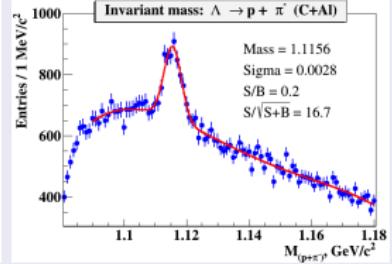
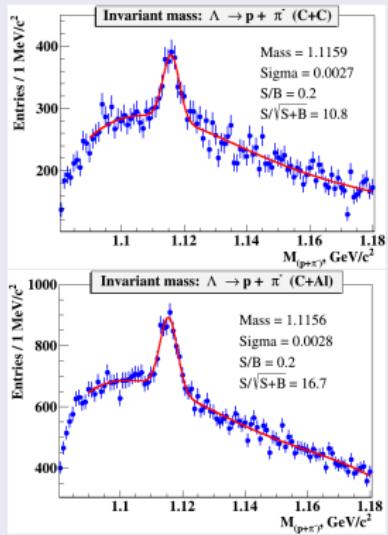
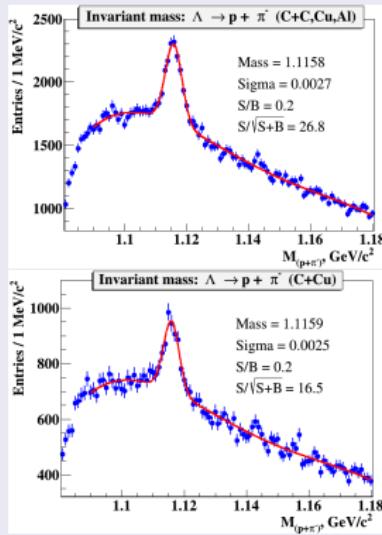
# $\Lambda^0$ в сеансах на дейтронах и углероде

$d$  (C) + мишень  $\rightarrow X$   
 $\Lambda^0$ -сигнал с шириной  $\sim$   
2.5-3 МэВ

## Дейтроны

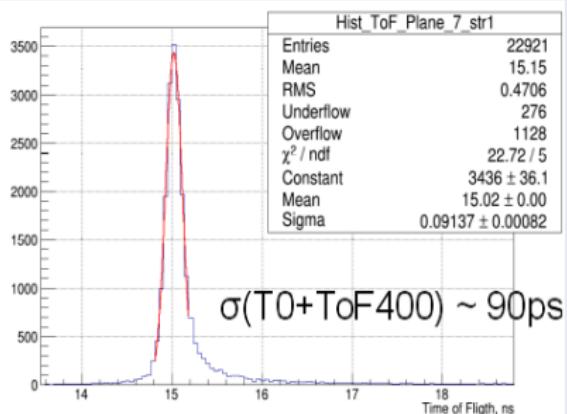


## Углерод

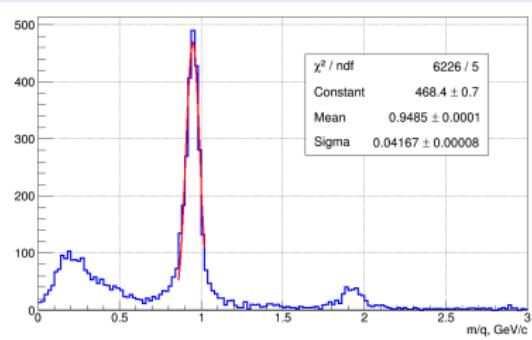
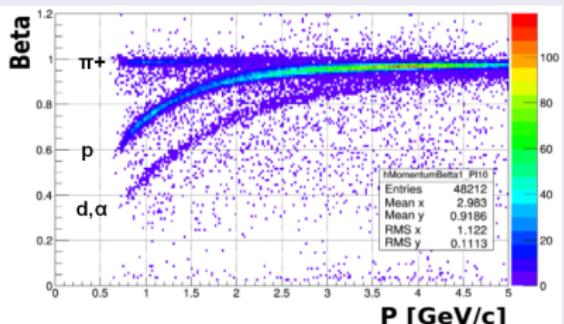
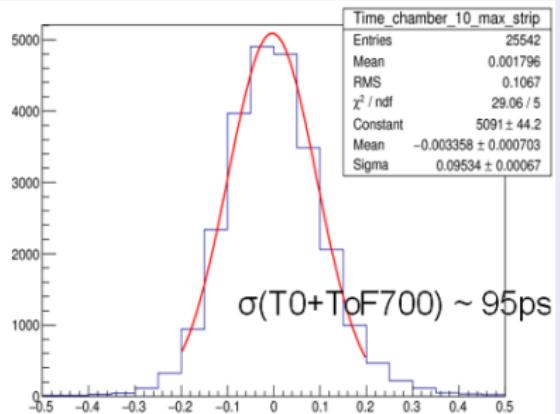


# Времяпролётные измерения в сеансе на углероде

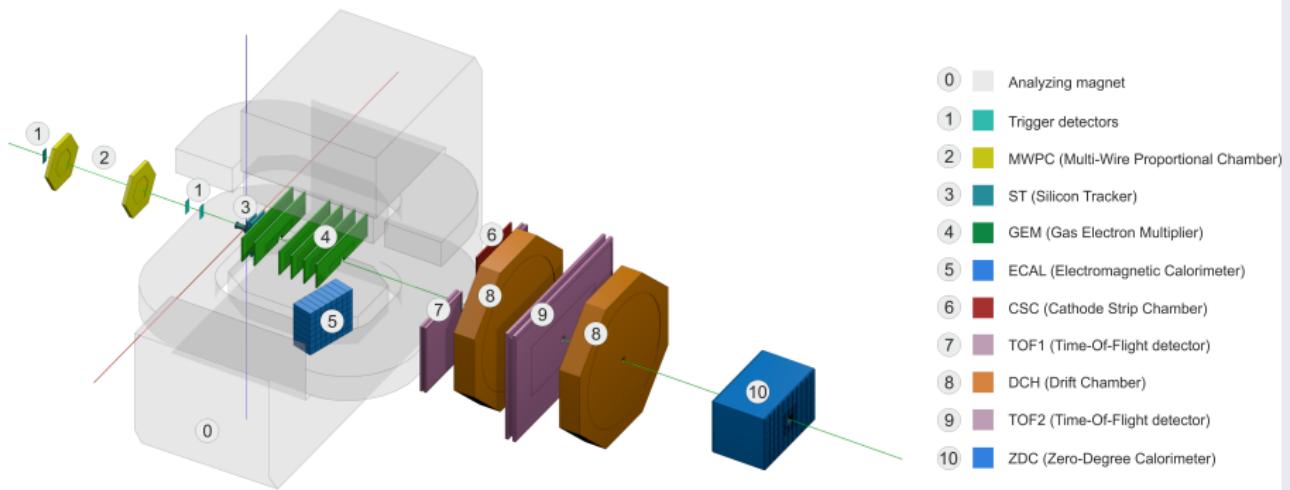
$T = 3.5 \text{ ГэВ/н, } C + Al \rightarrow X$



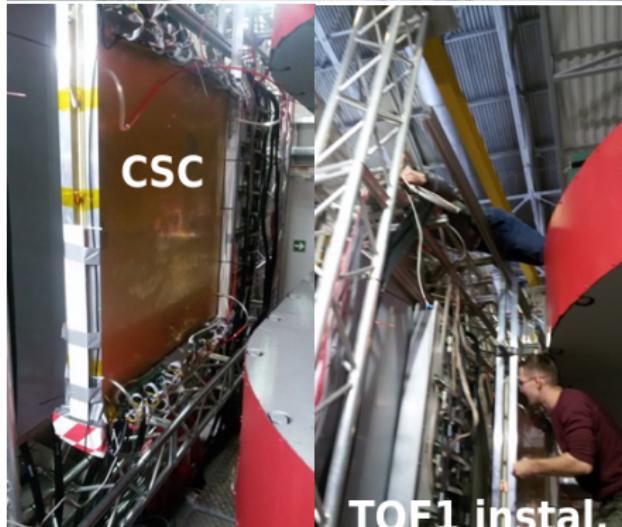
$T = 4.5 \text{ ГэВ/н, } C + Cu \rightarrow X$



# BM@N, сеанс №55 (аргон и криpton)



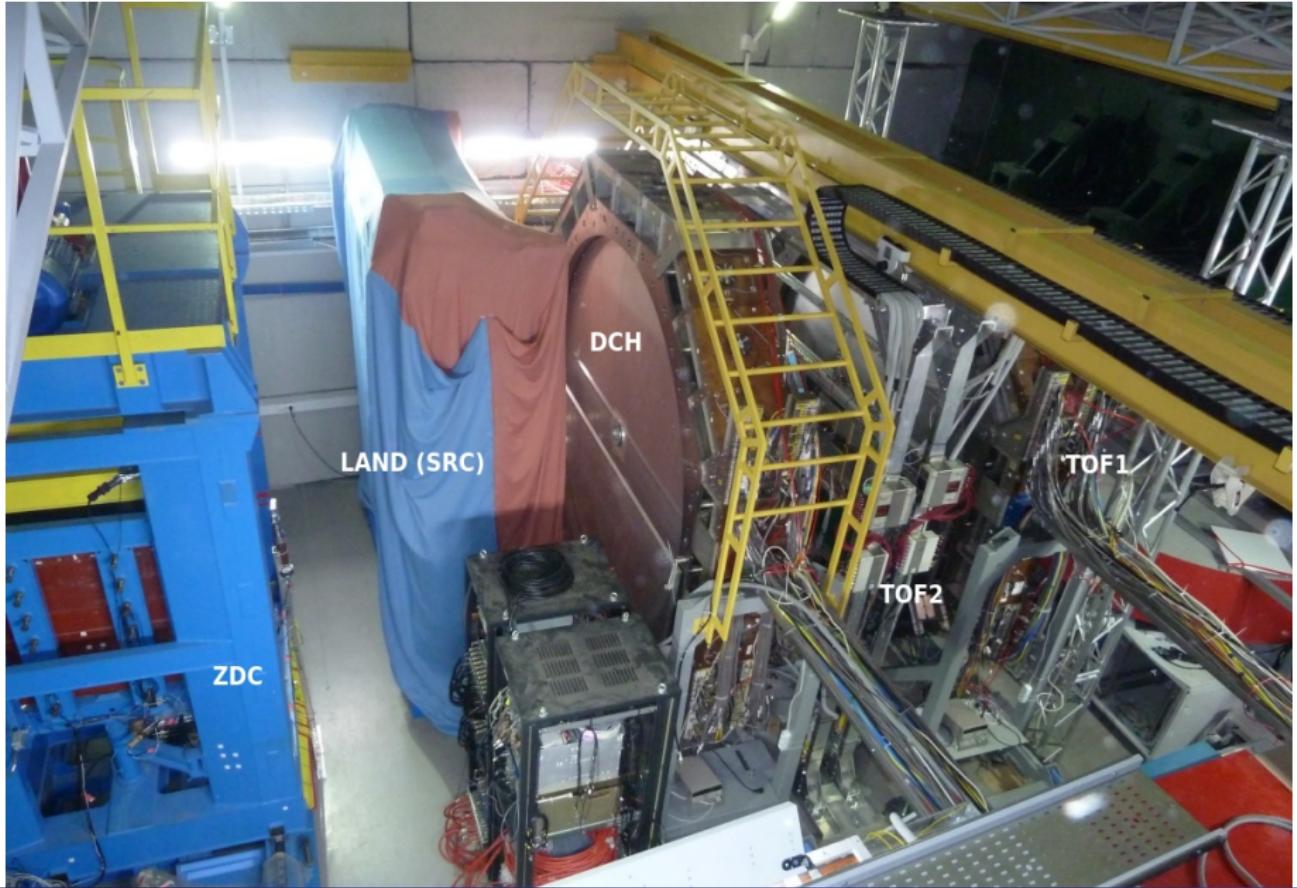
# BM@N, сеанс №55, детекторные подсистемы



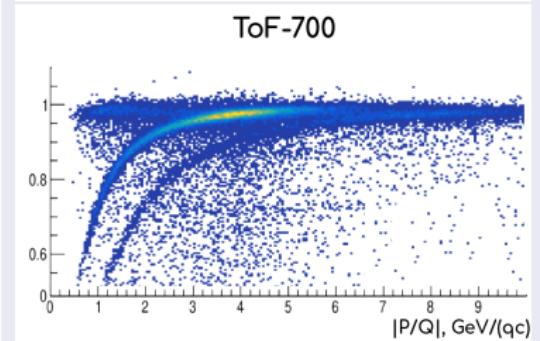
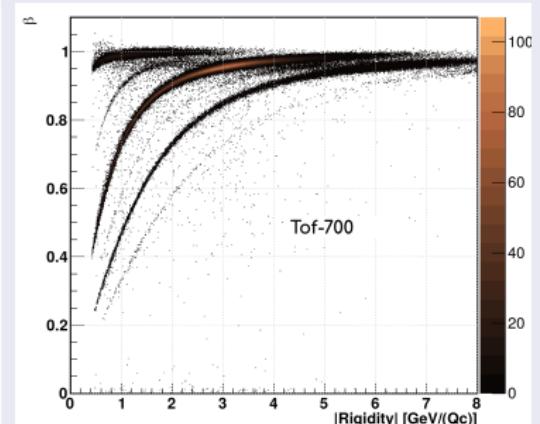
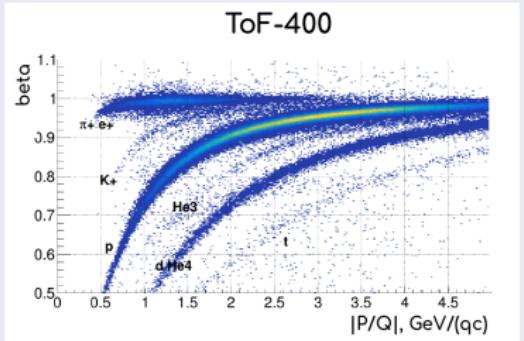
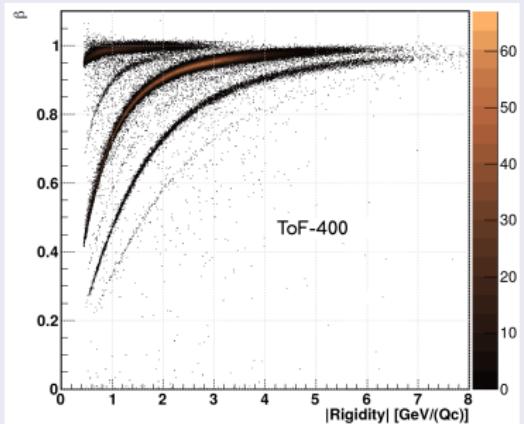
## Новые детекторы:

- Шесть больших GEM
- Триггерные детекторы
- Три полупроводниковых кремниевых детектора
- Катодно-стриповая камера
- Полный набор времязпролётных детекторов

# BM@N, сеанс №55, детекторные подсистемы



# Идентификация заряженных частиц



## Сеанс №54 (углерод)

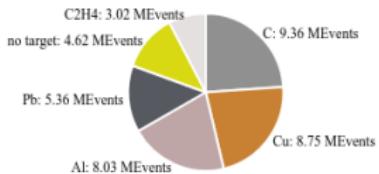
Beam C (  $E = 5.14 \text{ GeV/n}$  )

Total: 0.41 MEvents



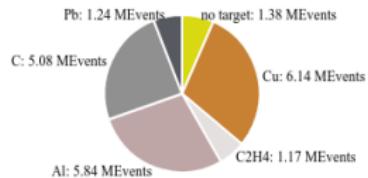
Beam C (  $E = 4.5 \text{ GeV/n}$  )

Total: 39.14 MEvents



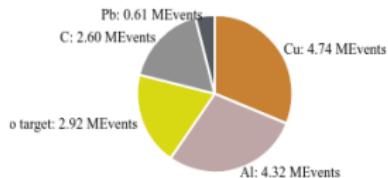
Beam C (  $E = 4 \text{ GeV/n}$  )

Total: 20.85 MEvents



Beam C (  $E = 3.5 \text{ GeV/n}$  )

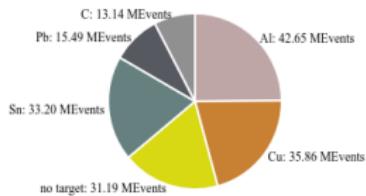
Total: 15.19 MEvents



## Сеанс №55 (аргон и криpton)

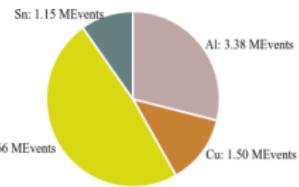
Beam Ar (  $E = 3.2 \text{ GeV/n}$  )

Total: 171.53 MEvents



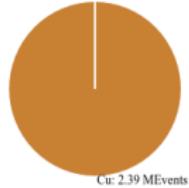
Beam Kr (  $E = 2.3 \text{ GeV/n}$  )

Total: 11.69 MEvents



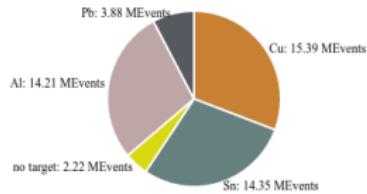
Beam Kr (  $E = 2.94 \text{ GeV/n}$  )

Total: 2.39 MEvents



Beam Kr (  $E = 2.6 \text{ GeV/n}$  )

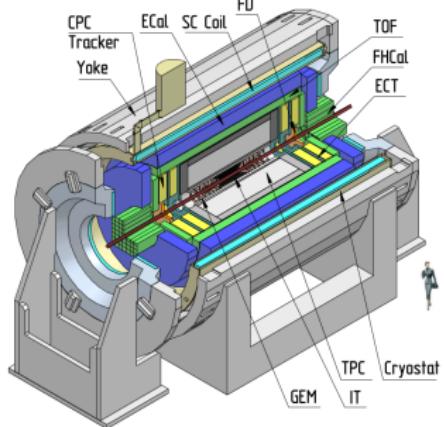
Total: 50.05 MEvents



# Эксперименты в режиме сталкивающихся пучков

# Многоцелевой детектор (MPD) для изучения $A + A$ -взаимодействий

## MPD (1-я фаза):



## Участники:

- Tsinghua University, Пекин, Китай
- GSI, Дармштадт, Германия
- WUT, Варшава, Польша
- МИФИ, Москва, Россия
- ИЯИ РАС, Россия
- PPC BSU, Минск, Беларусь
- СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

## Преимущества:

- Широкий аксентанс и возможность восстановления частиц вплоть до  $|\eta| < 1.8$  (TPC, ECT)
- Прецизионное восстановление первичной вершины (IT)
- Хорошая идентификация частиц
  - $\pi, K$  вплоть до 1.5 ГэВ/с
  - $K, p$  вплоть до 3 ГэВ/с
  - $\gamma, e$  от 0.1 ГэВ/с до 3 ГэВ/с
- Точное восстановление характеристик события
- Быстрый триггер (FFD)
- Большая частота набора событий (вплоть до 7 кГц)

## Текущий прогресс:

- Технические проекты детекторных подсистем готовы
- Идёт сборка детекторов первой фазы эксперимента
- Первая фаза - **2021** (тесты на космическом излучении - конец **2020**)
- 2-я фаза эксперимента - **2023**

# Коллаборационные митинги

- Первый коллаборационный митинг (**Апрель, 11-13 2018**)
- Второй коллaborационный митинг (**Октябрь, 29-30 2018**)
- Третий коллаборационный митинг (**Апрель, 16-17 2019**)
- Четвёртый коллаборационный митинг (**Октябрь, 14-15 2019 (BM@N)** и **октябрь, 21-25 2019 (MPD)**)



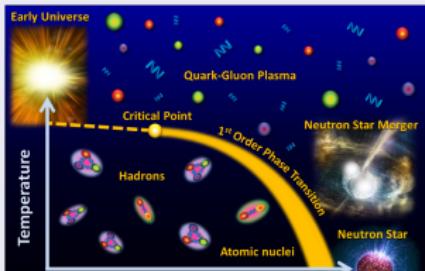
В настоящий  
момент:

**BM@N:**  
10 стран,  
17 институтов,  
216 участников  
**MPD:**  
10 стран,  
26 институтов,  
436 участников

# Заключение

## Энергетический диапазон NICA:

- Максимальное  $K^+/\pi^+$ -отношение
- Максимальное  $\Lambda/\pi$ -отношение
- Максимальный выход гиперядер
- Максимум барионной плотности
- Фазовый переход первого рода???
- Критическая точка???



- Строительство ускорительного комплекса и развитие экспериментальных установок BM@N и MPD идут по графику
- NICA рассматривается как часть европейской исследовательской инфраструктуры

**Мы приглашаем вас в наши ряды!**

**Спасибо за внимание!**