



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# Проведение фундаментальных исследований в области больших $p_T$ на выведенных пучках Нуклотрона

Г.Б. Шарков, А.В. Ставинский, С.С. Шиманский

04.04.2025

Семинар ЛФВЭ

## План доклада

- Мотивация
  - Уникальная физика
  - Высокая интенсивность и поляризованные пучки Нуклотрона
- Программа исследований
- Установка
- Планирование

# Мотивация 1

## Уникальная физика



- Спиновые эффекты с большими  $p_T$  в полной изотопике, включая  $n\uparrow + n\uparrow$
- Эксклюзивные реакции, в которых ожидается проявление дикварков, определение их характеристик
- Полный набор измеряемых гиперонов, в том числе в контексте проблем астрофизики
- Новый уровень в изучении кумулятивных процессов, в т.ч. В полуэксклюзивной постановке
- Инновационные 3D нейтронные детекторы большого аксептанса
- Фемтоскопия применительно к специально отобраннным процессам или слабоизученных пар ( $\Sigma p, p d, \dots$ )

# Мотивация 2

## Нуклотрон подходит для изучения редких процессов с $p_T > 0.5$ ГэВ/с



Максимальная  $E_p$  12 ГэВ

Максимальная  $E_A (q/A=0.5)$  6 ГэВ

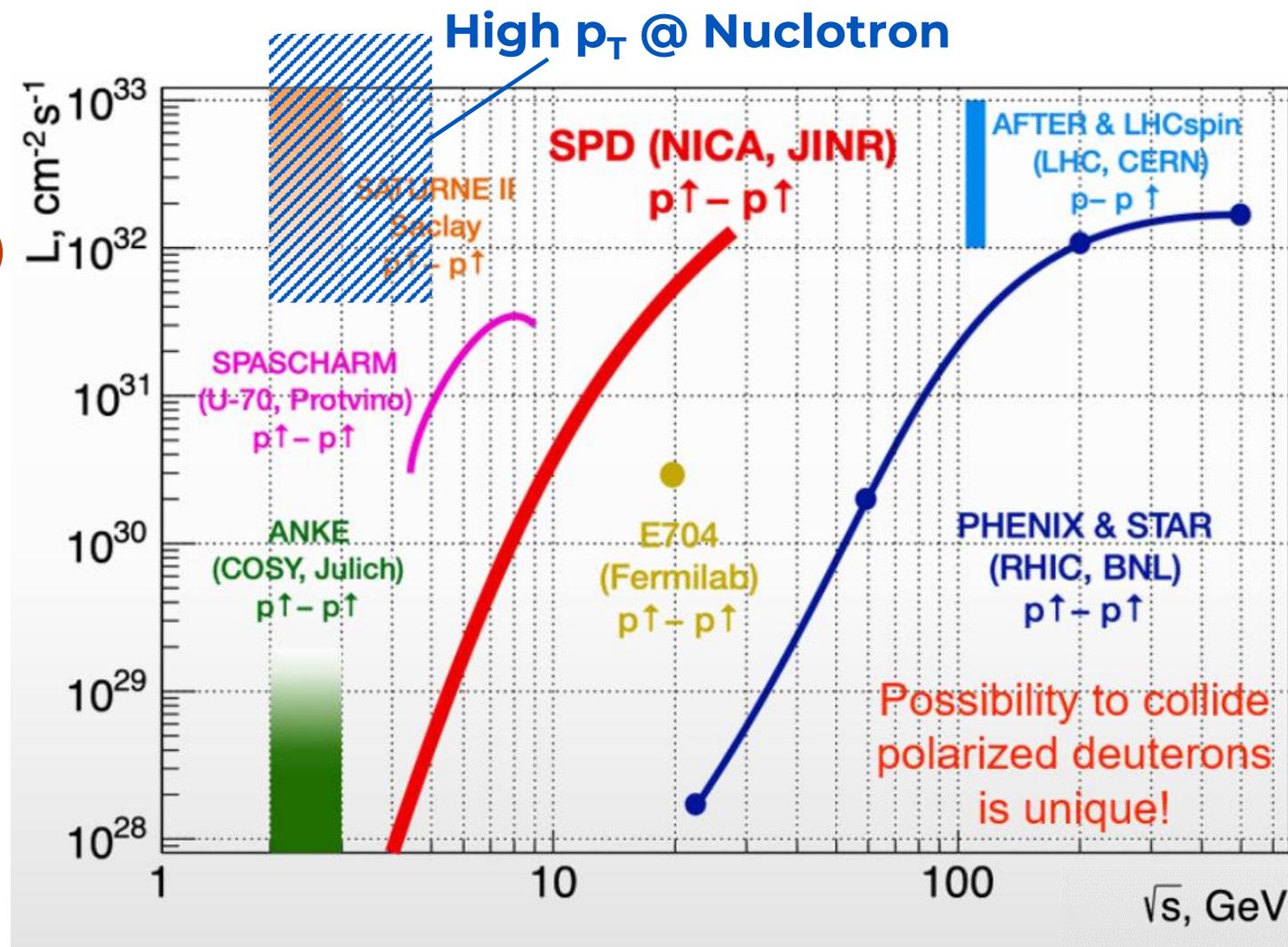
Интенсивность ( $p$ ) до  $10^{10}$   
на сброс 2 сек

Заполнение колец коллайдера NICA 0.5 ч

Время работы коллайдера NICA 3 ч

Поляризованные пучки  $p\uparrow, d\uparrow, {}^3\text{He}\uparrow$

Между заполнением колец NICA  
Нуклотрон будет работать на выведенные пучки



+ Поляризованные и криогенные мишени

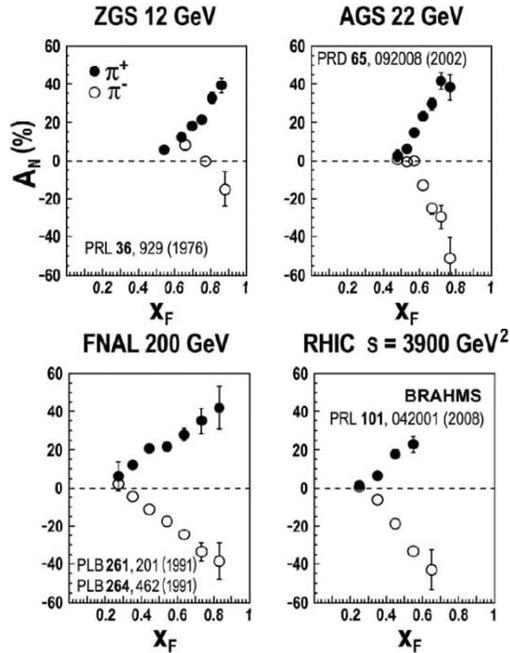
# Некоторые проблемы современной нпКХД



- Большие необъяснённые спиновые эффекты при  $\sqrt{s} \sim 2 - 5$  ГэВ
- Нет данных по  $n\uparrow + n\uparrow$  взаимодействиям для проверки нарушения изотопической симметрии в сильных взаимодействиях
- Дикварки (в т.ч. странные): используются в моделях (в т.ч. для описания нейтронных звёзд), но нет прямых доказательств существования
- Повышенный выход барионов и дейтронов в области  $p_T > 0,5$  ГэВ/с
- Свойства многонуклонных (многокварковых) систем мало изучены и нет определённости в их природе (флуктоны, SRC и др.)
- Роль дикварков, странных кварков в многонуклонных (многокварковых) системах (и в эволюции нейтронных звёзд?)

# Спиновая физика

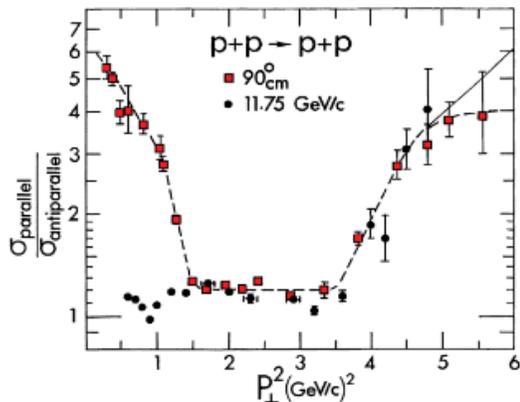
C. Aidala SPIN2008



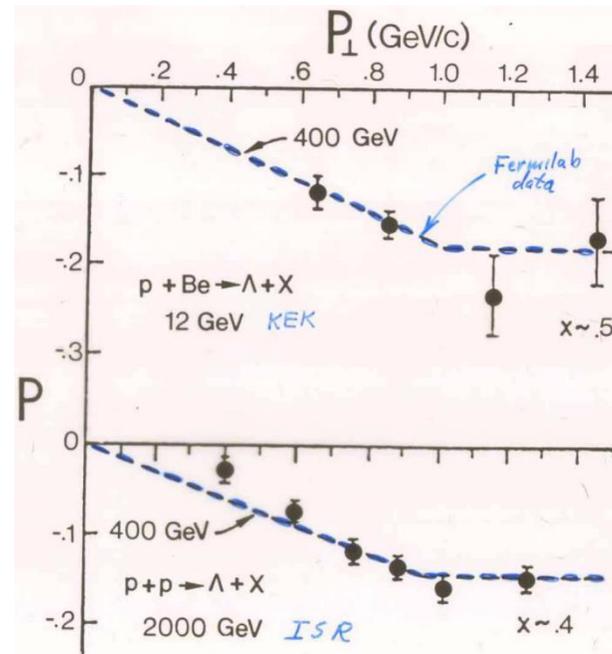
Большая поляризация гиперонов в области  $p_T > 0.5$  ГэВ/с

Даже в неполяризованных столкновениях

Спиновые эффекты не вырождаются с ростом  $E$ ,  $p_T$



A.M.T. Lin et al., PL 74B, 273;  
E.A. Crosbie et al., PR D23, 600



A.D. Krish <http://arxiv.org/abs/1001.0790v1>

Упругие реакции с поляризованным  $p\uparrow + n\uparrow$  при  $90^\circ$  с.ц.м.

$p\uparrow + p\uparrow \rightarrow p\uparrow + p\uparrow$  для калибровки

$p\uparrow + n\uparrow \rightarrow p\uparrow + n\uparrow$  мало данных

$n\uparrow + n\uparrow \rightarrow n\uparrow + n\uparrow$  нет данных

Поиск нарушения изотопической симметрии в сильном взаимодействии при больших  $p_T$  (флейворной универсальности между  $u$  и  $d$  кварками)

Эксклюзивные NN реакции при  $x_T \sim 1$  для  $\sqrt{s} < 6$  ГэВ

$N\uparrow + N\uparrow \rightarrow BB + MM$

где  $B$  ( $p, n, \Lambda, \Delta, \Sigma, \dots$ ),  $M$  ( $\pi, K, \dots$ )

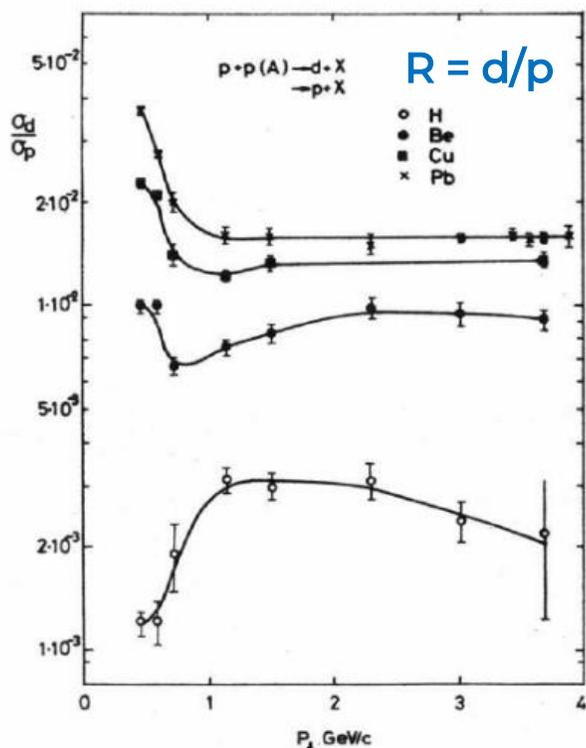
Механизмы поляризации гиперонов

$N\uparrow + N\uparrow \rightarrow BB(\Lambda) + \pi\pi$  (КК)

$N\uparrow + N\uparrow \rightarrow \Delta\Delta$

# Дикварки

ФОДС В.В.Абрамов и др.,  
ЯФ 45(5) (1987), 845–851



Постоянство отношения  $d/p$  с ростом  $p_T$ , в том числе в  $pp$ -столкновениях

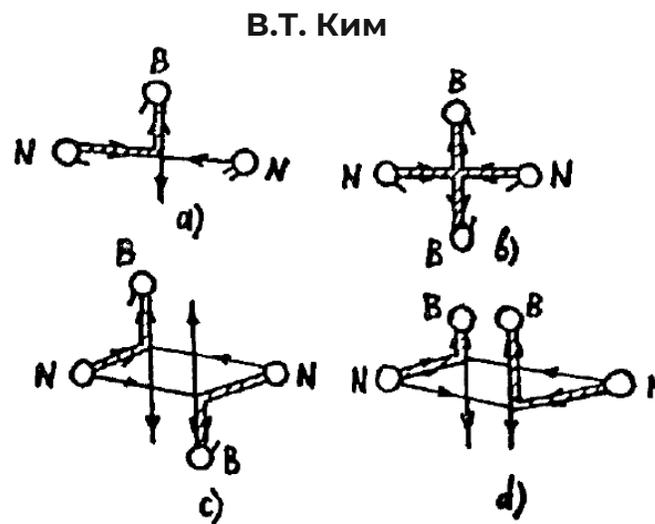
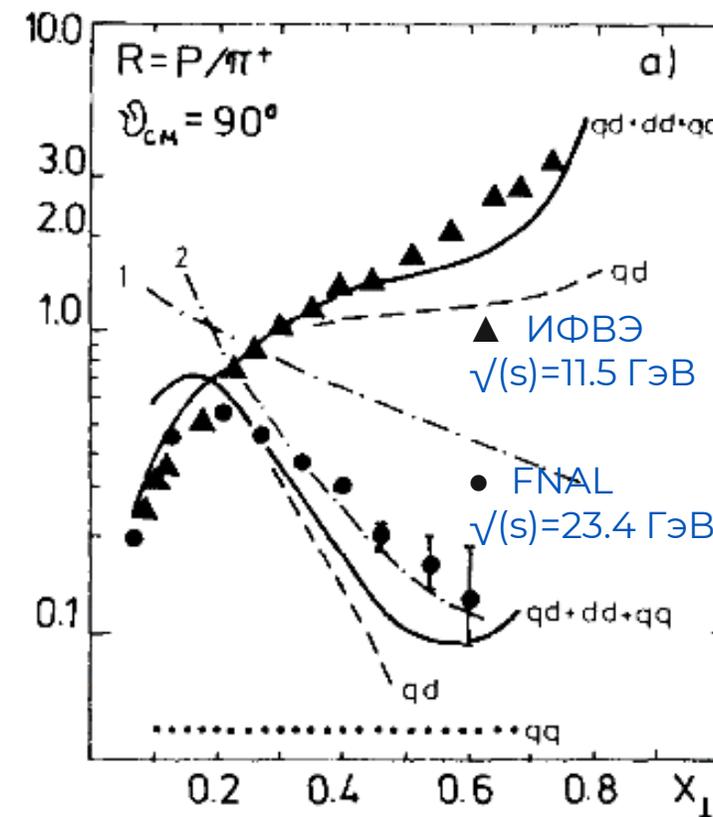


Fig. 2. The subprocesses diagrams giving contributions to the  $B = N$ ,  $\Lambda^0$ -baryon production in hard  $NN$ -collision: a) the quark-diquark subprocess; b) the diquark-diquark subprocess; c), d) the double quark-diquark collisions.

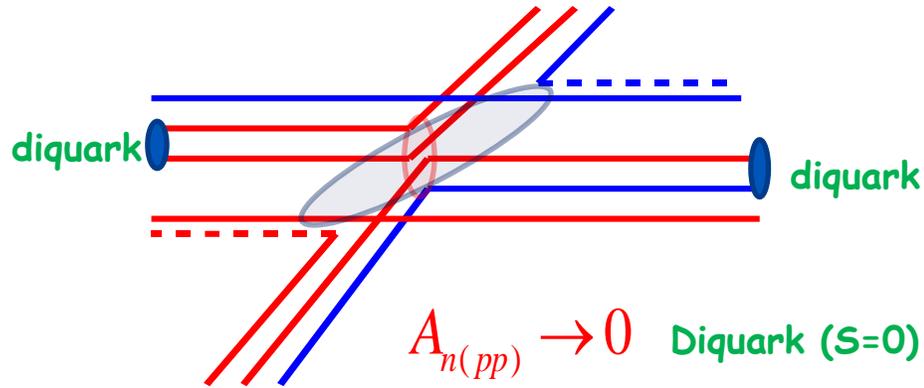


V. Kim Mod.Phys.Lett.A, v.3, n.9(1988)

Сильные эффекты при снижении энергии  
Описание данных с помощью дикварков

# Дикварки

Эксклюзивные реакции при больших  $p_T$   
 Флэйворный состав и спиновые состояния



$$\frac{d\sigma(pp \rightarrow pp\pi^0\pi^0)}{d\sigma(pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-)} \approx \frac{12}{7} \approx 1.7$$

With  $uu$  and  $ud$  diquarks

$$R = \frac{N(\pi^+\pi^-)}{N(\pi^0\pi^0)} = \frac{2}{7}$$

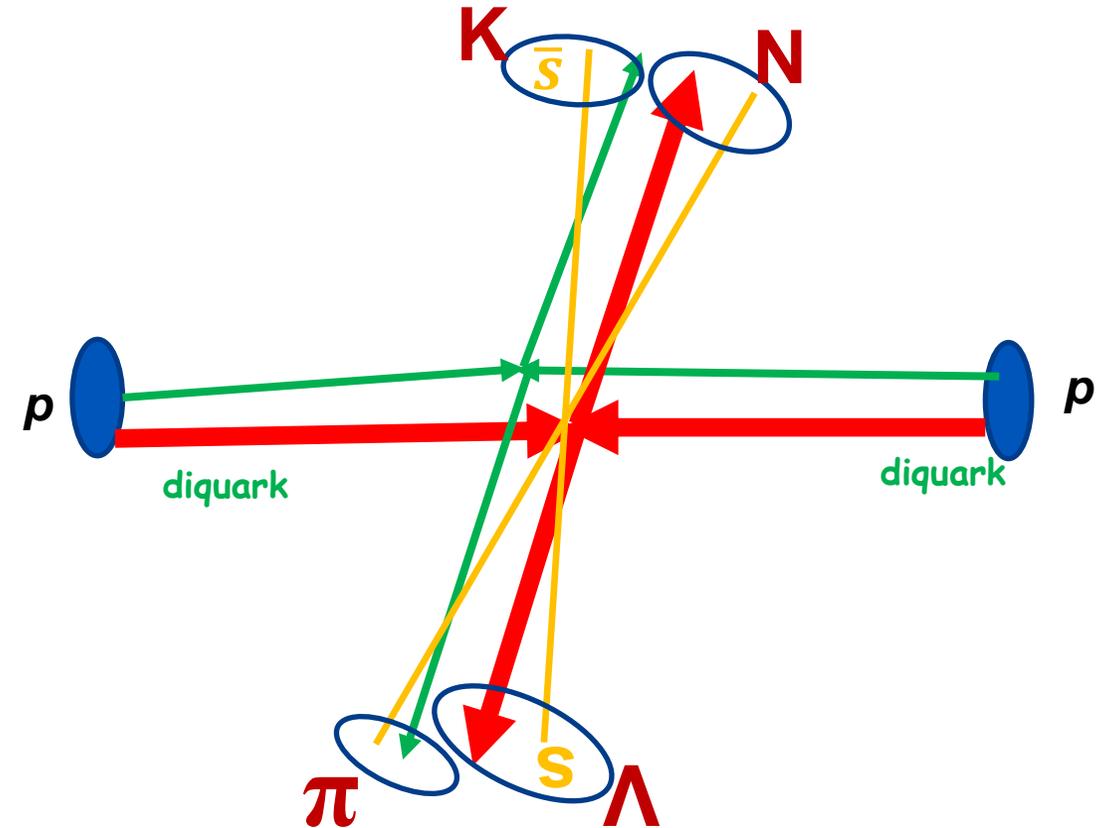
Without diquark

$$R = \frac{N(\pi^+\pi^-)}{N(\pi^0\pi^0)} \rightarrow 0$$

Diquark  $ud$  only

Измеряя отношения выходов  $\pi^\pm$  и  $\pi^0$ , можно получить указания на наличие и состав дикварков

$p + p \rightarrow \Lambda\pi + KN$



Повышенный выход гиперонов может послужить указанием на взаимодействие с дикварком

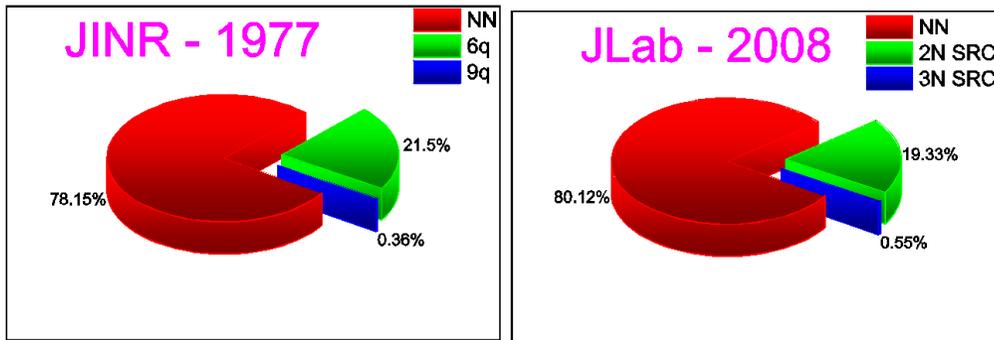
# Кумулятивные процессы, SRC и/или флуктоны

RNP - program at JINR

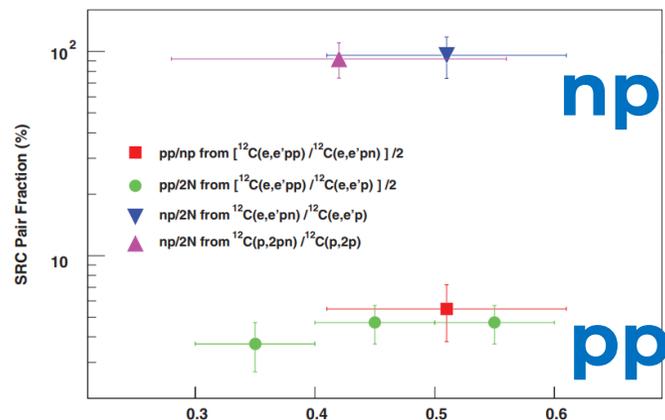
eA - program at JLab

V.V.B., V.K.Lukyanov, A.I.Titov, PLB, 67, 46(1977)

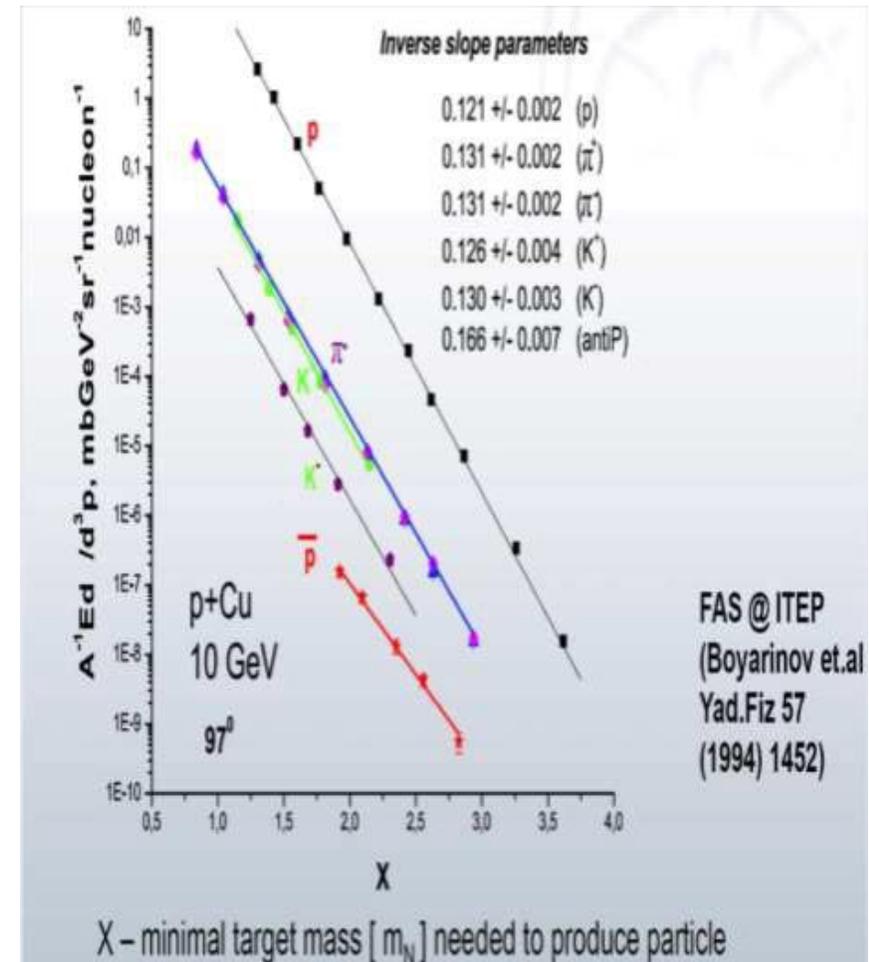
R.Subedi et al., Science 320 (2008) 1476-1478  
e-Print: arXiv:0908.1514 [nucl-ex]



Многокварковые (многонуклонные) состояния проявляются как в hA, так и в глубоконеупругих eA

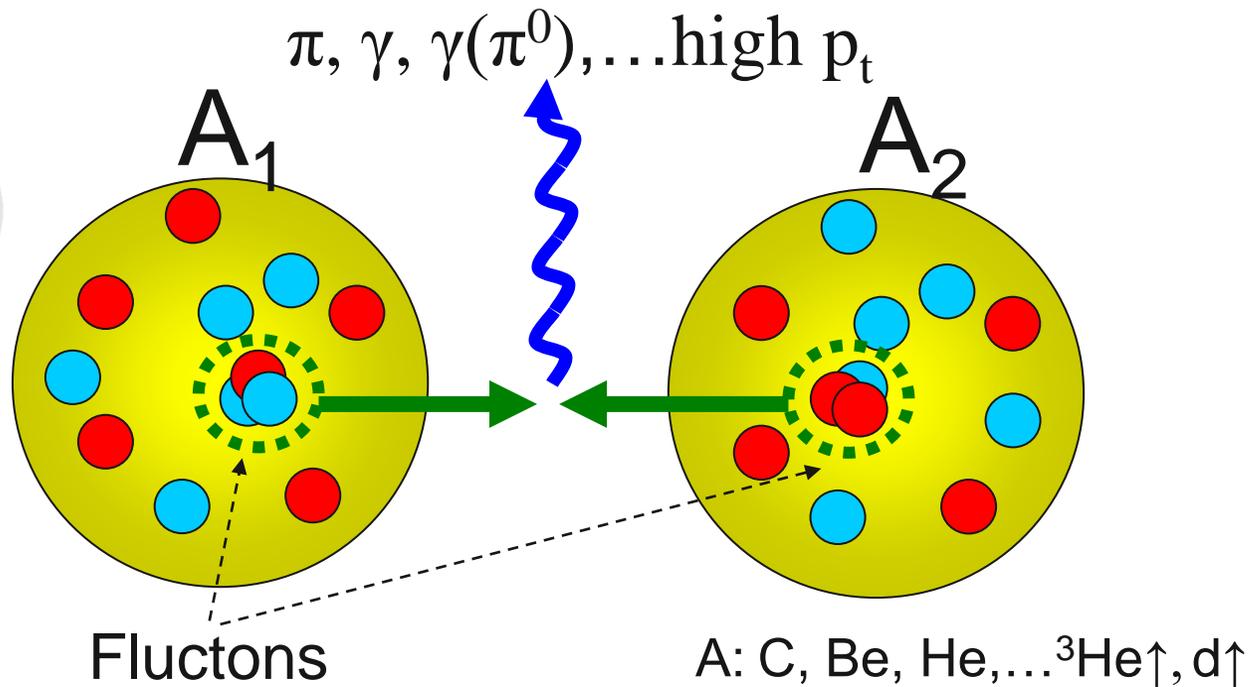


np корреляции сильно отличаются от pp

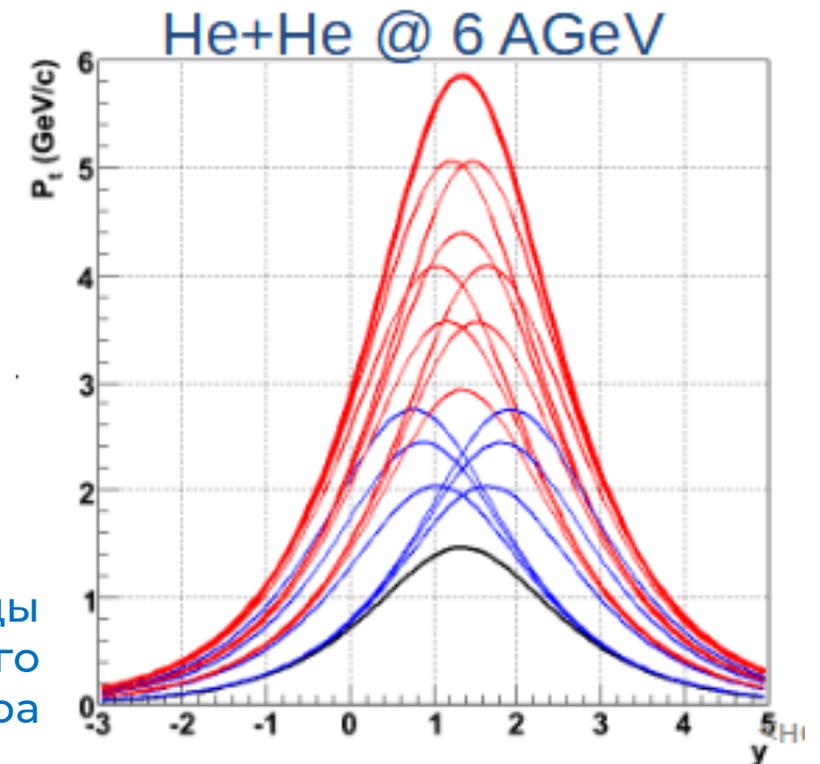


Кумулятивные процессы выходят далеко за кинематику p+p

# Флуктон-флуктонные взаимодействия

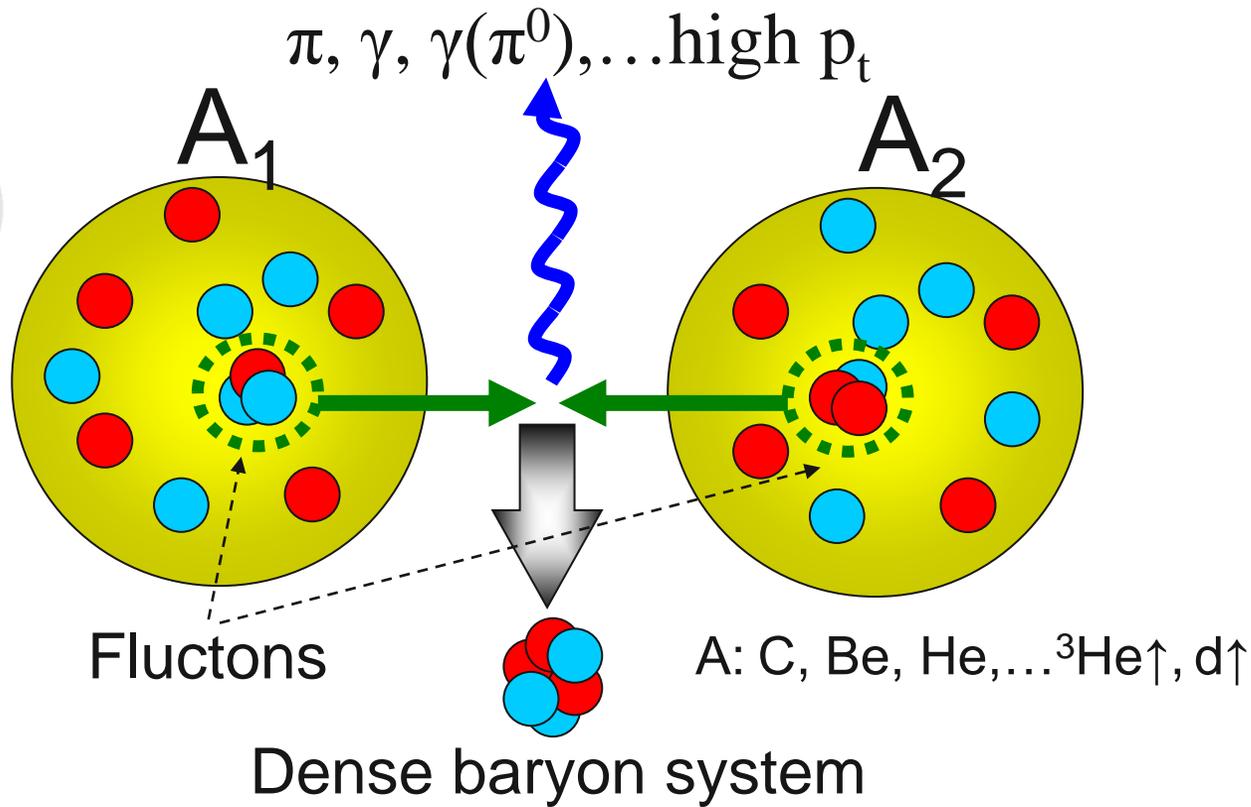


- ▶ Использование дважды-кумулятивных частиц @90° в с.с.м. в качестве триггера
- ▶ В центральной области быстрот кинематические границы дважды кумулятивных процессов наиболее сильно отстоят от  $1N + xN$

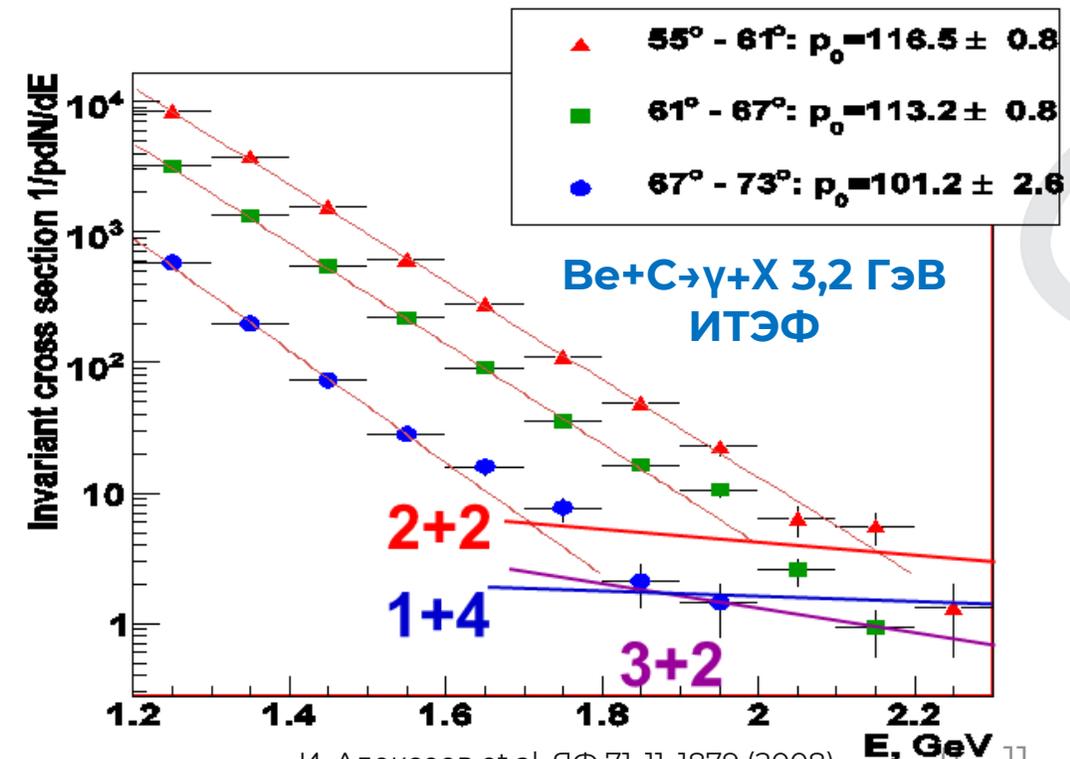


Кинематические границы  
(дважды) кумулятивного  
триггера

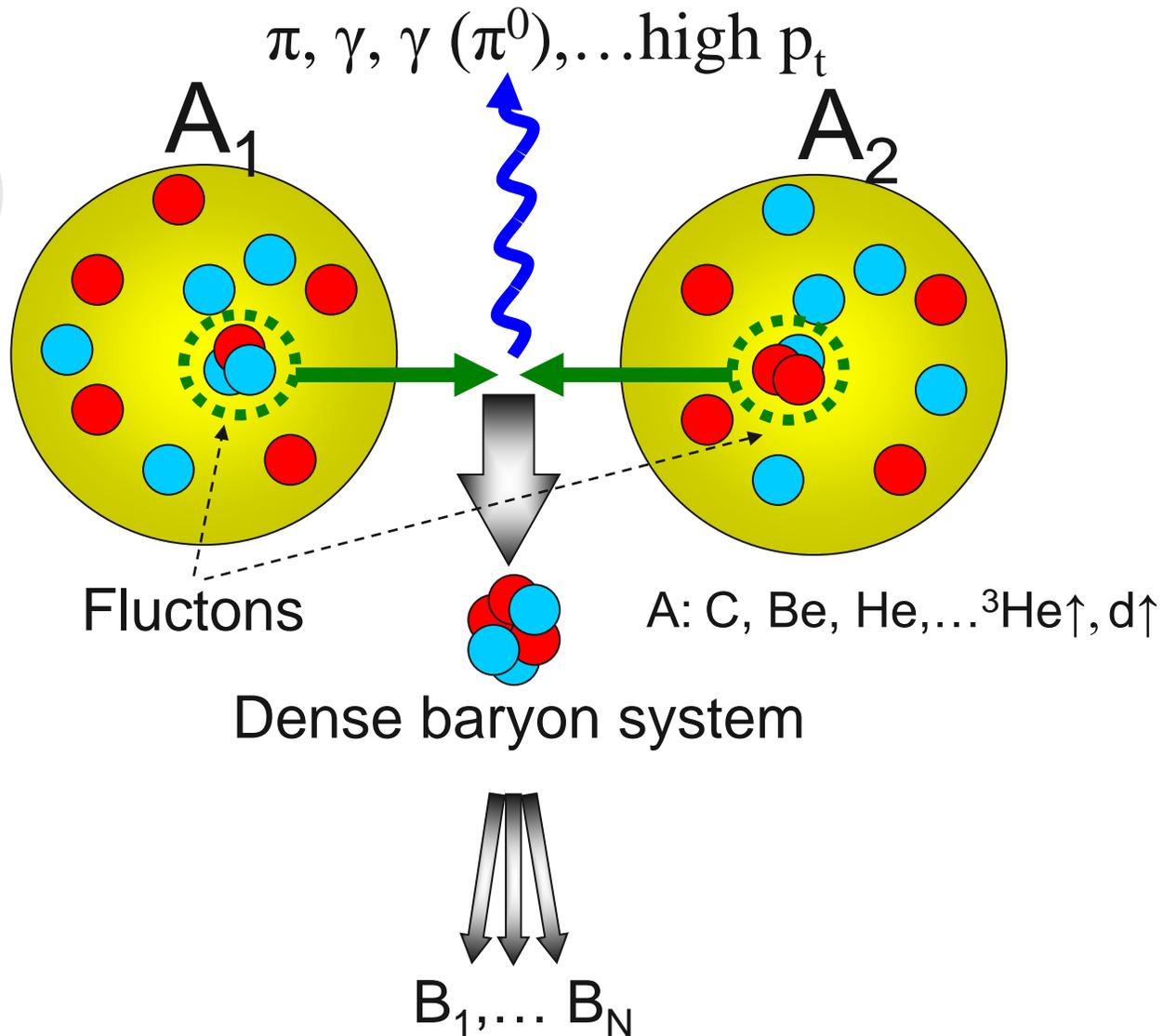
# Флуктон-флуктонные взаимодействия



- ▶ Использование дважды-кумулятивных частиц @90° в с.ц.м. в качестве триггера
- ▶ Эксперимент: Выход за кинематические границы  $2N + 2N$
- ▶ Не изучена экспериментально система отдачи



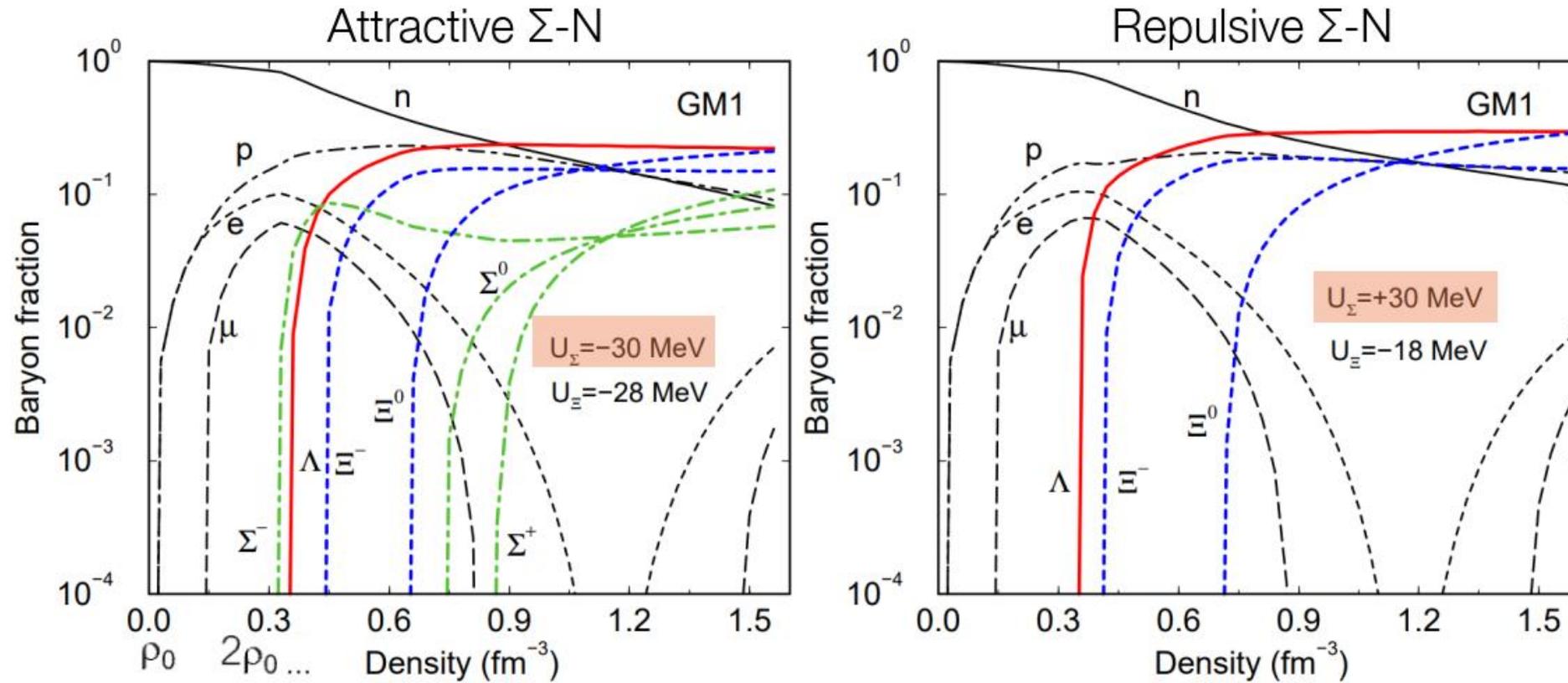
# Флуктон-флуктонные взаимодействия



- ▶ Система отдачи «холодная» ( $\delta p \rightarrow 0$ ) и плотная ( $\delta x \rightarrow 0$ )
- ▶ Тогда должны быть существенны ограничения принципа Паули
- ▶ Выход: бозонизация, дикварки, рождение странности...

Аналогии с ядрами нейтронных звёзд и сверхновыми???

# Motivation – Study the $\Sigma$ -N interaction



J. Schaffner-Bielich, Nucl. Phys. A 835 (2010) 279

- The  $\Sigma$ -N interaction is not well constrained
  - Many-body interactions and couplings become increasingly important at higher densities

«Constraining the  $p$ - $\Sigma^0$  interaction for the first time employing femtoscopy in ALICE» Andi Mathis on behalf of the ALICE XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy 4 June 2019

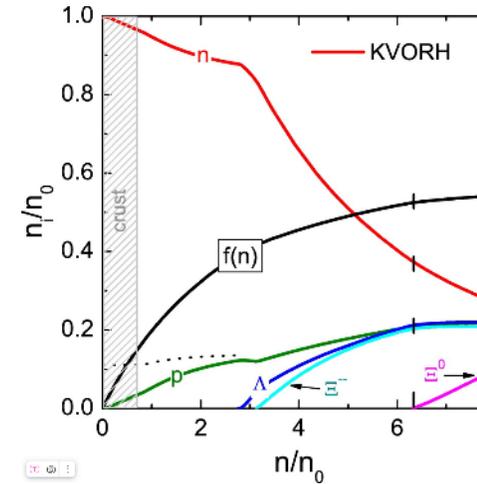
# Странность в плотной ядерной материи и нейтронных звёздах

С ростом плотности в нейтронных звёздах вырастает влияние запрета Паули

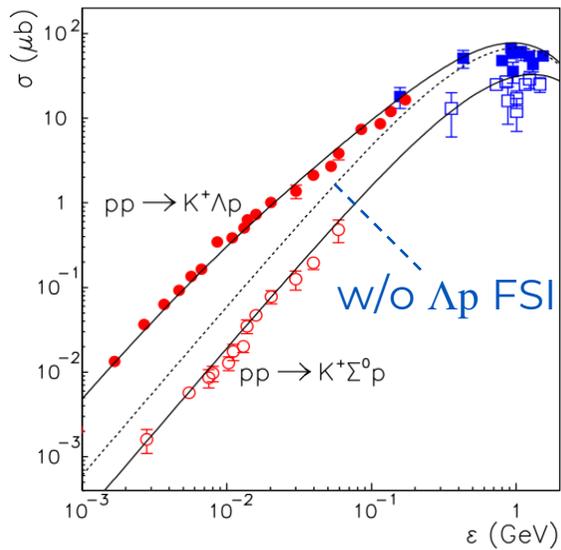
Выход 1\*: рождение  $\Sigma^-$  (в т.ч. для компенсации электрического заряда  $p^+$ )

Выход 2 : (при дальнейшем росте плотности) рождение  $n \rightarrow \Lambda^0$  ( $\Sigma^0$ )

\* Schaffner-Bielich NPA 835 (2010) 279



K.A. Maslov, E.E. Kolomeitsev,  
D.N. Voskresensky PL B748  
2015 369



A. Sibirtsev et.al. Eur. Phys. J. A 29, 363–367 (2006)

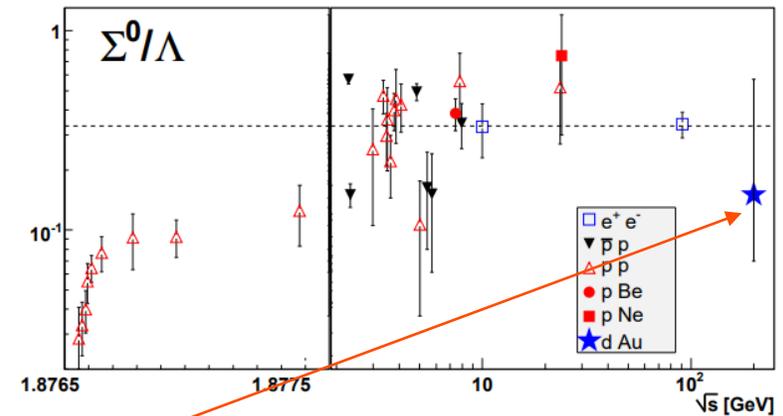
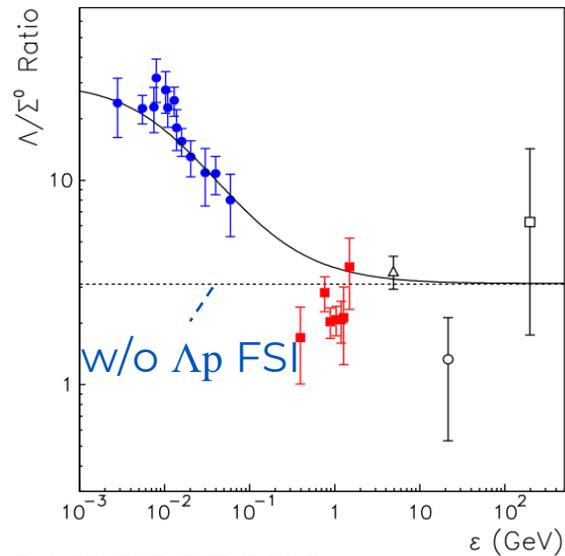


Figure 4:  $\Sigma^0/\Lambda$  results versus collision  $\sqrt{s}$  ( $\sqrt{s_{NN}}$  for  $p/d+A$ ) [1]. Meson-nucleon reaction results are excluded for clarity, but exist only at intermediate energies and lie in the same range. The dashed line is the ratio of isospin degeneracy factors (1/3).

G. Van Buren (for the STAR Collaboration) arXiv:nucl-ex/0512018

FSI зависят от размера области взаимодействия ( $\sim 1/r^2$ )

$\Lambda/\Sigma$  ( $E \rightarrow 0$ ) = 30, а  $\Lambda/\Sigma$  ( $E \gg 0$ ) = 3 для  $pp$ .

Для АА мало данных

# Дикварки и отношения $\Lambda/\Sigma$

## Зависимость изоспина и состава дикварков

From: [Craig Roberts <cdroberts.phy.anl@gmail.com>](mailto:cdroberts.phy.anl@gmail.com)

Craig D. Roberts et.al. Phys. Rev. C 96, 015208:

$\Lambda$  (изоспин=0):  $[ud]s$ ,  $[us]d - [ds]u$ ,  $\{us\}d - \{ds\}u$

$\Sigma^0$  (изоспин=1):  $[us]d + [ds]u$ ,  $\{us\}d + \{ds\}u$

в  $\Sigma^0$  разрешены только странные дикварки

«As you note below, depending on the assumed reaction mechanism, this difference in diquark content could affect the Lambda/Sigma production ratio in AA collisions.»

**Подробнее об этих и других сюжетах – в докладе Степана Шиманского**

# Экспериментальная установка (v0.0)

## Мишени

p, d, He<sup>3</sup>,... (в т.ч. поляризованные)  
ОИЯИ

## Вершинный детектор

ОИЯИ

## TOF и Трекер

TOF:  $\Delta t < 100$  пс

Трекер: straw

## СП тороидальный магнит

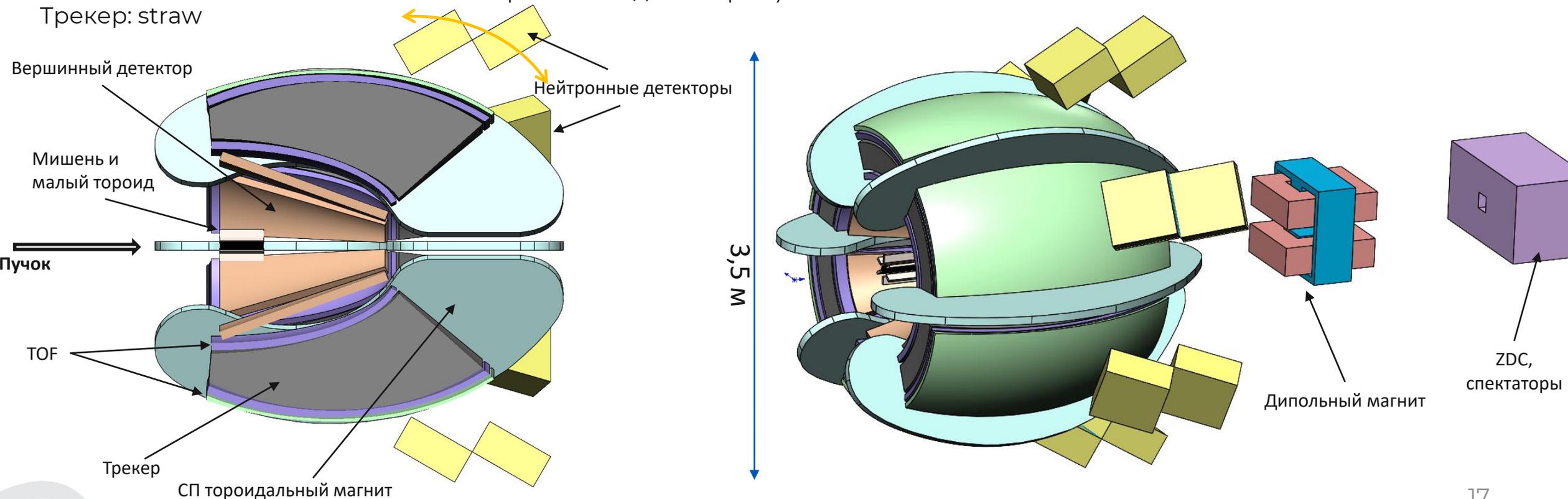
ИЯФ СО РАН

## Нейтронный детектор

- Акцептанс  $\sim 0.25$  sr ( $\sim 40\%$  полного акцептанса в центральной области быстрот)
- Временное разрешение  $< 150$  пс
- $\Delta p/p < 2\% \Rightarrow$  PID, трекинг (вместе с вершинным детектором)

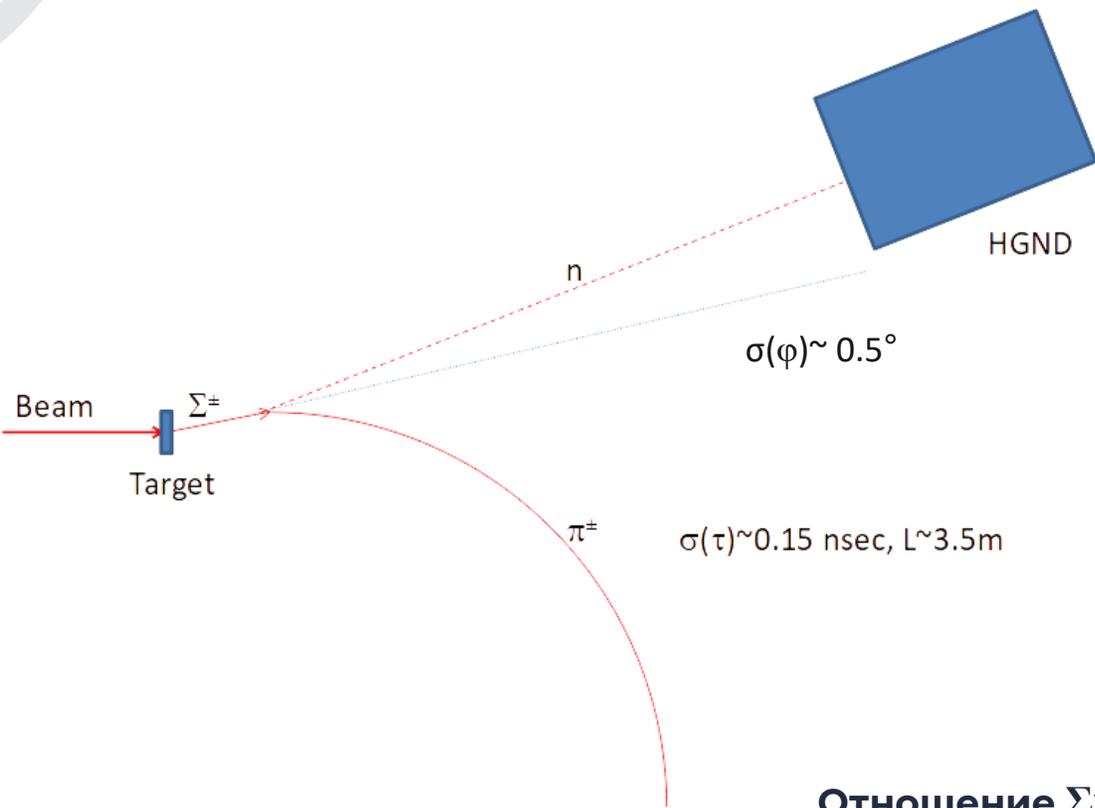
## Дипольный магнит и детекторы малых углов

- Регистрация спектров
- ZDC

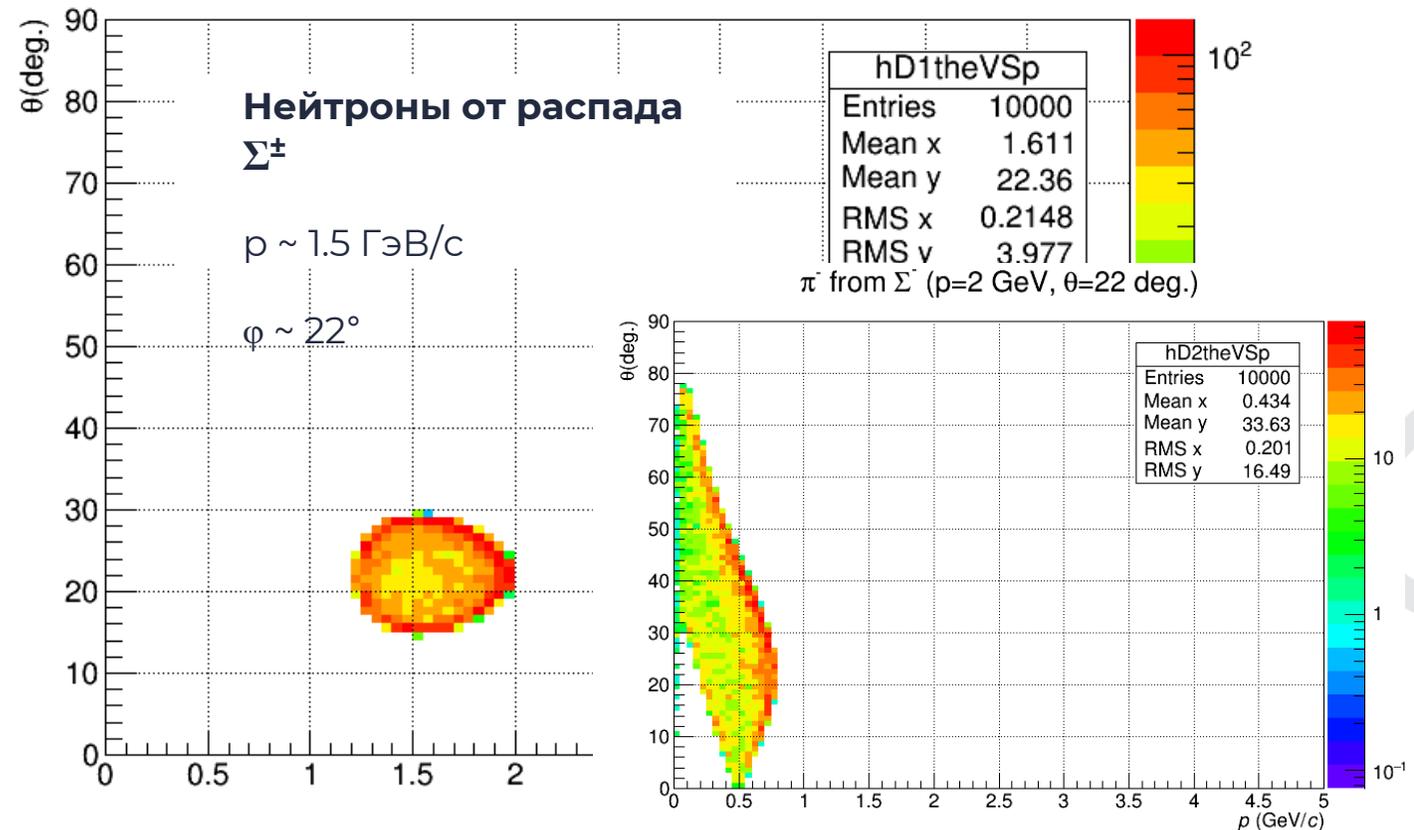


# Нейтронный детектор важен не только для регистрации нейтронов, но и гиперонов

Масштаб кин.энергий нейтронов в центральной области 0.5 – 3 ГэВ



$n$  from  $\Sigma^-$  ( $p=2 \text{ GeV}, \theta=22 \text{ deg.}$ )



**Отношение  $\Sigma^+/\Sigma^-$**

Систематику в  $\Sigma^+/\Sigma^-$  можно свести к минимуму переполюсовкой магнита

# Высокогранулированный нейтронный детектор HGND



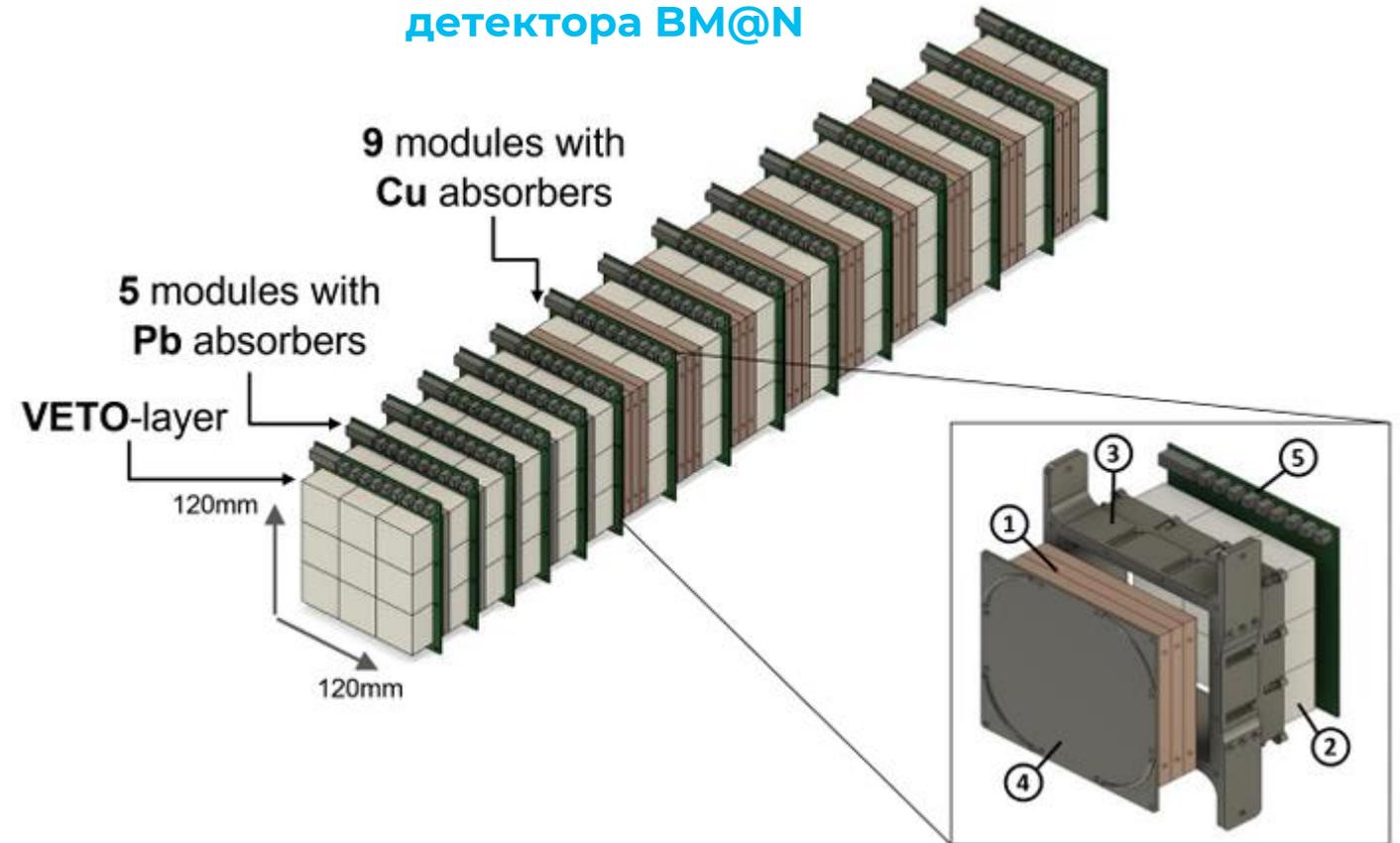
## 3D детектор

Аналоги: ZDC для NICA и HGND для BM@N

Регистрация сигнала в каждой ячейке

- ▶ Измерение нейтронов по времени пролёта
- ▶  $\sigma(t) < 150$  пс
- ▶ ~5 ячеек на нейтрон
- ▶ Регистрация  $>1$  нейтрона в модуле
- ▶ Регистрация  $p, d, \gamma$  (с заменой поглотителя на BGO)...

## Прототип нейтронного детектора BM@N



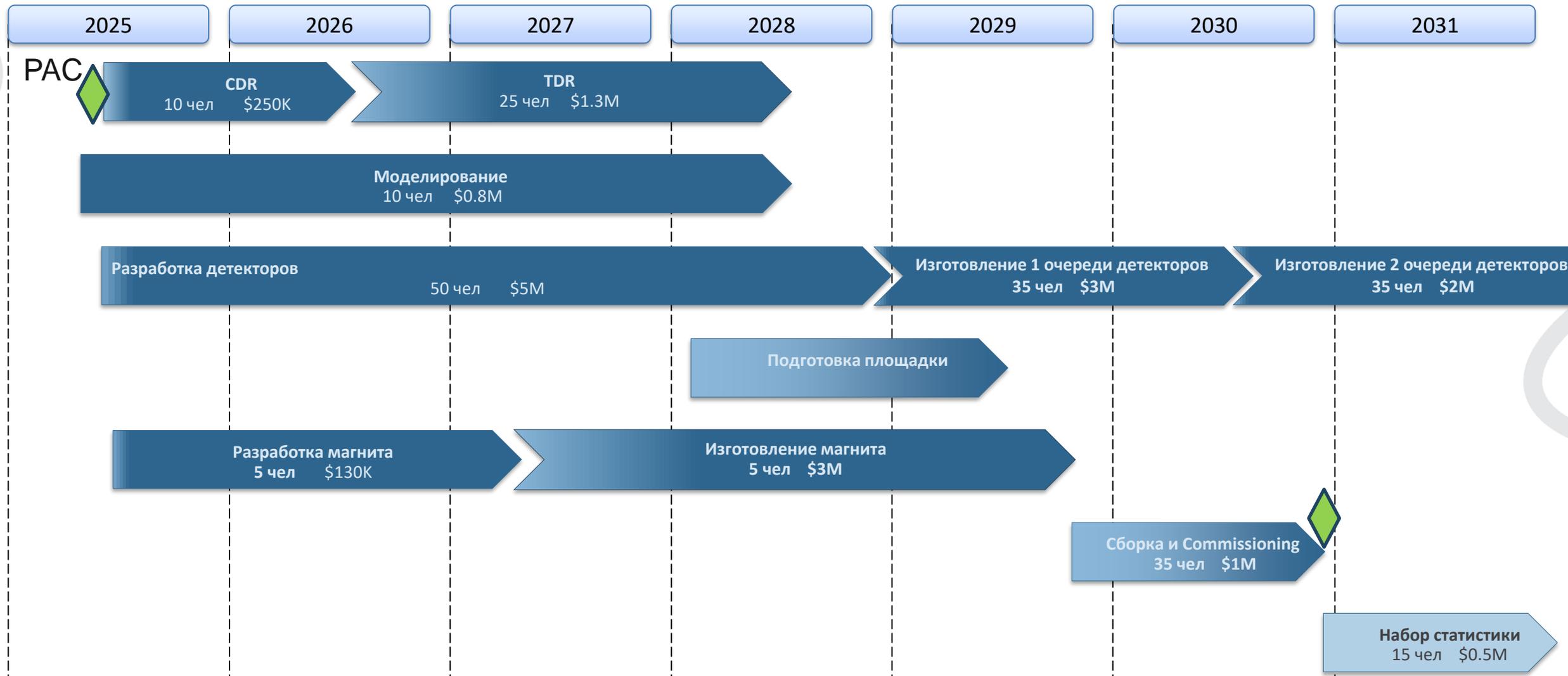
Поглотитель (1) и 9 сцинтилляционных ячеек (2) помещены в светонепроницаемую коробку (3), которая закрыта с одной стороны светонепроницаемой крышкой (4). Печатная плата (5) с девятью SIPM, усилителями, датчиком температуры и разъемами подключается непосредственно к сцинтилляционной матрице.

# Программа исследований



- Измерение анализирующих способностей в упругих  $p \uparrow + p \uparrow$ ,  $p \uparrow + n \uparrow$ ,  $n \uparrow + n \uparrow$  реакциях
- Измерение эксклюзивных NN реакций, в т.ч. с рождением гиперонов; изучение свойств дикварков
- Измерение сечений рождения всех основных компонент странности ( $\Lambda$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $K^0$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ) в АА взаимодействиях в диапазоне энергий Нуклотрона
- Изучение состава, кинематических и пространственно-временных характеристик системы частиц, сопровождающей рождение кумулятивной частицы с большим  $p_T$
- Фемтоскопия с участием нейтронов и гиперонов, включая  $\Sigma$ , при больших  $p_T$

# Планирование



# Коллектив, выразивший заинтересованность в участии в проекте на дату доклада



П. Алексеев<sup>3</sup>, Е. Антохин<sup>5</sup>, Т. Атовуллаев<sup>1</sup>, А. Атовуллаева<sup>1</sup>, С. Афанасьев<sup>1</sup>, А. Балдин<sup>1</sup>, В. Блеко<sup>1</sup>, А. Бочкова<sup>1</sup>, Н. Жигарева<sup>3</sup>, А. Канцырев<sup>3</sup>, В. Ким<sup>4</sup>, А. Мартемьянов<sup>3</sup>, М. Милой<sup>1</sup>, М. Пацюк<sup>1</sup>, Е. Piasetzky<sup>6</sup>, Т. Рыбаков<sup>2</sup>, Д. Сакулин<sup>1</sup>, А. Саламатин<sup>1</sup>, А. Скобляков<sup>3</sup>, Г. Таер<sup>3</sup>, Е. Тарковский<sup>3</sup>, С. Черепанов<sup>1</sup>, О. Нен<sup>7</sup>,...

1. ОИЯИ
2. НИЯУ МИФИ
3. ККТЭФ НИЦ КИ
4. ПИЯФ НИЦ КИ
5. ИЯФ СО РАН
6. Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel
7. Massachusetts Institute for Technology, Cambridge, MA, USA



холл Лаборатории Теоретической Физики  
ОИЯИ, г. Дубна

Г.Б. Шарков, А.В. Ставинский, С.С. Шиманский et.al. Семинар ДФВЭ апрель 2025



**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

# Дополнительные материалы



CC URQMD 10 <sup>5</sup> ev.	2 GeV/c	3GeV/c	4GeV/c	10GeV/c	30GeV/c
all	2 520 772	2 579 414	2 640 908	2 882 405	3 283 145
P	271 961	266 605	266 161	248 805	228 866
N	271 720	266 368	266 624	248 612	228 820
$\pi^0$	43 878	64 268	85 051	162 099	282 712
$\pi^+$	37 929	55 837	74 365	145 040	255 919
$\pi^-$	37 969	55 702	74 208	144 887	254 974
$K^0$	230	1 121	2 398	8 278	20 299
$K^+$	235	1 110	2 304	8 365	20 332
$\Lambda$	225	951	1 922	5 878	11 331
$\Sigma^0$	86	468	927	2 451	3 857
$\Sigma^+$	66	372	788	1 972	3 278
$\Sigma^-$	83	362	785	2 099	3 247
anti $K^0$	2	45	130	2 027	9 500
$K^-$	3	33	130	2 102	9 623

**3 A ГэВ:  $K^0+K^+(2\ 231)\sim\Lambda+\Sigma(2\ 153)$**

# Фактор 3 Сроки SPD

Набор физических данных SPD начнётся >2030 г.

## MPD Multi-Purpose Detector

Stage-I → start of commissioning in 2025

Stage-II → 2030+

TPC:  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $|\eta| \leq 1.6$ ; TOF, EMC:  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $|\eta| \leq 1.4$   
 FFD:  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $2.9 < |\eta| < 3.3$ ; FHCAL:  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $2 < |\eta| < 5$

+ ITS :  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $|\eta| \leq 3$   
 + Forward Spectrometers:  $|\Delta\phi| < 2\pi$ ,  $|\eta| \leq 2.2$

Au+Au @ 11 GeV (full event simulation and reconstruction)

TPC momentum resolution for  $h^\pm$

MPD simulations TPC

MPD simulations TOF

ECAL  $\gamma$  - energy resolution

В.Г. Рябов @ Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, 2025

## Physics of the first stage

Transition scan

Non-perturbative QCD
Perturbative QCD

- ❖ Spin effects in p-p, p-d and d-d elastic scattering
- ❖ Spin effects in hyperons production
- ❖ Multiquark correlations
- ❖ Dibaryon resonances
- ❖ Physics of light and intermediate nuclei collision
- ❖ Exclusive reactions
- ❖ Hypernuclei
- ❖ Open charm and charmonia near threshold
- ❖ Auxiliary measurements for astrophysics
- ❖ ...

В.Г. Рябов @ Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, 2025

$10^{10} / \text{сброс} \sim 5 \cdot 10^{33} / \text{см}^2 / \text{с}$

$p \uparrow, d \uparrow, {}^3\text{He} \uparrow + p \uparrow, d \uparrow, {}^3\text{He} \uparrow$



Нуклотрон уже сейчас позволяет изучать спиновую физику и редкие процессы при  $\sqrt{s} \sim 5$  ГэВ/с

$n \uparrow + n \uparrow$ , странность в дикварках, 3-частичные SRC, флуктон-флуктонные корреляционные измерения,  $\Sigma^-$  в холодной плотной барионной материи...