



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Физическая программа исследований в области больших p_T на выведенных пучках Нуклотрона комплекса NICA

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

17.02.2025

Сессия-конференция секции ядерной физики
ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова

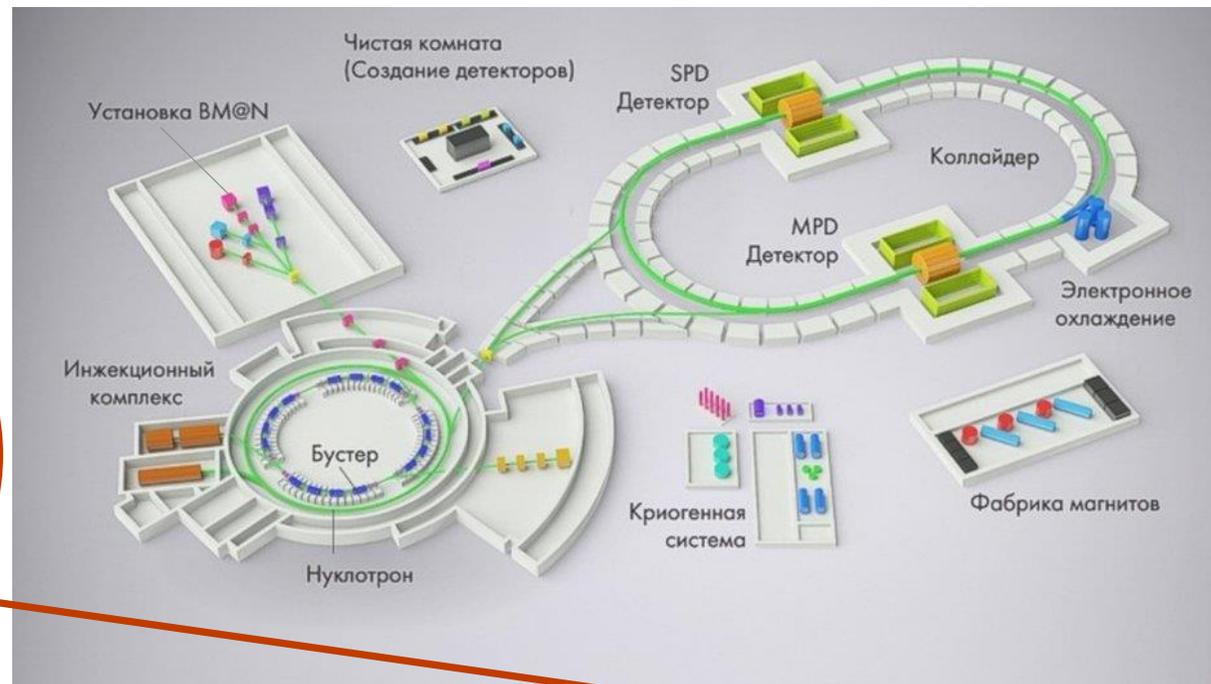
Некоторые проблемы современной нпКХД



- 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?)

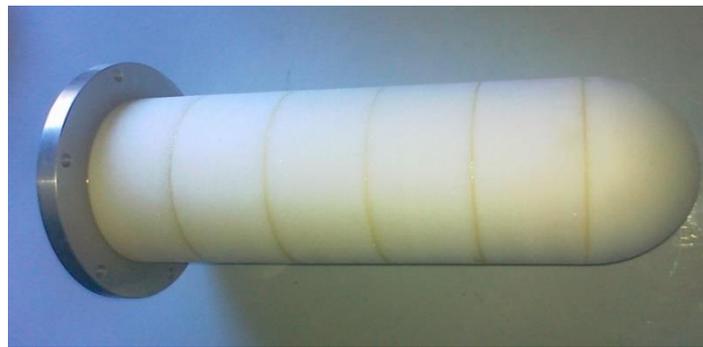
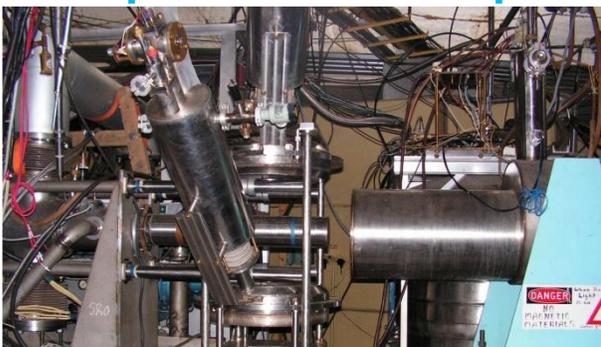
Параметры Нуклотрона подходят для изучения редких процессов с $p_T > 0.5$ ГэВ/с

Максимальная E_p	12 ГэВ
Максимальная $E_A(q/A=0.5)$	6 ГэВ
Интенсивность (ρ) на сброс 2 сек	до 10^{10}
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

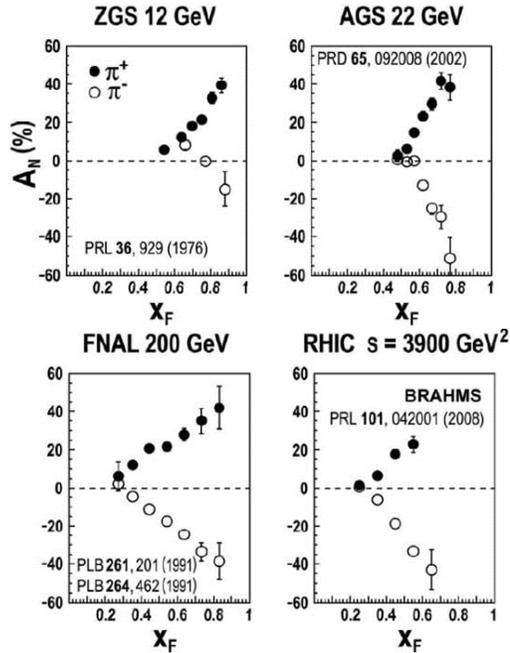
Поляризованные и криогенные мишени



Мишень с замороженными спинами – МРТ LHEP JINR mobile cryogenic target

Спиновая физика

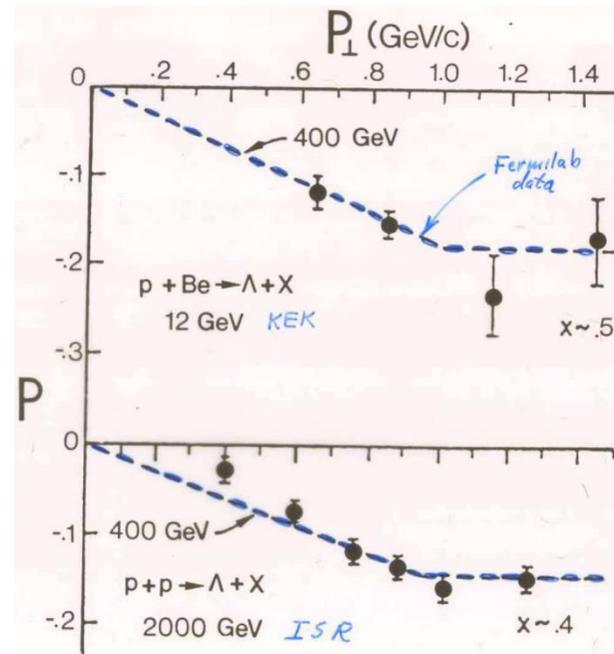
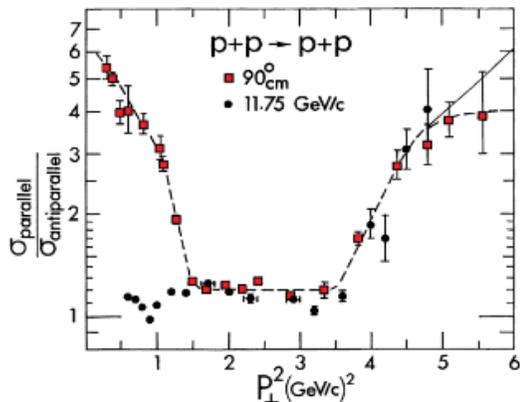
C. Aidala SPIN2008



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

Упругие реакции с поляризованным $p\uparrow + n\uparrow$ при 90° 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 (π, K, \dots)

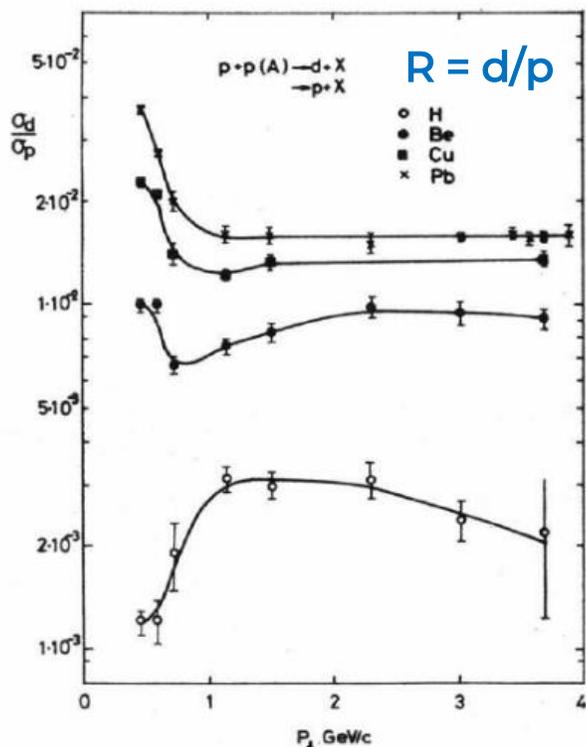
Механизмы поляризации гиперонов

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

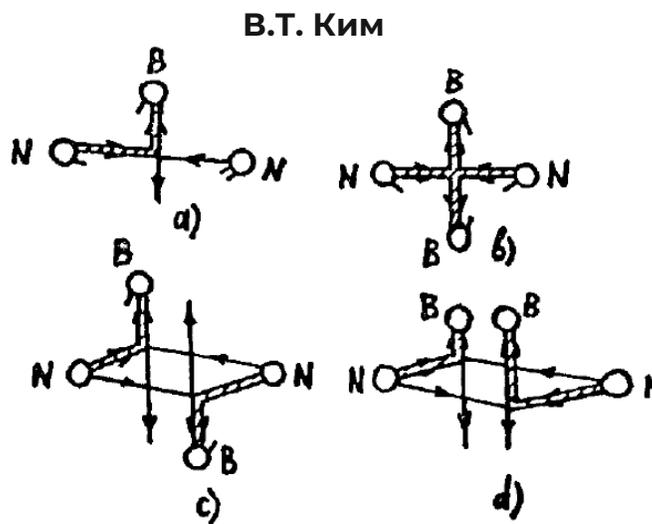
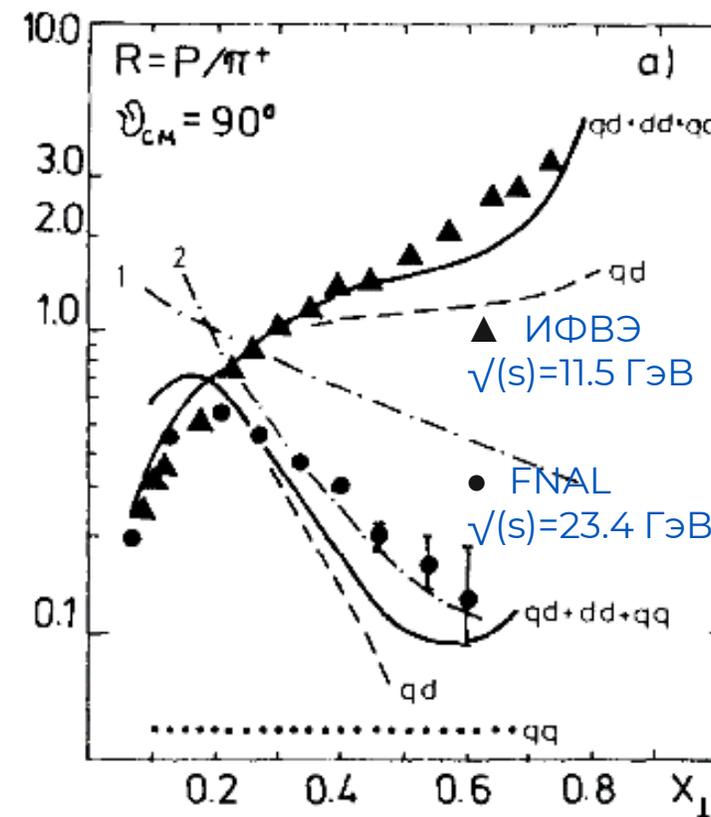


Fig. 2. The subprocesses diagrams giving contributions to the $B = N$, Λ^0 -baryon production in hard NN -collision: a) the quark-diquark subprocess; b) the diquark-diquark subprocess; c), d) the double quark-diquark collisions.

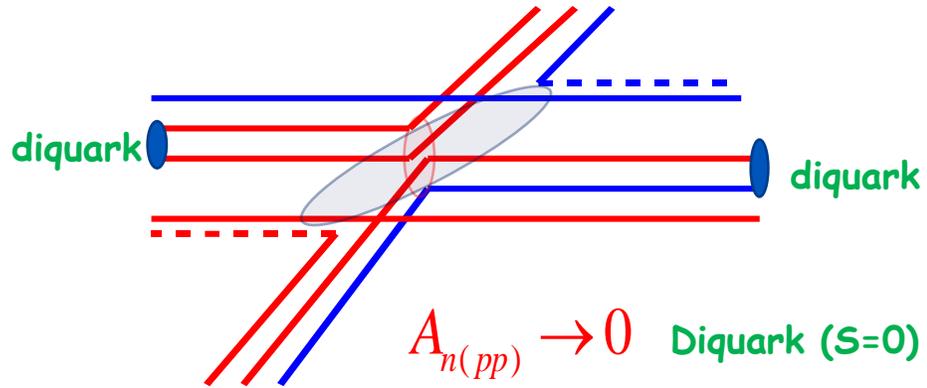


V. Kim Mod.Phys.Lett.A, v.3, n.9(1988)

Сильные эффекты при снижении энергии
Описание данных с помощью дикварков

Дикварки

Эксклюзивные реакции при больших p_T
 Флэйворный состав и спиновые состояния



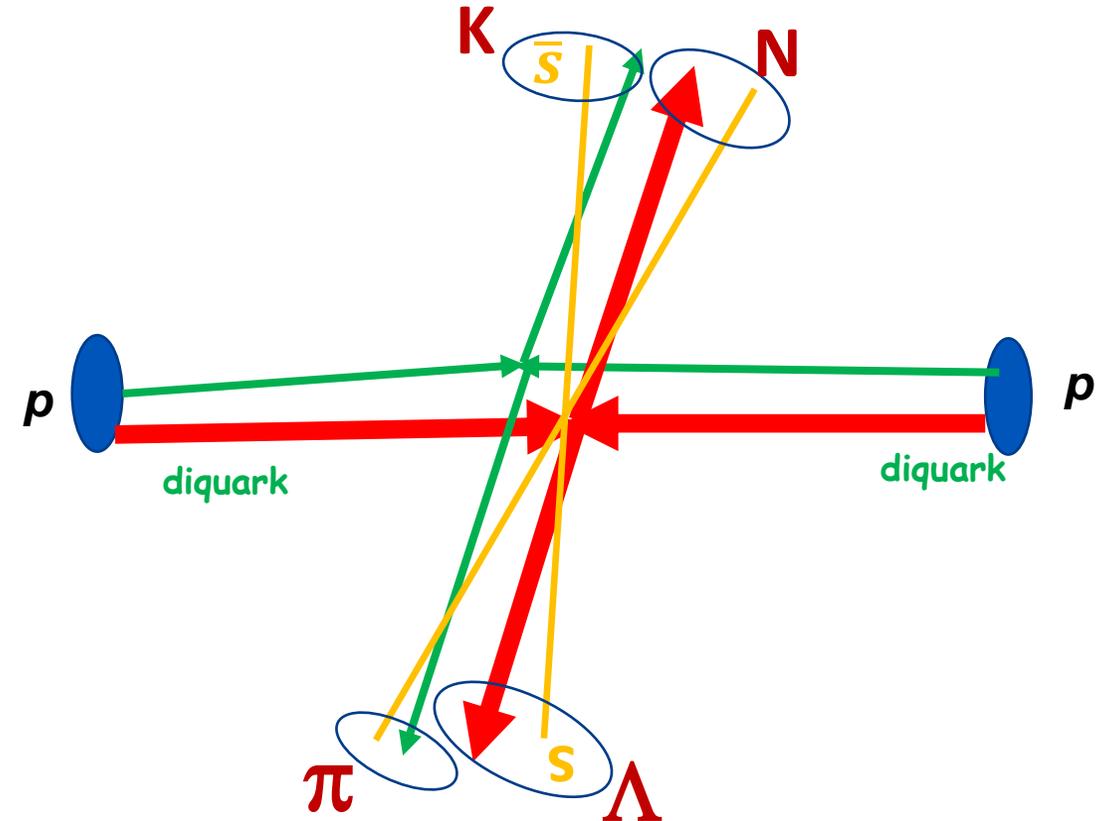
$$\frac{d\sigma(pp \rightarrow pp\pi^0\pi^0)}{d\sigma(pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-)} \approx \frac{12}{7} \approx 1.7 \quad \text{With } uu \text{ and } ud \text{ diquarks}$$

$$R = \frac{N(\pi^+\pi^-)}{N(\pi^0\pi^0)} = \frac{2}{7} \quad \text{Without diquark}$$

$$R = \frac{N(\pi^+\pi^-)}{N(\pi^0\pi^0)} \rightarrow 0 \quad \text{Diquark } ud \text{ only}$$

Измеряя отношения выходов π^\pm и π^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

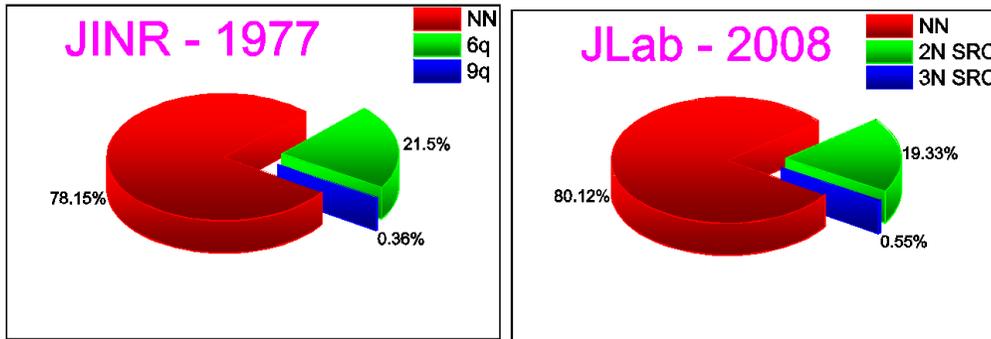
SRC и/или кумулятивные процессы

RNP - program at JINR

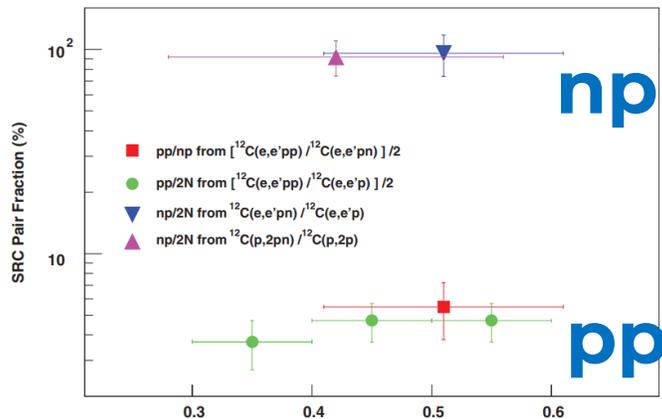
eA - program at JLab

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

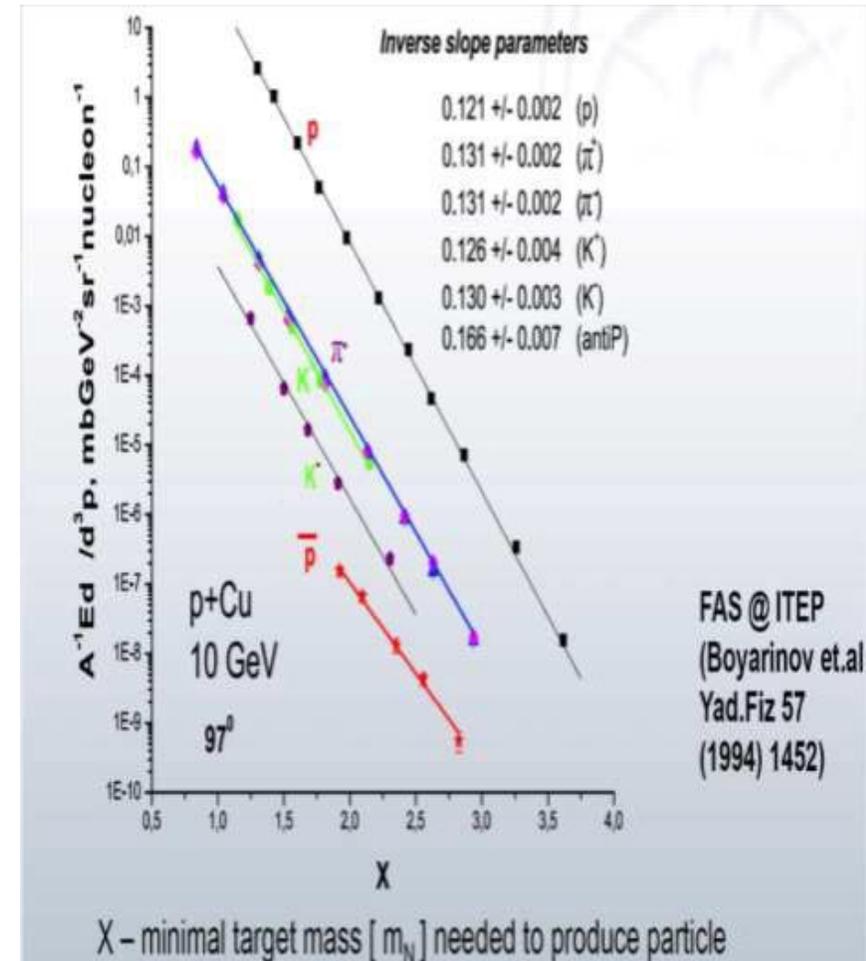
R.Subedi et al., Science 320 (2008) 1476-1478
e-Print: arXiv:0908.1514 [nucl-ex]



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

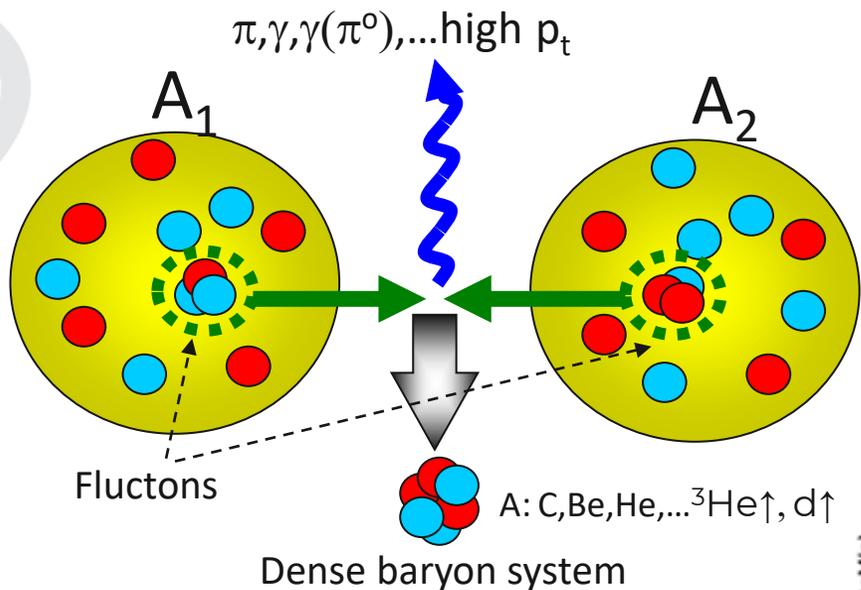


np корреляции сильно отличаются от pp



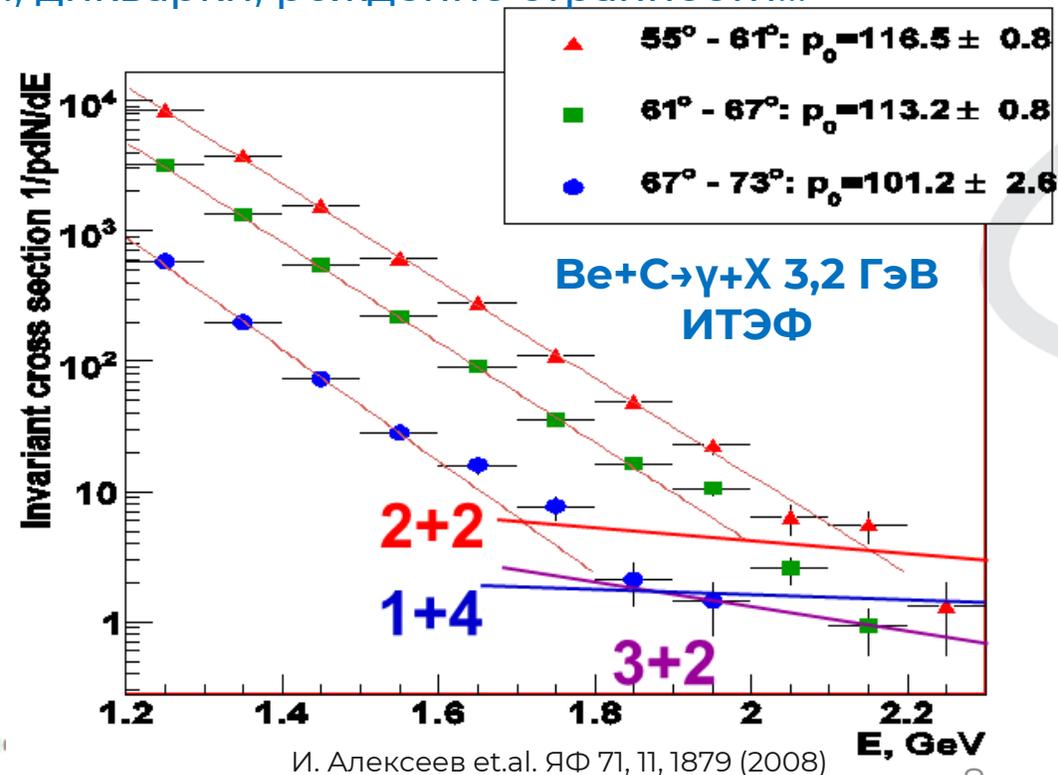
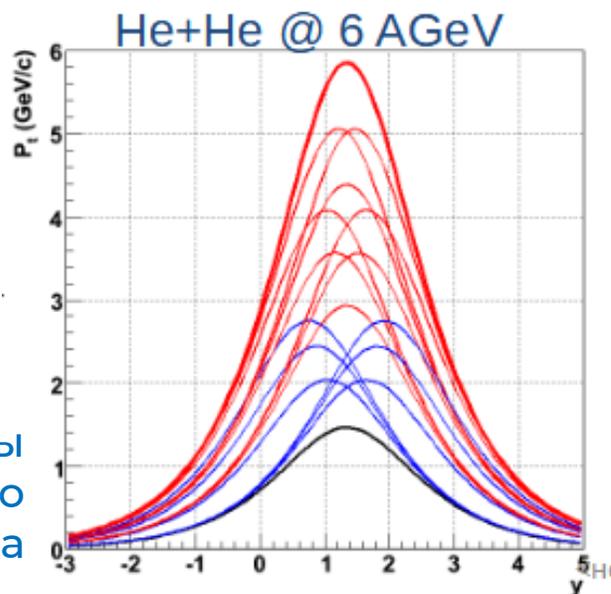
Кумулятивные процессы выходят далеко за кинематику p+p

Флуктон-флуктонные взаимодействия – способ создать плотную холодную материю в лаборатории



- ▶ Кумулятивная частица может служить триггером для регистрации системы отдачи
- ▶ 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...

Кинематические границы (дважды) кумулятивного триггера



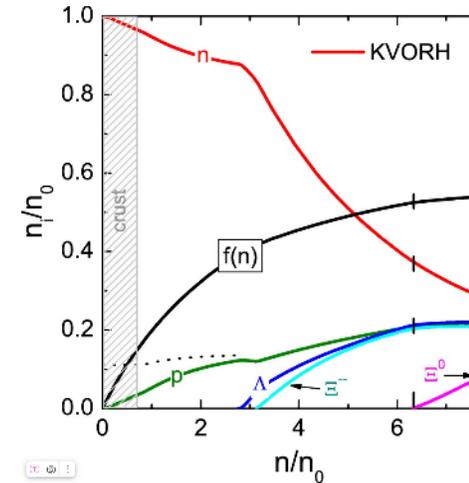
Странность в плотной ядерной материи и нейтронных звёздах

С ростом плотности в нейтронных звёздах вырастает влияние запрета Паули

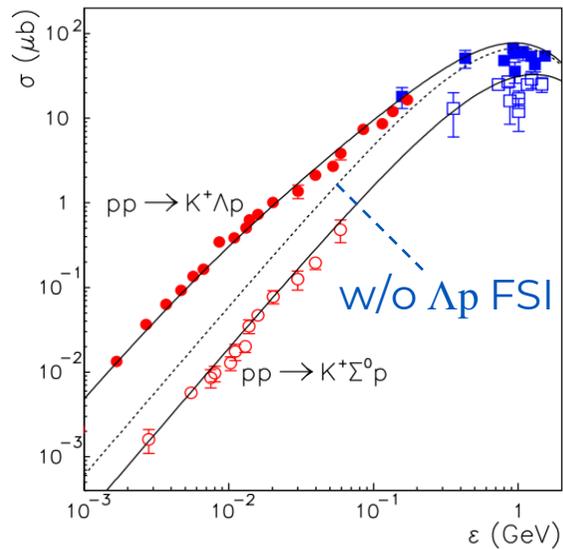
Выход 1*: рождение Σ^- (в т.ч. для компенсации электрического заряда p^+)

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

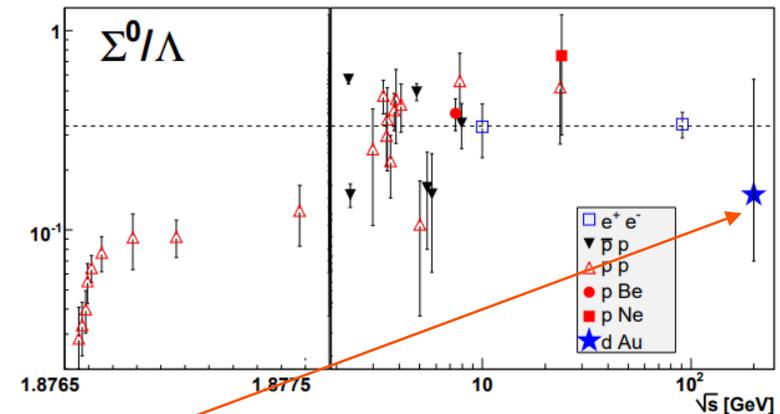
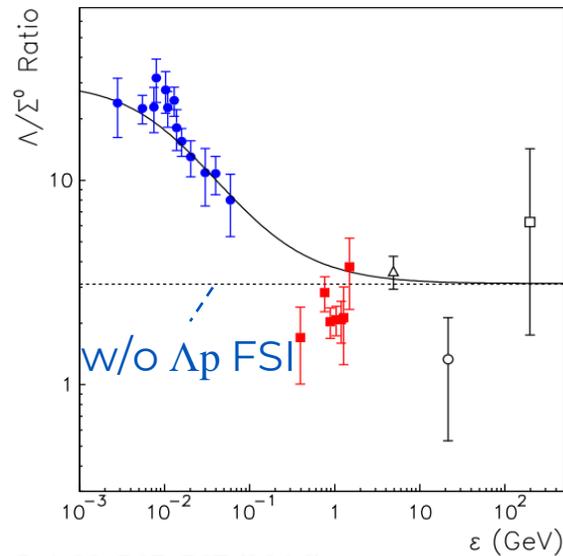


Figure 4: Σ^0/Λ results versus collision \sqrt{s} ($\sqrt{s_{NN}}$ for $p/d+A$) [1]. Meson-nucleon reaction results are excluded for clarity, but exist only at intermediate energies and lie in the same range. The dashed line is the ratio of isospin degeneracy factors (1/3).

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

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

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

Для АА мало данных

Дикварки и отношения Λ/Σ



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:

Λ (изоспин=**0**): [ud]s, [us]d-[ds]u, {us}d-{ds}u

Σ^0 (изоспин=**1**): [us]d+[ds]u, {us}d+{ds}u

в Σ^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.»

Зависимость изоспина и спина дикварков

$p_T > 0.5$ ГэВ/с (подавлено взаимодействие в конечном состоянии)

Model baryon=quark+diquark:

diquark (ud, uu, dd): I=S = 1 or 0

поэтому интересно измерять отношение на поляризованных пучках

И.Ю.Кобзарев, Б.В.Мартемьянов, М.Г.Щепкин
УФН 162, вып.4,1992,стр.1-41(in Russian)
See, also, Anisovich A.V., et al., Int. J. Modern Phys. A, 25:15 (2010); arXiv:1001.1259[hep-ph]
(Quark-Diquark Systematics of Baryons)

Экспериментальная установка (v0.0)

Мишени

p, d, He³,... (в т.ч. поляризованные)
ОИЯИ

Вершинный детектор

ОИЯИ

TOF и Трекер

TOF: $\Delta t < 100$ пс

Трекер: straw

СП тороидальный магнит

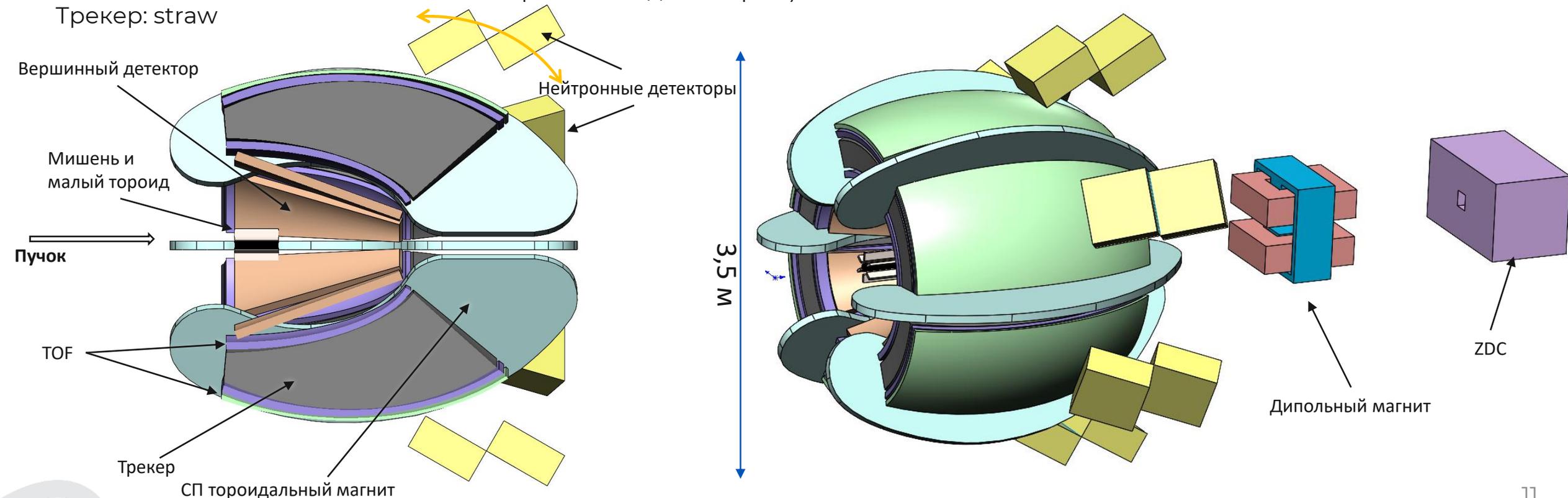
ИЯФ СО РАН

Нейтронный детектор

- Акцептанс ~ 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)

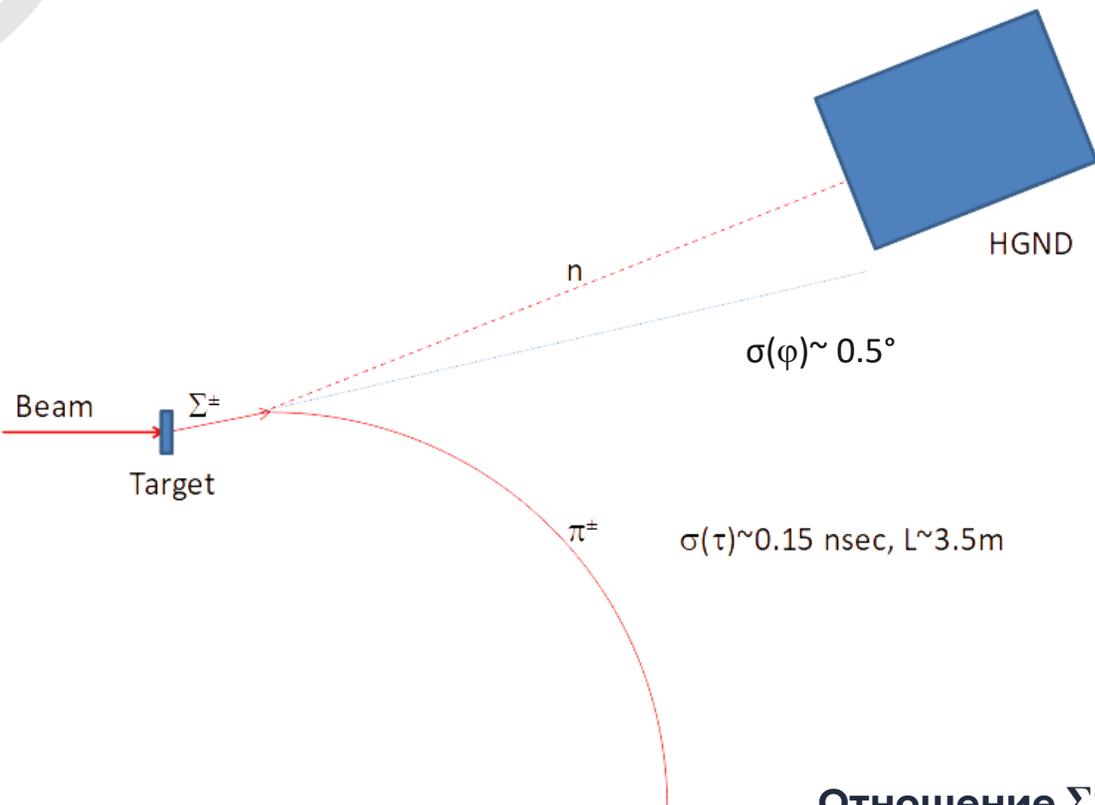
Дипольный магнит и детекторы малых углов

- Регистрация спектров
- ZDC



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

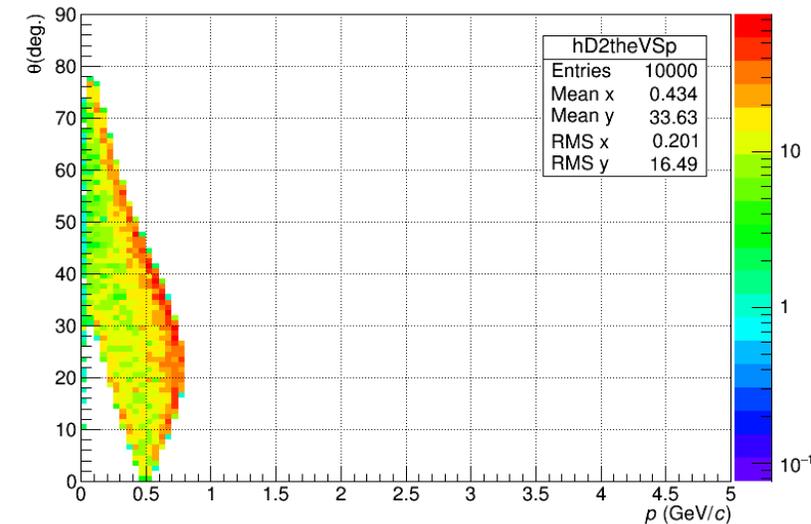
Масштаб кин.энергий нейтронов в центральной области 0.5 – 3 ГэВ



n from Σ^- ($p=2$ GeV, $\theta=22$ deg.)



π^- from Σ^- ($p=2$ GeV, $\theta=22$ deg.)



Отношение Σ^+/Σ^-

Систематику в Σ^+/Σ^- можно свести к минимуму переполюсовкой магнита

Высокогранулированный нейтронный детектор HGND

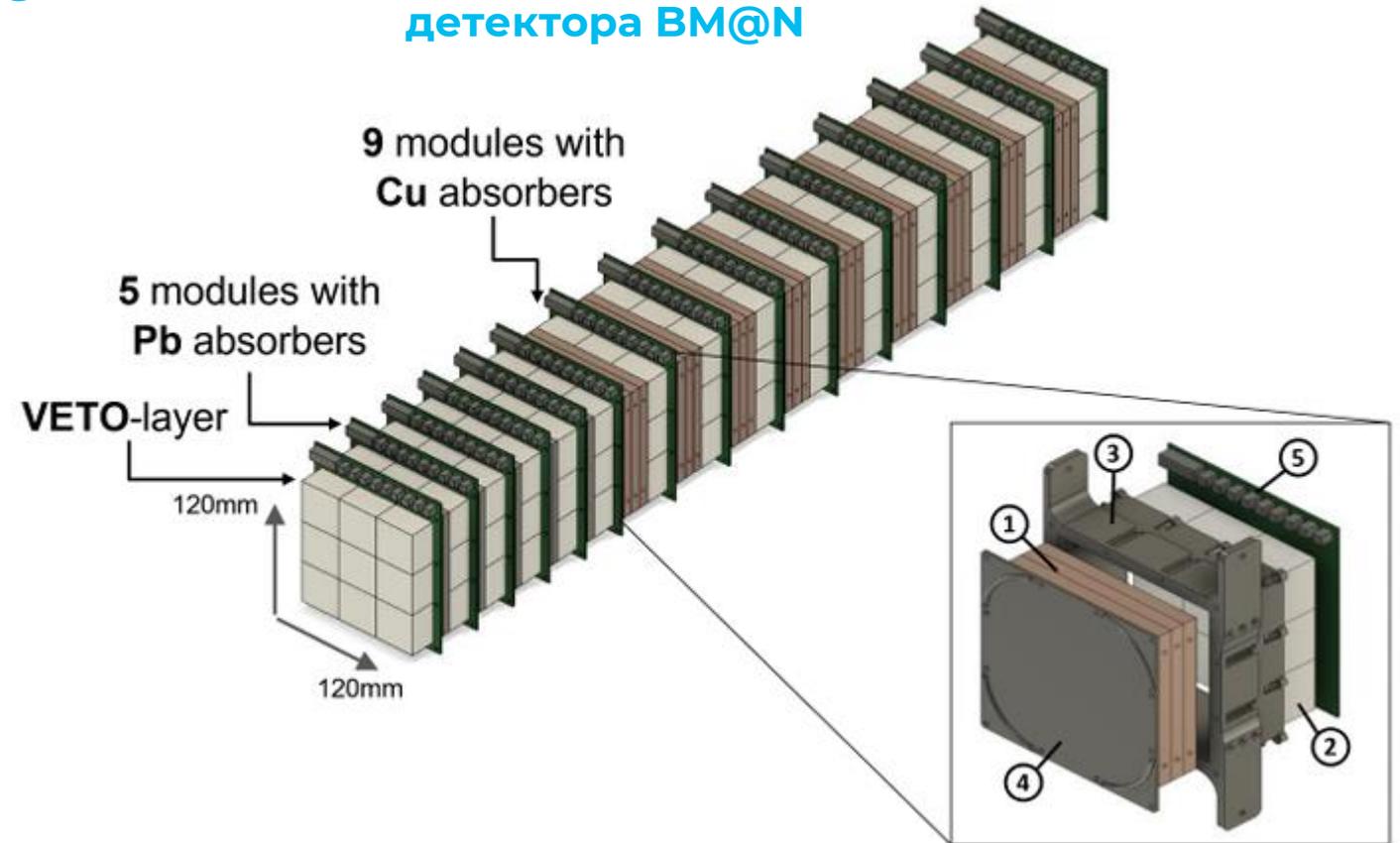
3D детектор

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, γ (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.

Коллектив, выразивший заинтересованность в участии в проекте на дату доклада



П. Алексеев³, Е. Антохин⁵, Т. Атовуллаев¹, А. Атовуллаева¹, С. Афанасьев¹, А. Балдин¹, В. Блеко¹, А. Бочкова¹, Н. Жигарева³, А. Канцырев³, В. Ким⁴, А. Мартемьянов³, М. Милой¹, М. Пацюк¹, Е. Piasetzky⁶, Д. Сакулин¹, А. Саламатин¹, А. Скобляков³, Г. Таер³, Е. Тарковский³, С. Черепанов¹, О. Нен⁷,...

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



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

CC URQMD 10 ⁵ 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
π^0	43 878	64 268	85 051	162 099	282 712
π^+	37 929	55 837	74 365	145 040	255 919
π^-	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
Λ	225	951	1 922	5 878	11 331
Σ^0	86	468	927	2 451	3 857
Σ^+	66	372	788	1 972	3 278
Σ^-	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: $K^0+K^+(2\ 231)\sim\Lambda+\Sigma(2\ 153)$