



Киральная симметрия на U-70

А.Зайцев

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

Физика частиц при средних и высоких энергиях
PPHC

Протвино 2–5 июня 2026 г

Лагранжиан КХД

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \sum_{f=u,d,s,\dots} \bar{q}_f [\gamma \cdot \partial + ig \frac{1}{2} \lambda^a \gamma \cdot A^a + m_f] q_f + \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a$$
$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

Массы кварков

$$m_u = 2.16 \text{ МэВ} \quad m_d = 4.67 \text{ МэВ} \quad m_s = 93.4 \text{ МэВ}$$
$$m_c = 1.27 \text{ ГэВ} \quad m_b = 4.18 \text{ ГэВ} \quad m_t = 172.5 \text{ ГэВ}$$

Не видно
изотопической
симметрии

$$\Lambda_{\text{КХД}} \simeq 300 \text{ МэВ}$$

В приближении $m_u = m_d = 0$
киральная симметрия
 $SU(2)_L \times SU(2)_R$

$$\psi_L \rightarrow \exp(i \vartheta^a \tau^a / 2) \psi_L \quad \psi_R \rightarrow \exp(i \vartheta^a \tau^a / 2) \psi_R$$

Реальный мир радикально отличается от «идеального».

Нет ожидаемого вырождения по четности адронов, зато есть триплет почти безмассовых псевдоскаляров: $\pi \pm 0$.

Спонтанное нарушение киральной симметрии

$$m_\pi^2 = -1/f_\pi^2 (m_u + m_d)/2 (\langle \bar{u}u \rangle + \langle \bar{d}d \rangle) \quad \langle \bar{u}u \rangle \simeq \langle \bar{d}d \rangle \simeq -(240 \pm 10) \text{ МэВ}^3$$

1,5% нашей массы обязаны Хиггсу, все остальное – взаимодействие кварков с вакуумом !!!

Как можно изучать переход между двумя состояниями

Спонтанное нарушение киральной симметрии

Псевдоголдстоуновские бозоны

Конституентные кварки
($m_{u,d} \approx 300 \text{ МэВ}$)

Изотопическая симметрия



Восстановление киральной симметрии

Вырождение по четности

Нарушение изотопической симметрии

Идеальный вакуум

Вакуум КХД

$$\langle \bar{u}u \rangle \approx \langle \bar{d}d \rangle \approx -240 \text{ МэВ}^3$$



Три направления

- ▣ *Высокие возбуждения резонансов*
- ▣ *Кумулятивные реакции*
- ▣ *Столкновения тяжелых ионов*



Спектроскопия

Восстановление киральной симметрии

Вырождение по четности

Можно ожидать, что для достаточно высоких возбуждений (n или L) адронных резонансов, состоящих из легких кварков роль непертурбативных вакуумных флуктуаций уменьшается и приближенная киральная симметрия восстанавливается

.....

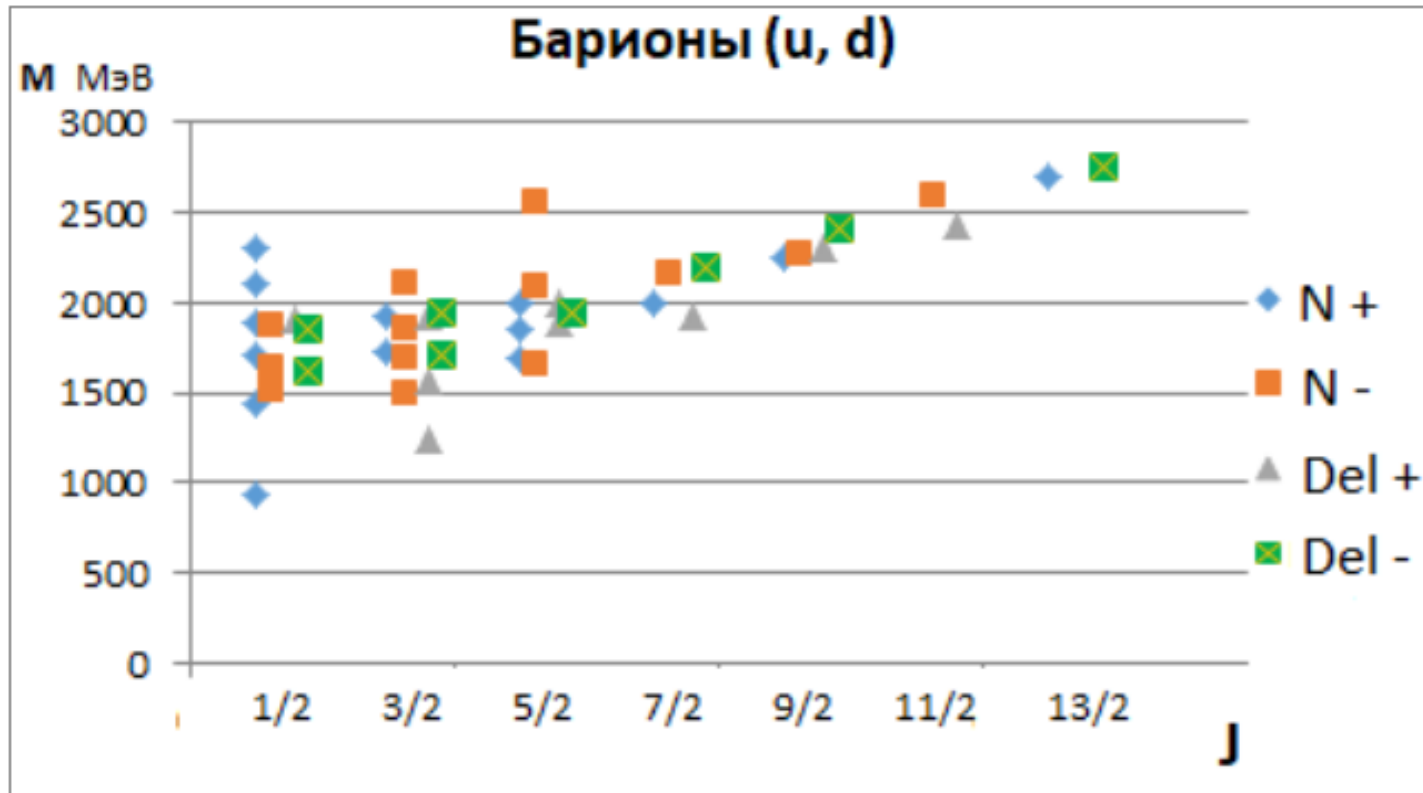
 Jaffe
 Glozman
 Swanson
 Bicudo
 Afonin
 Nefediev
 Ding
 ...
 ...

Это приводит к вырождению состояний:

(Glozman, 2007)

Барионы	Мезоны (q, \bar{q}) (I, JPC)		
	J=0	J=2k	J=2k-1
$M_{N,\Delta}(J,p) = M_{N,\Delta}(J,-p)$	$M(1,0-+)=M(0,0++)$ $M(1,0++)=M(0,0-+)$	$M(0,J--)=M(0,J++)$ $M(1,J-+)=M(0,J++)$ $M(1,J++)=M(0,J-+)$ $M(1,J++)=M(1,J--)$	$M(0,J++)=M(0,J--)$ $M(1,J+-)=M(0,J--)$ $M(1,J--)=M(0,J+-)$ $M(1,J--)=M(1,J++)$

Эксперимент: барионы



- Не видно многих ожидаемых резонансов
- Возможно, для $J > 5/2$ резонансы группируются в квадруплеты (12-плеты)
- Данные не позволяют с определенностью заключить о восстановлении/ не восстановлении киральной симметрии в легких барионах. Ситуация усложняется гибридами, пентакварковыми барионами, порогами.....
- **Нужны новые экспериментальные данные**

Эксперимент: мезоны

PRO (Glozman, 2007)

$\pi(1300 \pm 100)$ $1^- 0^- +$	$f_0(1300 \pm 100)$ $0^+ 0^+ +$
$\pi(1810 \pm 10)$ $1^- 0^- +$	$f_0(1710 \rightarrow 1765 \pm 15)$ $0^+ 0^+ +$
$\pi_2(1874 \pm 20)$ $1^- 2^- +$	$f_2(1815 \pm 15)$ $f_2(1936 \pm 12)$ $0^+ 2^+ +$
$\pi_2(2090 \pm 29)$ $1^- 2^- +$	$f_2(2157 \pm 12)$ $0^+ 2^+ +$

CONTRA (Bugg, 2008)

$\rho_3(1690)$ $I^G J^{PC} = 1^+ 3^{--}$	нет партнеров $J^{PC} = 3^{+-}$ $J^{PC} = 3^{++}$
$f_4(2050)$ $I^G J^{PC} = 0^+ 4^{++}$	$J^{PC} = 4^{-+}$
$a_4(1970)$ $I^G J^{PC} = 1^- 4^{++}$	

- Не видно множества ожидаемых состояний
- При желании можно усмотреть признаки восстановления киральной симметрии, а можно увидеть явные противоречия.
- Данные не позволяют с определенностью заключить о восстановлении/не восстановлении киральной симметрии в высоких $q\bar{q}$ возбуждениях
- Ситуация усложняется глюболами, гибридами, тетракварками, порогами.....
- **Нужны новые экспериментальные данные**

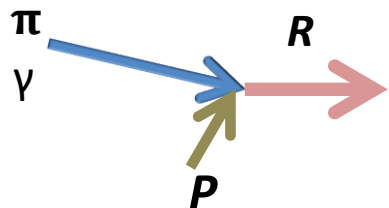
Спектроскопия легких адронов ($S=0$) на У-70

Барионы

Цель:

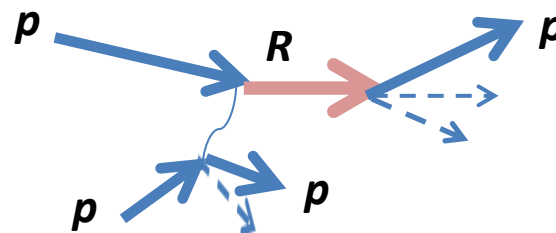
Все резонансы с $J < 15/2$ ($M \approx 3$ ГэВ)
 Массы : $\sigma(M) \approx 2 \div 50$ МэВ $\rightarrow 1 \div 10$ МэВ
 Ширины: $\sigma(\Gamma) \approx 10 \div 100$ МэВ $\rightarrow 2 \div 20$ МэВ
 $B r_i$ и Γ_i (в т.ч. p + мезонные резонансы
 с массой до 2 ГэВ)
 $\approx 10^2$ резонансов
 ≈ 20 каналов

Основной объем данных по барионным резонансам получен в “formation” экспериментах ($\pi N \rightarrow R$ и $\gamma N \rightarrow R$) на ускорителях невысоких энергий

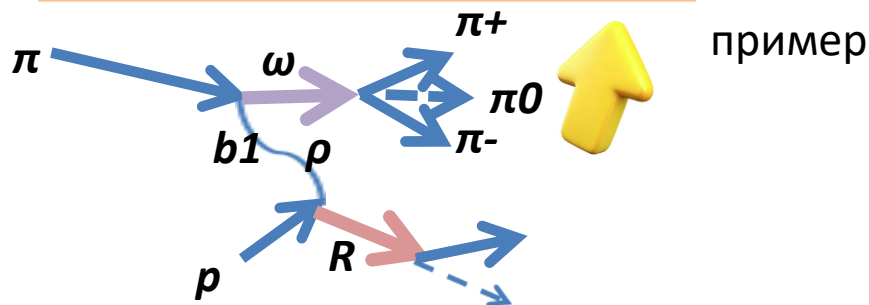


Два класса “production” экспериментов на У-70

Пучок протонов $P \approx 40$ ГэВ



Пучок «меченых реджеонов» π^\pm $p = 20$ ГэВ



Спектроскопия легких адронов ($S=0$) на У-70

Мезоны

Установка ВЕС

Цель:

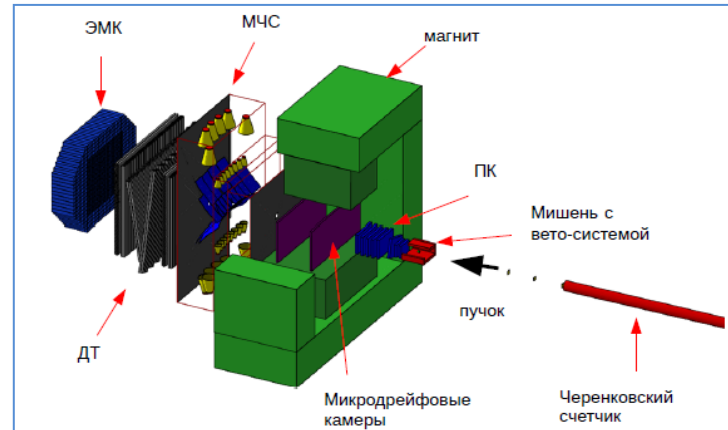
Все резонансы с $J < 8$ ($M \approx 2,8$ ГэВ)

Массы: $\sigma(M) \approx 2 \div 20$ МэВ $\rightarrow 1 \div 5$ МэВ

Ширины: $\sigma(\Gamma) \approx 3 \div 30$ МэВ $\rightarrow 2 \div 10$ МэВ

B_{r_i} и Γ_i , сведения о структуре
 $\approx 10^2$ резонансов

> 80 каналов



$P_{\pi^-} = 29$ ГэВ

Ядерная мишень (^9Be)

Триггер «все вперед»

Набрано $2 \cdot 10^{10}$ событий

План: в ближайшие 3÷4 года
набрать 10^{11} событий с новой
мишенной системой

Очень трудоемкий
физический анализ

В ПВА особую роль играют «стабильные»
частицы и «узкие» резонансы:

$\pi^\pm 0$; η ; η' ; ω ; ϕ ; f_1 ; $K^\pm 0$...

Для ПВА-анализа можно использовать
 ≈ 30 двухчастичных комбинаций

($\pi^+\pi^-$, $\pi^-\pi^0$, $\pi^-\eta$, $\eta\eta$, $\eta\eta'$, $\omega\omega$, $\omega\phi$

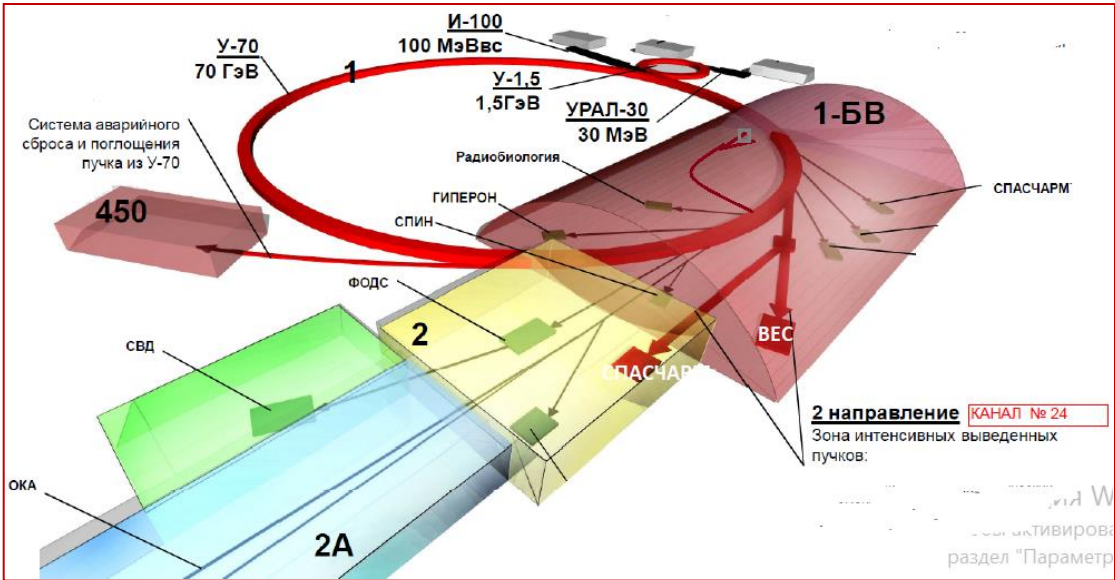
и свыше 50 трехчастичных комбинаций

($\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^+\pi^-\eta$, $\pi^-\eta\eta$, $\pi^-\eta\eta'$, $\pi^-\omega\omega$, $\pi^-\omega\phi$...)

Потенциальные конкуренты/партнеры:

BES-III, Китай, GlueX, США

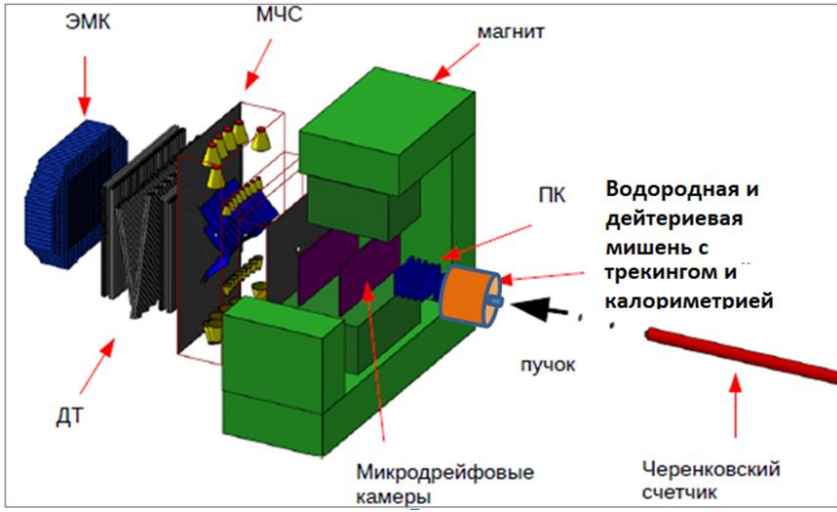
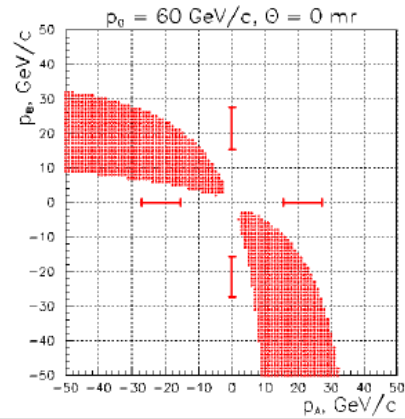
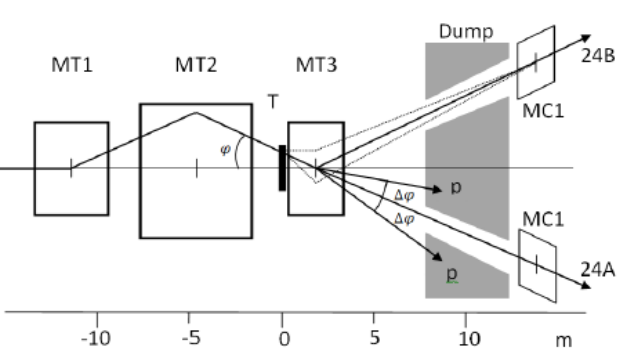
Канал №24



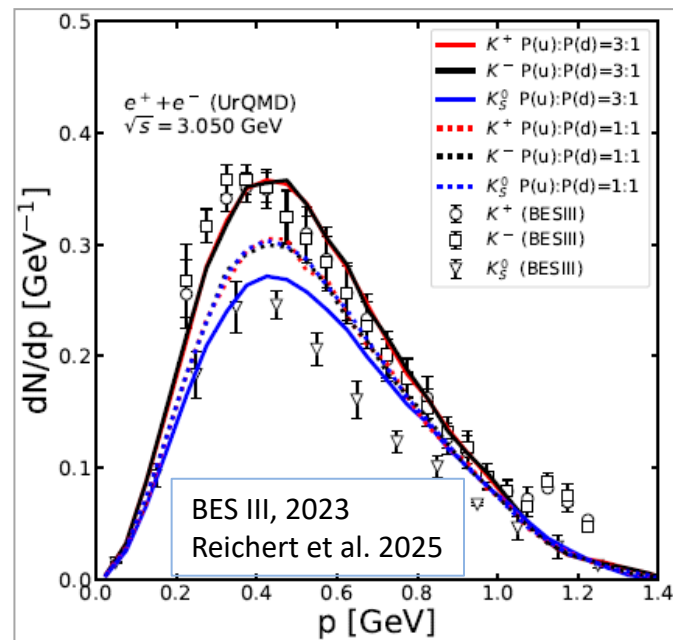
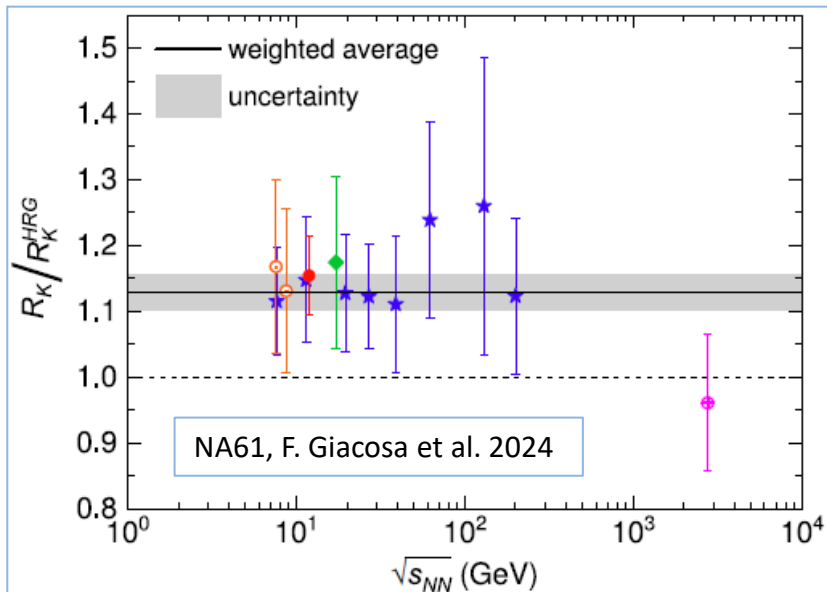
- Новые возможности:
- водородная (дейтериевая) мишень
 - высокая интенсивность
 - произвольный знак заряда частиц
 - малые размеры пучка

Отличные перспективы для мезонной (и барионной ?) спектроскопии

Структура мишенной зоны канала 24



Открытие (?) нарушения изотопической симметрии



В чем причина:

- Q/V
- EM –эффекты
- Большая барионная плотность
-
- **Различие масс u и d –кварков !!!**

Сильное указание на восстановление приближенной киральной симметрии, приводящей к большому нарушению изотопической симметрии

В экспериментах на У-70 ожидаются новые яркие эффекты !

Спектроскопия

Возможные эффекты нарушения изотопической симметрии

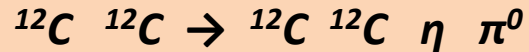
Расщепление масс в изомультиплетах

Отклонения от «нормального» расщепления $\Delta M \approx 1 \div 4$ МэВ

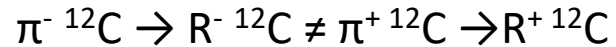
Нарушение изотопики в распадах

$$Br(R \rightarrow K^+ K^-) > Br(R \rightarrow K^0 K^0)$$

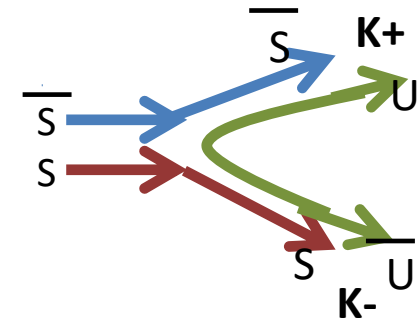
Запрещенные изотопикой процессы



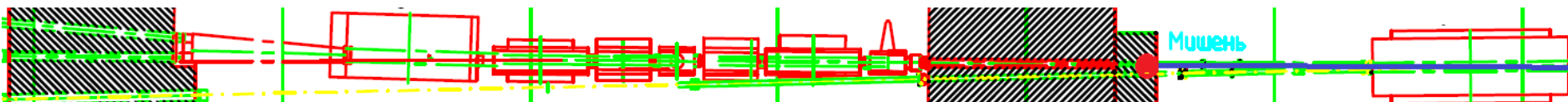
Нарушение изотопики в бинарных реакциях



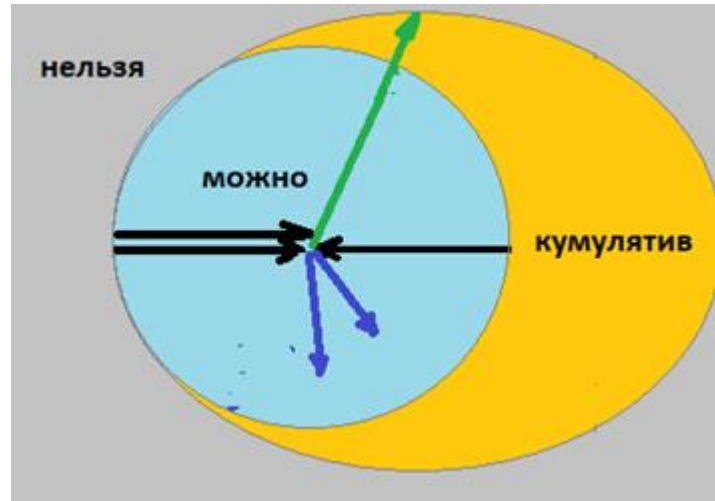
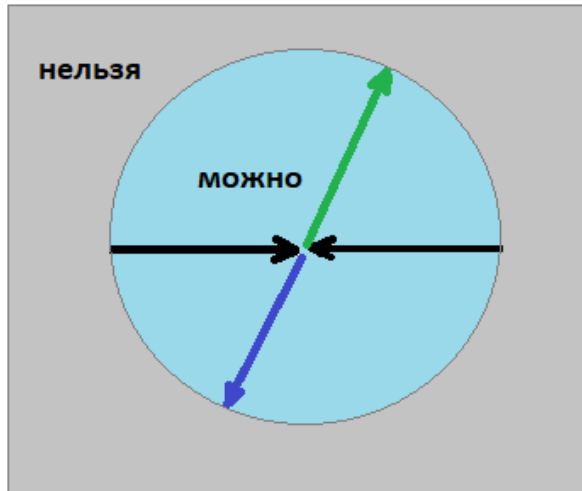
БЕС



ОКА



Кумулятивные процессы



«флуктоны»
 «файерболы»
 «капельки»

Кумулятив → большая плотность барионов → восстановление киральной симметрии → нарушение изотопической симметрии

Эффекты могут быть значительными и разнообразными

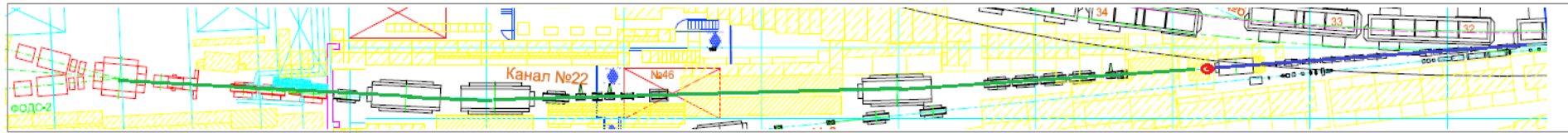
$12C + 12C$

Начальное состояние
 $k(p) = k(n) \quad k=1,2..$

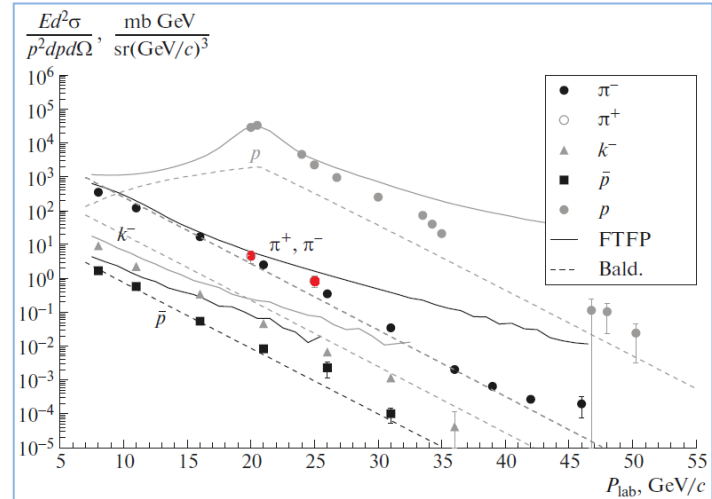
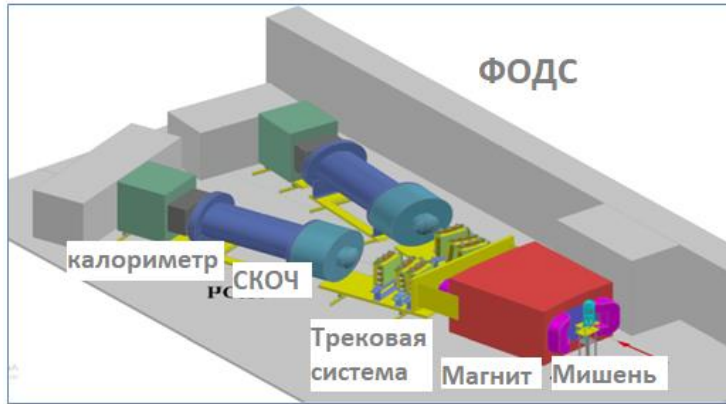
Добавим
 и \bar{u}

Результат
 $N(\pi^-, \rho^-, a1-..) > N(\pi^+, \rho^+, a1+..)$
 $N(\Delta^{++} (p \pi^+)) > N(\Delta^- (n \pi^-))$

Кумулятивные процессы, ФОДС



Две моды работы:
-большие p_T
- $p_T = 0$

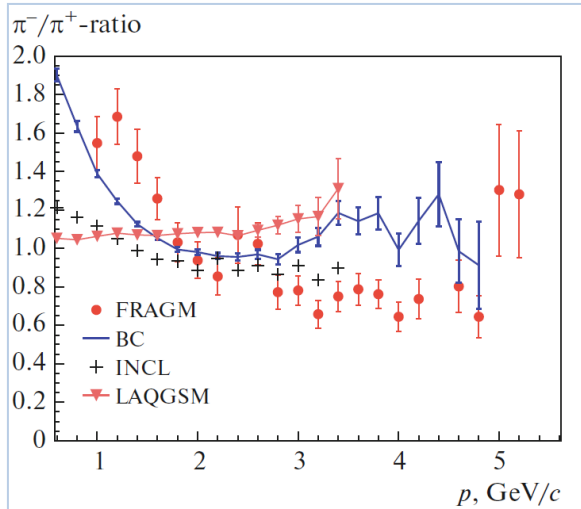


$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$; $E_{\text{kin}} = 19,6 \text{ GeV/n}$; $\theta=0$

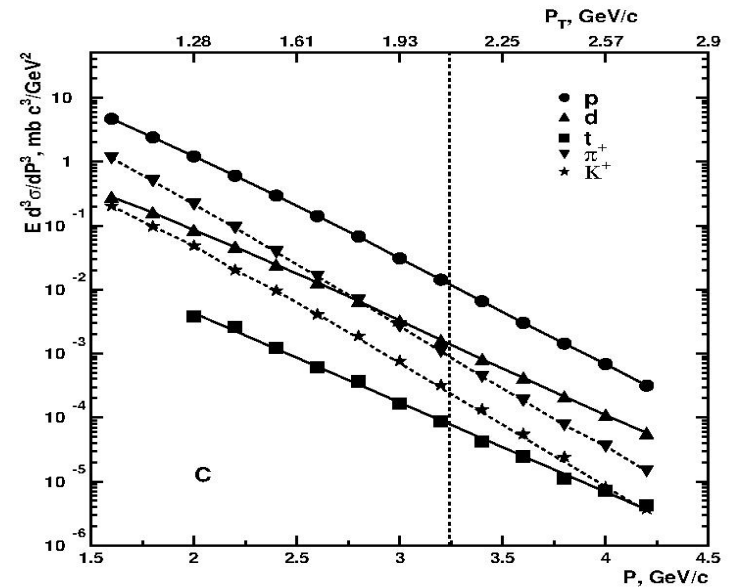
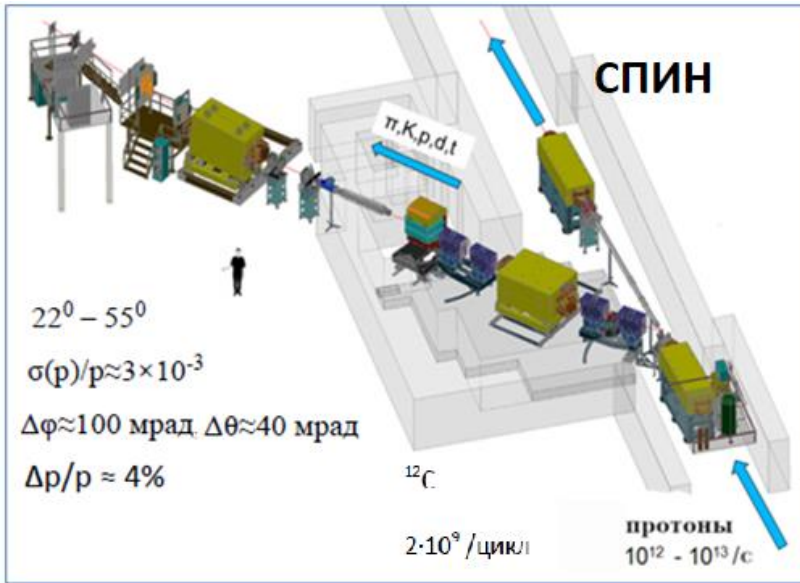
Сист. ошибка 20%. Всего две точки π^+
Цель:
сист. ошибка 2%, ~ 10 точек $10 < p_{\pi} < 40 \text{ GeV}$

Фон: состав пучка, распады каонов и гиперонов

FRAGM
НИЦ КИ-ИТЭФ
2021
 $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$
 $E=3,2 \text{ GeV}$



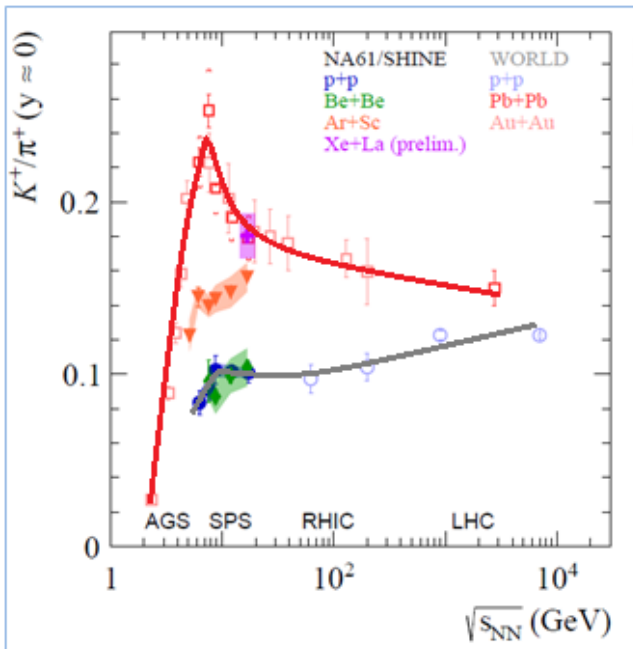
Кумулятивные процессы, СПИН



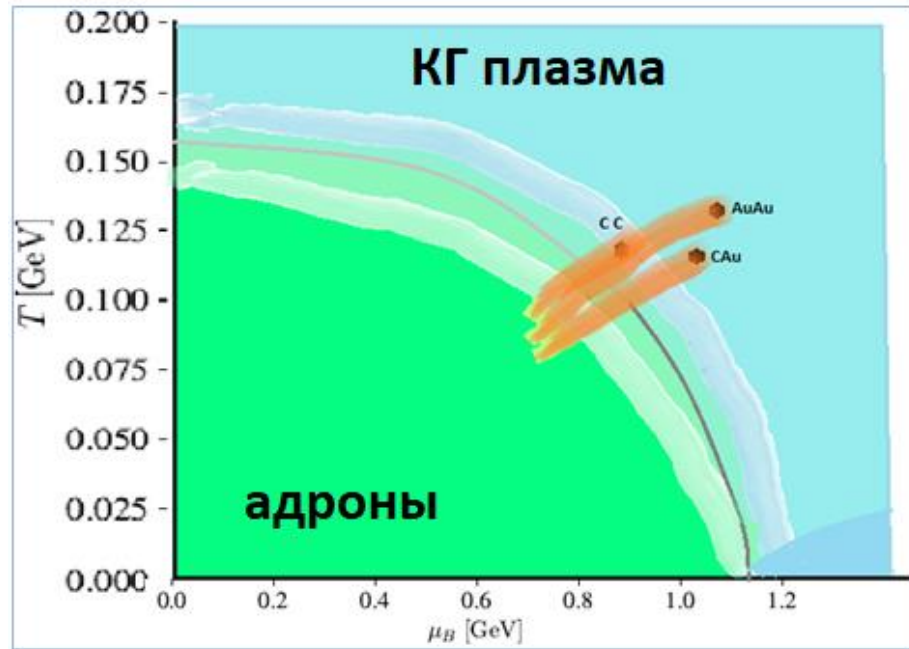
Примеры спектров частиц, вылетающих под углом 40° из углеродной мишени.

Фазовый переход на У-70

$^{12}\text{C} + \text{A}$ $E = 20 \div 70$ ГэВ $\rightarrow \sqrt{s} = 4,5 \div 8,2$ ГэВ



Отношение выходов K^+/π^+
“Рог» при $\sqrt{s}=7,6$ ГэВ
Фазовый переход
адроны \leftrightarrow КГ-плазма (???)



При энергиях У-70 происходит фазовый переход (кроссовер) при высокой барионной плотности ($\rho/\rho_0 \approx 10$, $\tau \approx 2 \cdot 10^{-23}$ с)

Оценки в модели Z.W. Lin, 2018

Одночастичные спектры в инклюзивных реакциях

Пучки ^{12}C

Спектры «стабильных» заряженных частиц в инклюзивных реакциях:
$$d^2\sigma/dp_T d\Omega = F(E, A, \theta, p_T) \pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p} \dots$$

СПИН, ФОДС

Спектры частиц в инклюзивных реакциях (?)
$$d^2\sigma/dp_T d\Omega = F(E, A, \theta, p_T) \pi^\pm 0, \omega, \varphi, \eta, \eta', K^\pm 0, K^{*\pm 0}, p, \bar{p} \dots$$

ВЕС, СПАСЧАРМ

Пучки π^\pm (?)

ФОДС, ОКА; в перспективе ВЕС, СПАСЧАРМ

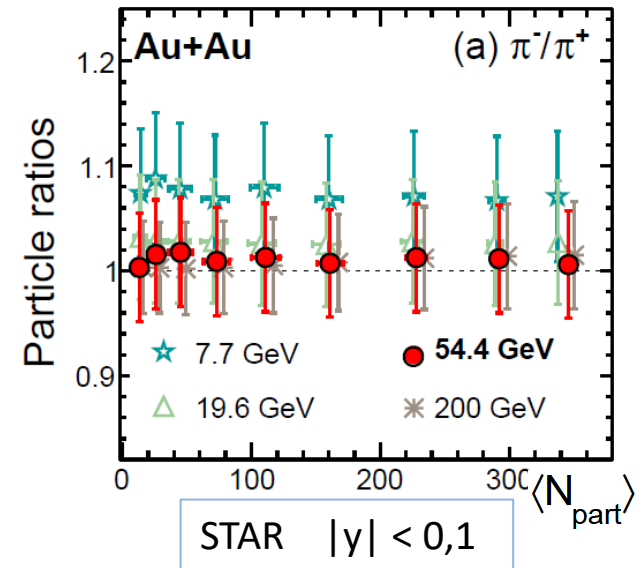
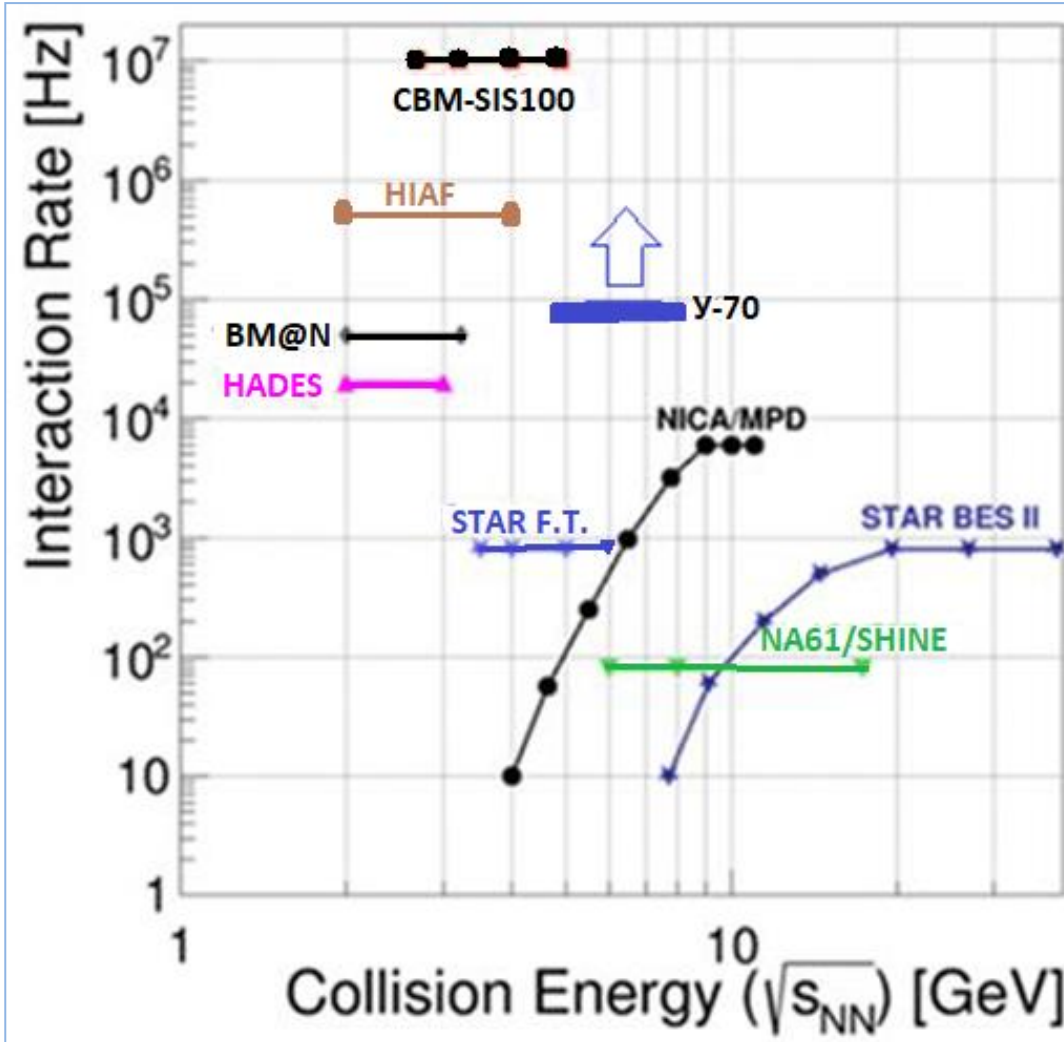
Пучки ^{12}C

специализированные эксперименты (???) ($\gamma, \gamma \gamma, e^+ e^- \dots$)



Другие пучки (?) ^{12}C

Исследования A+A – взаимодействий в области энергий У-70 (высокая барионная плотность)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема нарушения/восстановления киральной симметрии является одной из основных в физике сильных взаимодействий

Открытие большого нарушения изотопической симметрии создает разнообразные возможности детального изучения эффектов нарушения/восстановления киральной симметрии

Базовые параметры Ускорительного комплекса У-70 (энергия, интенсивность) хорошо подходят для исследований этих явлений

Полезные результаты можно получить на существующих установках

Развитие Ускорительного комплекса У-70 и создание специализированной установки позволят Институту выйти на лидирующие позиции в этой области физики

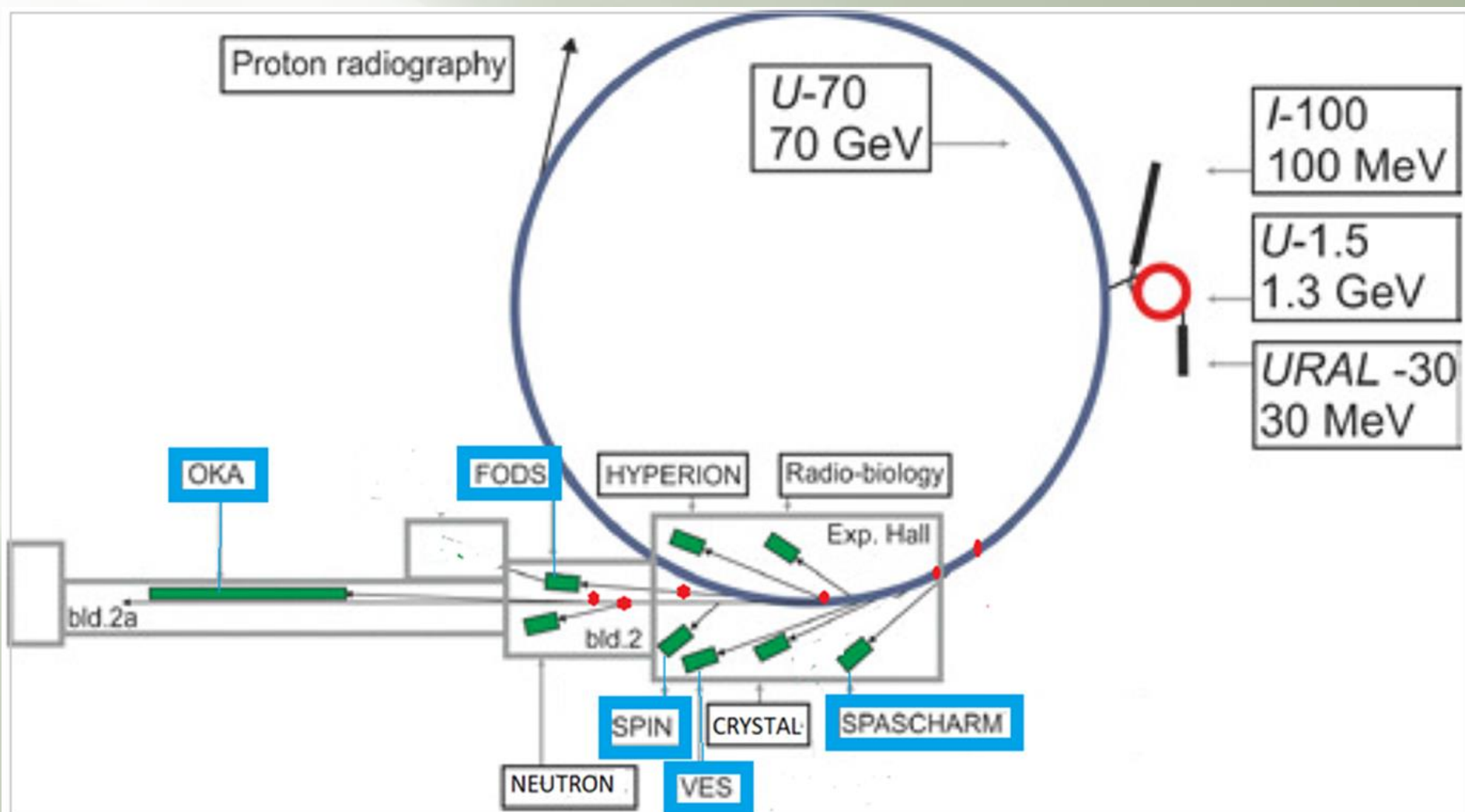
РЕЗЕРВ

• π^\pm	$1^-(0^-)$	• $\eta(1405)$	$0^+(0^-+)$	• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^-+)$	• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
• π^0	$1^-(0^-+)$	• $h_1(1415)$	$0^-(1^{+-})$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$	$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• η	$0^+(0^-+)$	• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$	• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$	• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-+)$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$	$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$	• $a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$	$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$	• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$	• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$	$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^-+)$	• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$	$X(1750)$	$?^-(1^{--})$	$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$	• $\eta(1475)$	$0^+(0^-+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-+)$	• $\phi(2170)$	$0^-(1^{--})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$	• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$	• $\pi(1800)$	$1^-(0^-+)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$	$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$	$f_J(2220)$	$0^+(2^{++})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$	• $f'_2(1525)$	$0^+(2^{++})$	$X(1835)$	$?^?(0^-+)$		or 4^{++}
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$	$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$	• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$	$\eta(2225)$	$0^+(0^-+)$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$	$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$	• $\eta_2(1870)$	$0^+(2^-+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$	$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$	• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^-+)$	• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$	• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^-+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^-+)$	• $a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$	$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^-+)$	$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$	$a_0(1950)$	$1^-(0^{++})$	• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$	• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^-+)$	• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$	$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$	• $\omega(1650)$	$0^-(1^{--})$	• $a_4(1970)$	$1^-(4^{++})$	$X(2370)$	$?^?(?^?)$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^-+)$	• $\omega_3(1670)$	$0^-(3^{--})$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$	$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$

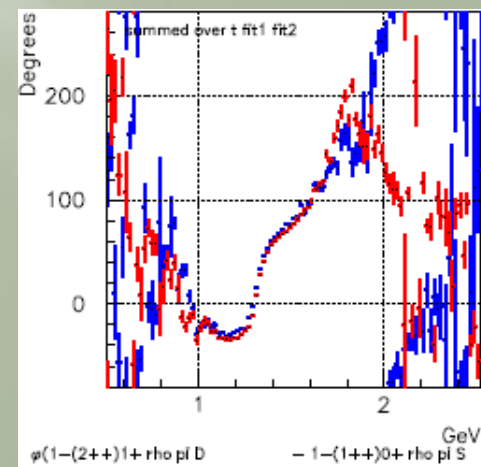
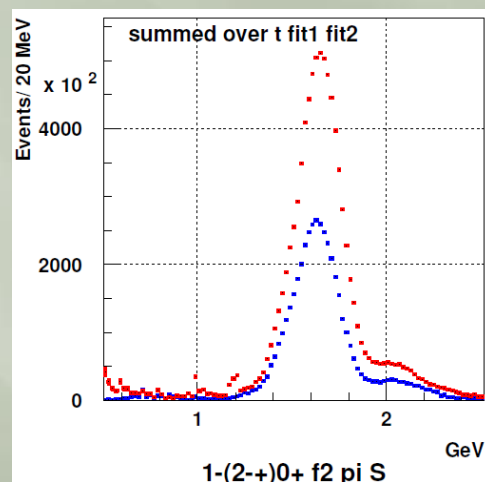
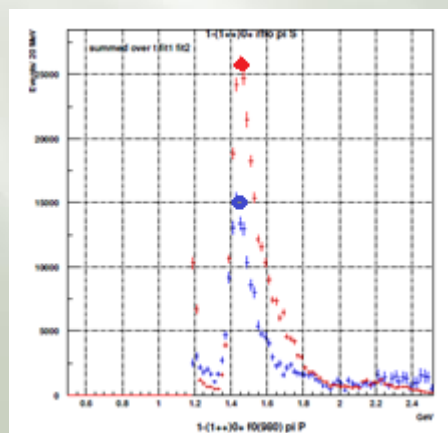
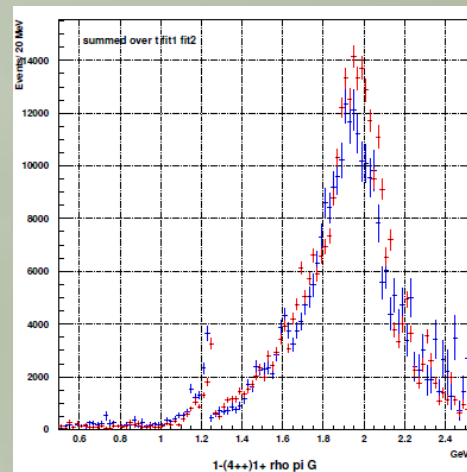
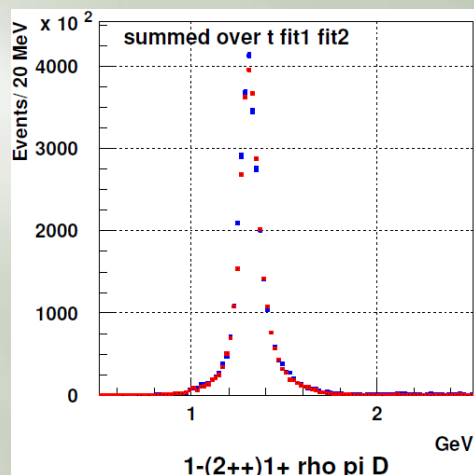
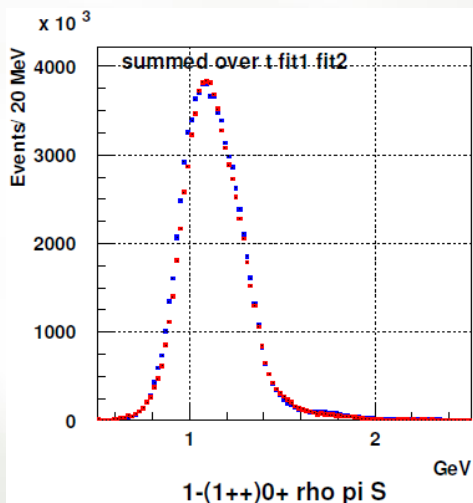
ρ	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****
$N(1440)$	$1/2^+$	****
$N(1520)$	$3/2^-$	****
$N(1535)$	$1/2^-$	****
$N(1650)$	$1/2^-$	****
$N(1675)$	$5/2^-$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****
$N(1700)$	$3/2^-$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	****
$N(1720)$	$3/2^+$	****
$N(1860)$	$5/2^+$	**
$N(1875)$	$3/2^-$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	****
$N(1900)$	$3/2^+$	****
$N(1990)$	$7/2^+$	**
$N(2000)$	$5/2^+$	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	***
$N(2100)$	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****
$N(2220)$	$9/2^+$	****
$N(2250)$	$9/2^-$	****
$N(2300)$	$1/2^+$	**
$N(2570)$	$5/2^-$	**
$N(2600)$	$11/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**

$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****
$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****
$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*
$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***
$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****
$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****
$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***
$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**
$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****
$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**
$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*
$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***
$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**
$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*
$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*
$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**
$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****
$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**
$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**

Ускорительный комплекс У-70

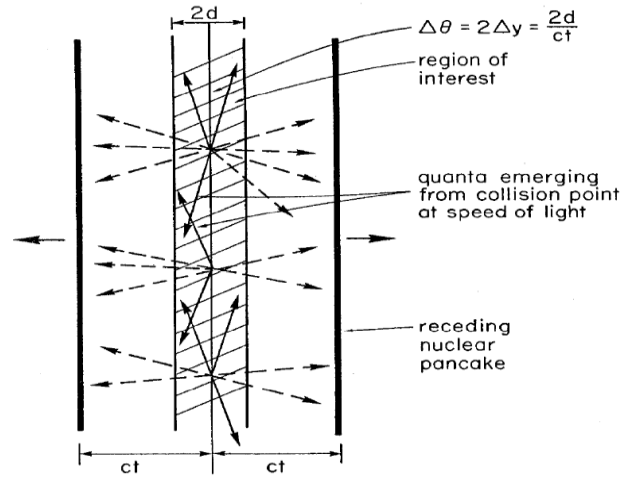


Пример: сравнение реакций $\pi A \rightarrow \pi \pi^+ \pi^- A$ и $\pi A \rightarrow \pi \pi^0 \pi^0 A$ (ВЕС, предварительные результаты)



J. D. BJORKEN

$$\epsilon_{\text{Bj}}(t) = \frac{1}{A_{\text{T}} t} \frac{dE_{\text{T}}}{dy}$$



Zi-Wei Lin 2018

$$\epsilon_{\text{uni}}^{\text{max}} = \epsilon_{\text{uni}}(t_2 + \tau_{\text{F}}) = \frac{1}{A_{\text{T}} t_{21}} \frac{dE_{\text{T}}}{dy} \ln\left(1 + \frac{t_{21}}{\tau_{\text{F}}}\right)$$

$$\frac{dE_{\text{T}}}{dy} = 0.456 N_{\text{part}} \ln\left(\frac{\sqrt{s_{\text{NN}}}}{2.35}\right)$$

Todd Mendenhall* and Zi-Wei Lin† 2023

$$\epsilon_1 = \frac{19\pi^2}{12} T^4 + \frac{\mu_{\text{B}}^2}{3} T^2 + \frac{\mu_{\text{B}}^4}{54\pi^2}$$

$$n_{\text{B},1} = \frac{2\mu_{\text{B}}}{9} T^2 + \frac{2\mu_{\text{B}}^3}{81\pi^2}$$

t	0,1	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,13	0,135	0,14	0,145
0,9	0,72	0,80	0,89	0,99	1,09	1,21	1,34	1,48	1,64	1,81
0,9	0,50	0,53	0,56	0,58	0,62	0,65	0,68	0,72	0,75	0,79
1	0,80	0,88	0,98	1,08	1,19	1,31	1,45	1,60	1,76	1,93
1	0,56	0,59	0,61	0,65	0,68	0,71	0,75	0,78	0,82	0,86
1	0,89	0,97	1,07	1,18	1,30	1,43	1,57	1,72	1,89	2,07
1	0,62	0,65	0,68	0,71	0,75	0,78	0,82	0,86	0,90	0,94
1,1	0,98	1,08	1,18	1,29	1,41	1,55	1,69	1,85	2,03	2,21
1,1	0,68	0,72	0,75	0,78	0,82	0,86	0,89	0,94	0,98	1,02
1,1	1,09	1,19	1,30	1,41	1,54	1,68	1,83	2,00	2,18	2,37
1,1	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90	0,94	0,98	1,02	1,06	1,11
1,2	1,21	1,31	1,43	1,55	1,68	1,83	1,99	2,16	2,34	2,55
1,2	0,83	0,87	0,90	0,94	0,98	1,02	1,06	1,11	1,15	1,20
1,2	1,34	1,45	1,57	1,70	1,84	1,99	2,15	2,33	2,52	2,73
1,2	0,91	0,95	0,99	1,03	1,07	1,11	1,15	1,20	1,25	1,30
1,3	1,48	1,60	1,72	1,86	2,00	2,16	2,33	2,52	2,72	2,93
1,3	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,21	1,25	1,30	1,35	1,40
1,3	1,64	1,76	1,89	2,03	2,19	2,35	2,53	2,72	2,93	3,15
	1,10	1,14	1,18	1,22	1,26	1,31	1,36	1,41	1,46	1,51

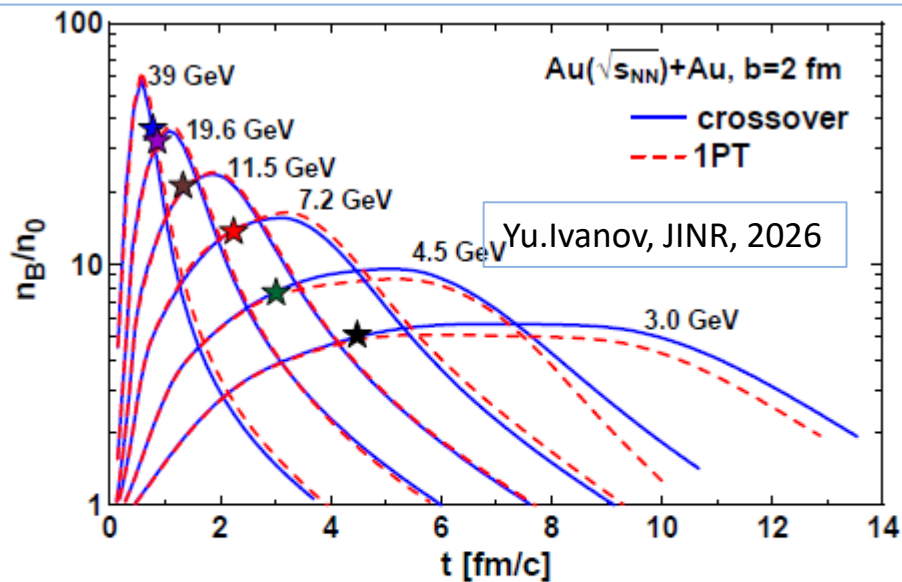


FIG. 1: Time evolution of baryon density in the central region of central ($b = 2$ fm) Au+Au collisions at various collision energies ($\sqrt{s_{NN}}$). Results for the crossover and 1PT EoSs are displayed. Star symbols on the curves mark the time instant of the baryon-matter stopping.

STAR, 2025

These results provide evidence for droplet formation in small systems with transport properties that are similar to those observed in large collision systems, consistent with QGP-like behavior.