



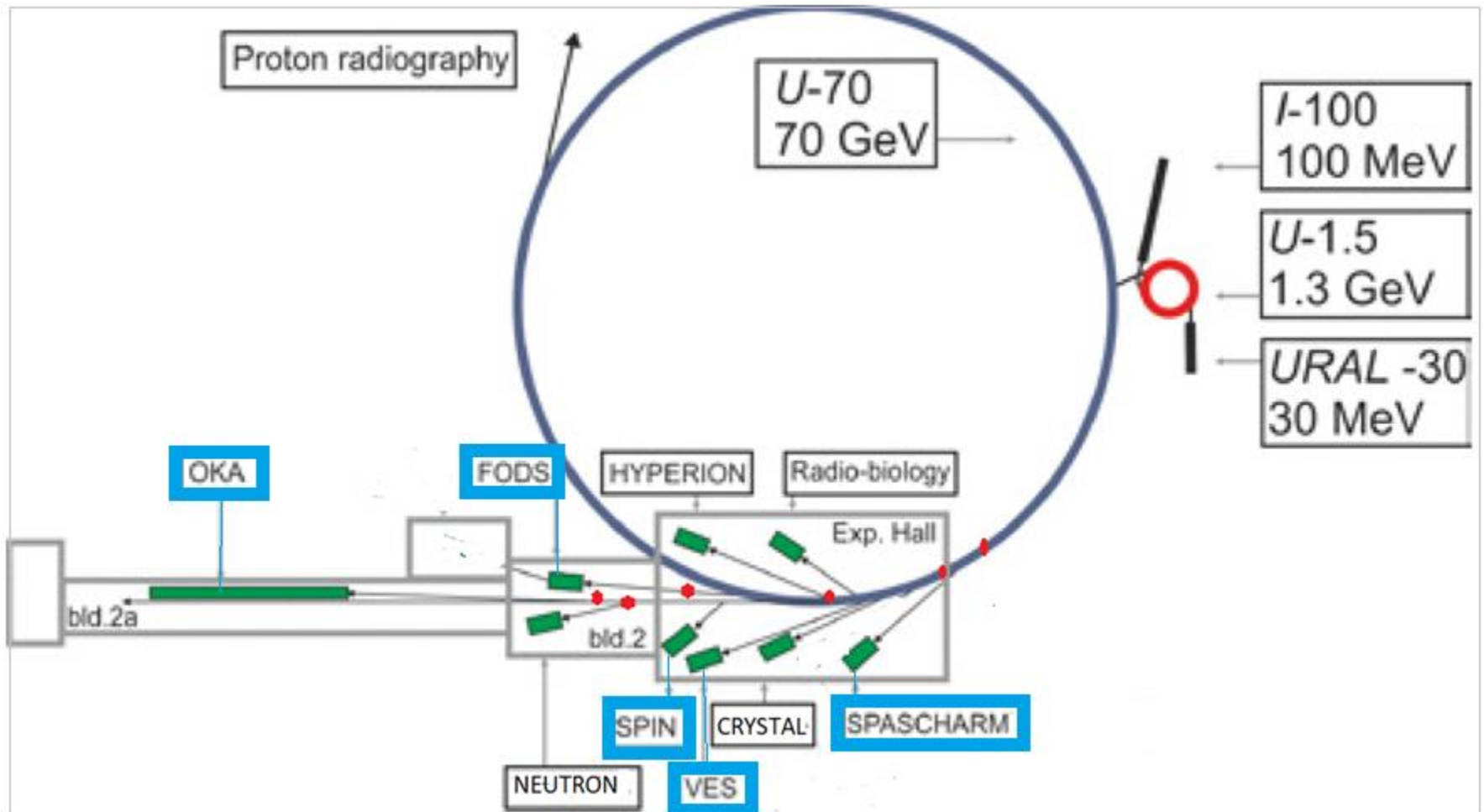
# Физика с фиксированными мишенями: вызовы и возможности У-70

А.М. Зайцев, С.В. Иванов, Н.Е. Тюрин

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН  
1-5 апреля 2024 г.  
ОИЯИ

# Ускорительный комплекс У-70



# Вакуум

$$\rho_V = \Lambda c^2 / 8\pi G$$

$$\Lambda = 4,28 \cdot 10^{-84} \text{ ГэВ}^2$$

A. Einstein (1917)

S. Perlmutter

B. Schmidt (2008)

A. Riess

$$M_i = 1/\sqrt{2} \cdot f_i \cdot \eta$$

$$\eta = 246 \text{ ГэВ}$$

R. Brout

F. Englert (1962)

P. Higgs

ATLAS&CMS (2012)

$$\langle 0 | \bar{u}u | 0 \rangle = \langle 0 | \bar{d}d | 0 \rangle = - (225 \pm 25) \text{ МэВ}^3$$

Y. Nambu (1960)

M. Gell-Mann, R. J.

Oakes, B. Renner

(1968)

A. Polyakov (1974)

G. t'Hooft (1974)

.....

## Вакуум КХД

Массы кварков:  $m_u = 2.16^{+0.49}_{-0.26}$  MeV;  $m_d = 4.67^{+0.48}_{-0.17}$  MeV

Массы нуклонов:  $m_p = 938.27$  MeV ;  $m_n = 939.56$  MeV

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

Среди вакуумных флуктуаций выделяются инстантоны, (А. Polyakov(1975), BPST (1975))  
обладающие рядом ярких свойств ( G. t'Hoofdt (1976))

- новый масштаб:  $\rho \approx 0.3$  fm
- необычные взаимодействия кварков

Инстантоны позволяют объяснить ряд известных явлений и предсказать новые:

- решить ряд проблем спектроскопии, в том числе проблему  $U_A(1)$
- найти характеристики дикварков, оценить параметры многокварковых объектов
- объяснить природу правила OZI
- предсказать свойства скалярного глюбола:  $Br(G \rightarrow K+K^-) > Br(G \rightarrow \pi+\pi^-)$ ;  $\rho(G) \approx \rho(l) < \rho(h)$
- оценить аномальный хромомангнитный момент кварка  $\rightarrow$  яркие поляризационные явления при  $P_t$  вплоть до  $\approx 3$  ГэВ
- .....

Отдельная трудная проблема – Т-нечетные взаимодействия в КХД  
Возможное решение – аксион (R.Pescei, H.Quinn (1977))

**Наша цель: исследование вакуума КХД**

# Установка ОКА (рук. В.Ф. Образцов)

Распады заряженных каонов

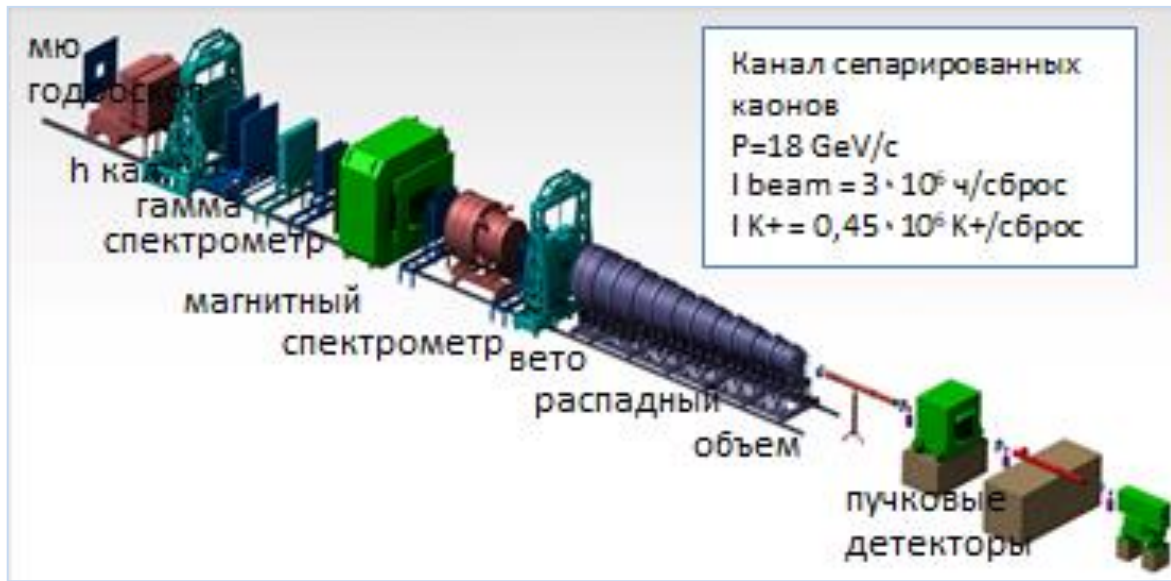
Взаимодействия каонов с мишенями

Сотрудничество:

НИЦ КИ-ИФВЭ: 19

ИЯИ: 5

ОИЯИ: 1



K<sup>±</sup> распады:  
Формфакторы  
Аномальные  
взаимодействия

$K_{\mu 3}$  (2002, ISTR<sup>+</sup>)

$Ke3$  (2016)

Радиационные  
распады:

$K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \gamma$  (2004, ISTR<sup>+</sup>)

$K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \gamma$  (2010, ISTR<sup>+</sup>)

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$  (2019)

$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$  (2020)

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$  (2022)

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$  (2023)

Поиски новых  
легких частиц:

$K^- \rightarrow \mu^- \nu_h (v_h \rightarrow \nu_\gamma)$

(2012, ISTR<sup>+</sup>)

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$  (2018)

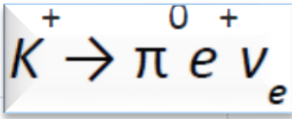
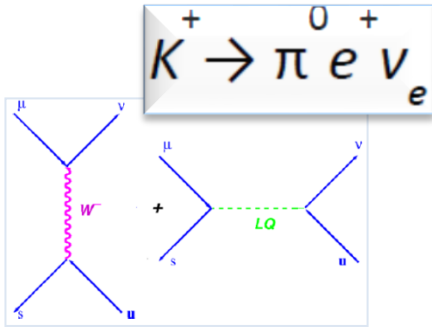
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$  (2023)

Реакции в  
кулоновском поле  
ядер:

WZW anomaly

$K^+ Cu \rightarrow K^+ \pi^0 Cu$   
(2022)

# ОКА: примеры

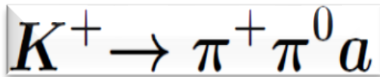
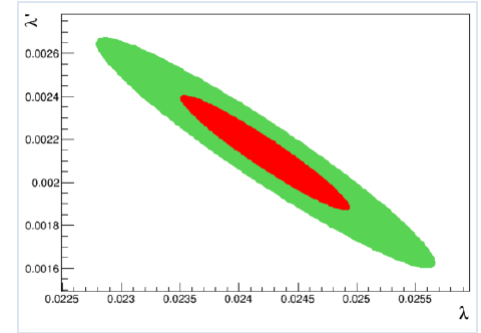


$$f_+(t) = f_+(0) \left( 1 + \lambda'_+ t/m_\pi^2 + \frac{1}{2} \lambda''_+ t^2/m_\pi^4 \right)$$

$$\lambda'_+ = (24.6 \pm 0.7) \times 10^{-3}$$

$$\lambda''_+ = (2.05 \pm 0.3) \times 10^{-3}$$

$$\Lambda_{LQ} > 3.5 \text{ TeV}$$

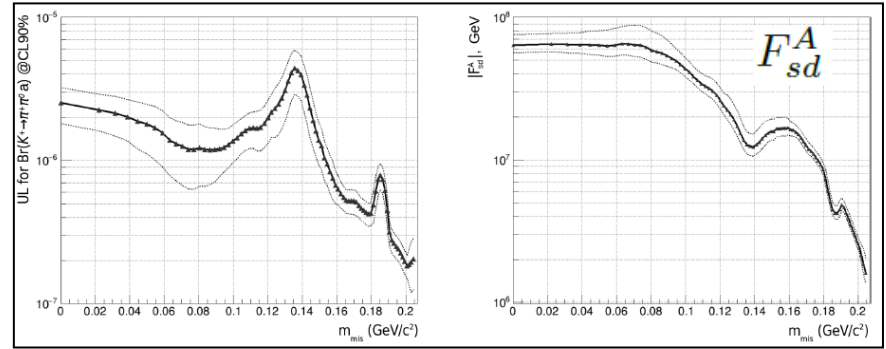


«a» аксион

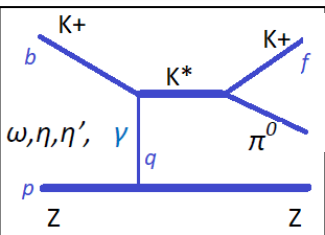
$$\mathcal{L} = q_\mu a \{ \bar{d} (\gamma_\mu / F_{sd}^V + \gamma_\mu \gamma_5 / F_{sd}^A) s \}$$

For  $m_a < 70 \text{ MeV}$   $|F_{sd}^A| > 6.4 \cdot 10^7 \text{ GeV}$

the best limit for  $|F_{sd}^A|$  among the HEP experiments

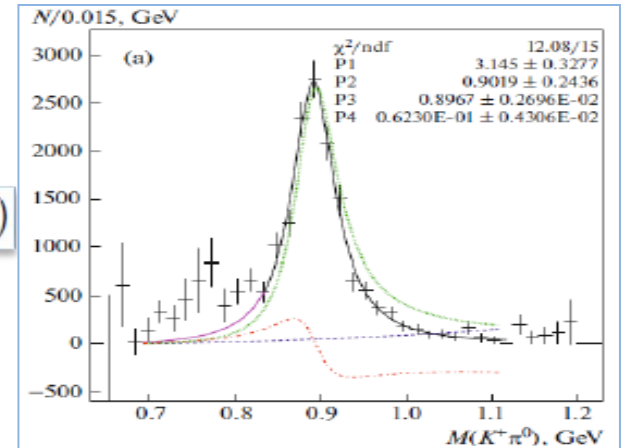


## Когерентное образование $K^+ \pi^0$



$$M_d = -\frac{2\alpha Z}{\pi F_\pi^3 q^2} \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} p_{1\mu} q_\nu b_\alpha f_\beta F_C(q^2)$$

$$A_{exp}/A_{th} = 0.9 \pm 0.24 \text{ (стат.)} \pm 0.3 \text{ (сист.)}$$



Планы:

Установка существенно улучшена (герметичность, мюонный детектор, трековые детекторы, триггер)

Один-два больших сеанса для исследования распадов

Далее - спектроскопия в пучке каонов



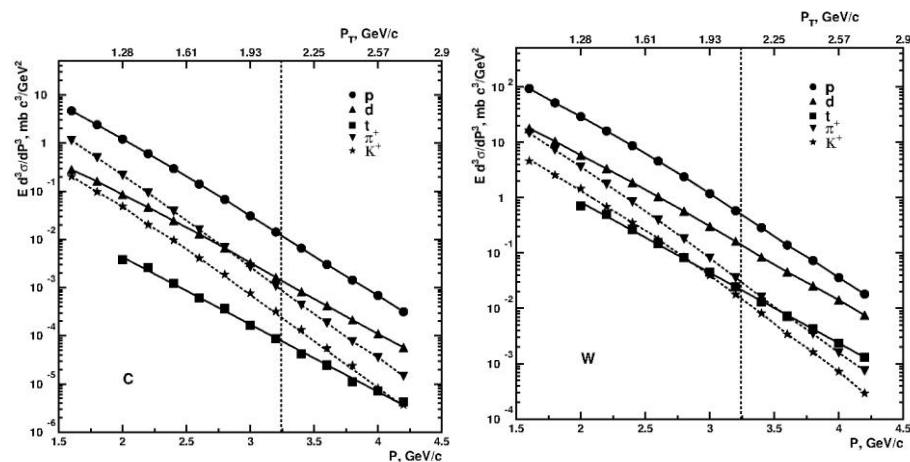
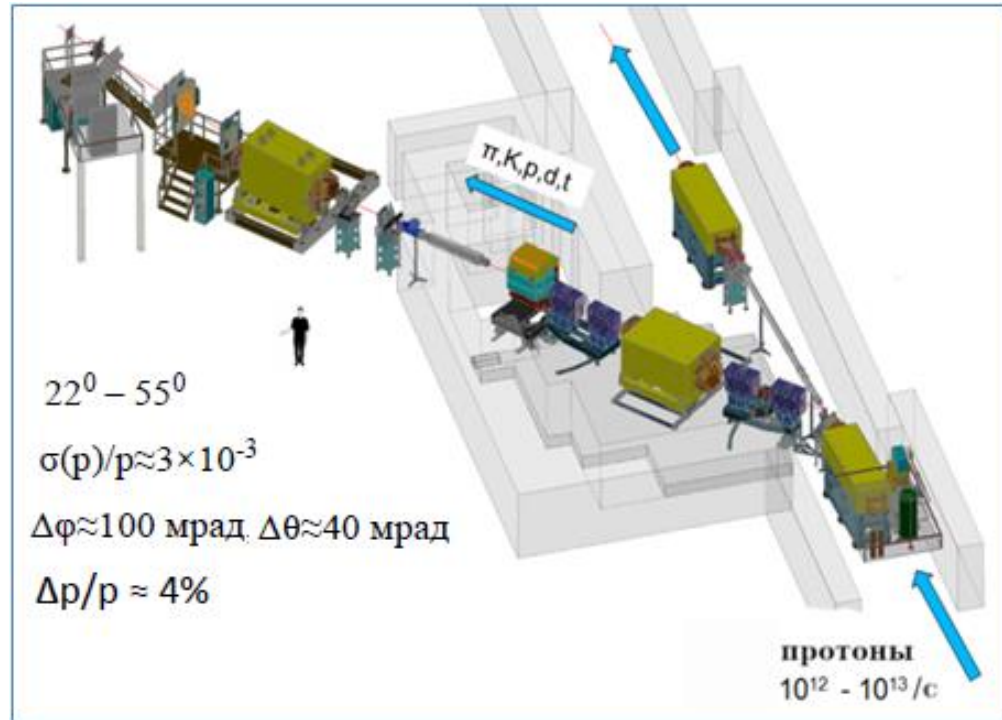
## Установка СПИН (рук. В.А. Гапиенко)

Кумулятивные процессы с большими  $P_T$

Сотрудничество НИЦ КИ-ИФВЭ -8, ОИЯИ-1

В эксперименте исследуется кумулятивный эффект там, где практически нет данных: изучается рождение частиц с поперечными импульсами  $P_T > 1$  ГэВ/с. Во взаимодействиях  $p + A \rightarrow h + X$  и  $C + A \rightarrow h + X$  при использовании выведенных из У70 пучков протонов и ионов углерода были получены импульсные спектры кумулятивных заряженных частиц с  $P_T$  вплоть до  $\sim 3.5$  ГэВ/с.

Инклюзивные спектры, измеренные в эксперименте при облучении четырех ядерных мишеней C, Al, Cu и W, имеют одну и ту же закономерность: с ростом  $P_T$  растет вклад легких ядерных фрагментов и быстро падает относительный выход мезонной компоненты. Наблюдаемый выход протонов и ядерных фрагментов при сильной A-зависимости сечений можно рассматривать как указание на доминирование в этой кинематической области процессов взаимодействия с плотными много-нуклонными (многокварковыми) образованиями внутри ядерной материи.



Примеры спектров частиц, вылетающих под углом  $40^\circ$  из углеродной и из вольфрамовой мишеней.

# Установка ФОДС (рук. А.А. Волков)

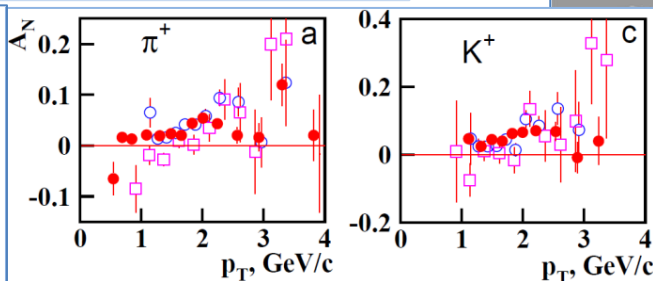
$$p+A \rightarrow h_{1,2} + X \text{ при } x_T \rightarrow 1$$

НИЦ КИ-ИФВЭ: 9 сотрудников

Двухплечевой спектрометр с идентификацией заряженных частиц

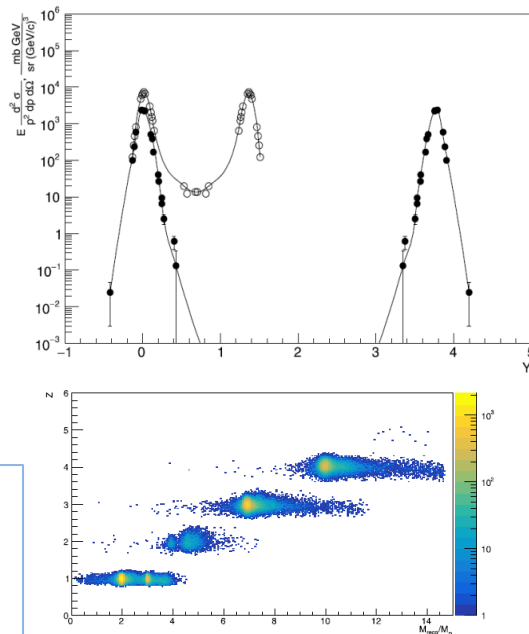
## Основные результаты

Односпиновые асимметрии при больших  $p_T$  в  $p \uparrow A$  взаимодействиях

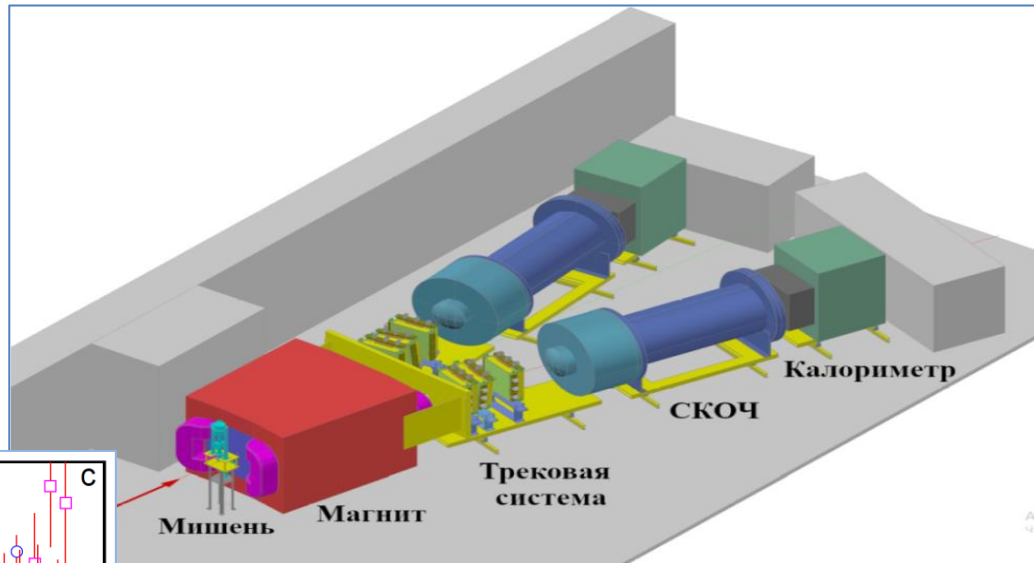


Спектры под нулевым углом  $h^+$ - и ядер в  $^{12}C_6 A$  взаимодействиях при  $E/\text{нуклон}=20,5$  ГэВ,  $X_F$  вплоть до 2,4

$^{12}C_6 + A(C, Pb) \rightarrow \pi^+, K^-, p, \bar{p}, d, t, ^3He, ^4He, ^5He, ^7Li, ^9Li, ^8B, ^9Be, ^{10}Be, ^{10}C$



Результаты не описываются моделями. Есть неожиданности ( $t, ^3He$ )



Ближайшая задача:

Спектры  $h^+$ - и ядер в  $p A$  взаимодействиях при  $x_T \rightarrow 1$  в широком диапазоне углов (в дополнение к результатам СПИН'а)

В дальнейшем:

$p + A, p \rightarrow X$ : корреляции  $h^+ - h^+$  при  $x_T \rightarrow 1$  в двух плечах и в одном плече;  $^{12}C + A, p \rightarrow X$ : под углом  $= 0$ , а также при  $x_T \rightarrow 1$  в широком диапазоне углов (вместе со СПИН'ом)

Цели: дикварки, плотная материя

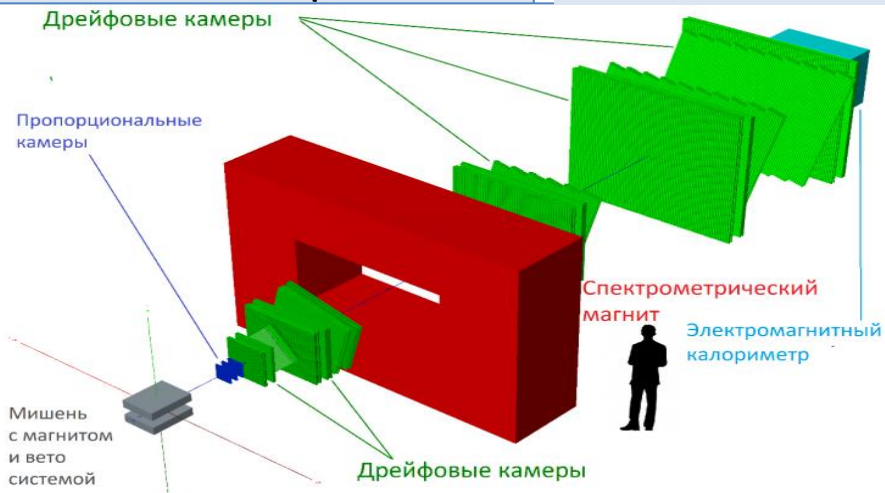


# Установка СПАСЧАРМ

(рук. А.Н. Васильев)

## Спиновая физика

Сотрудничество:  
НИЦ КИ-ИФВЭ: 18  
МИФИ: 1  
НИЦ КИ: 5  
НИЦ КИ-ПИЯФ: 3



Установка делает первые шаги. Пока это только магнитный спектрометр. Набраны первые данные с пучком  $P=-27$  Гэв/с

Предстоит:

- добавить большой  $\gamma$ -детектор (он есть)
- запустить поляризованную мишень (разработка ОИЯИ)
- возможно, дополнить установку системой идентификации

Ближайшая задача – исследование спиновой выстроенности ( $\rho^{00}$ ) векторных, а в дальнейшем и тензорных мезонов, а также поляризации  $\Lambda$ .  
На первом этапе это  $\rho^{00}(P_L, P_T)$  для  $\rho^0, K^{*+}, K^{*-}, \phi(?), f_2(?)$  в пучках  $\pi^-, K^-, \bar{p}, ^{12}C_6$  на разных мишенях (от p до Pb)  
В дальнейшем ( $\gamma$ )  $\rho^+, \rho^-, \omega, K^{*0}, a_2(?)$

С 2026 года, запланирована работа с поляризованной мишенью.

Будут измеряться спиновые асимметрии для  $\rho^0, \rho^+, \rho^-, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \omega, \phi(?), f_2(?)$  в пучках  $\pi^-, K^-, \bar{p}, ^{12}C_6$

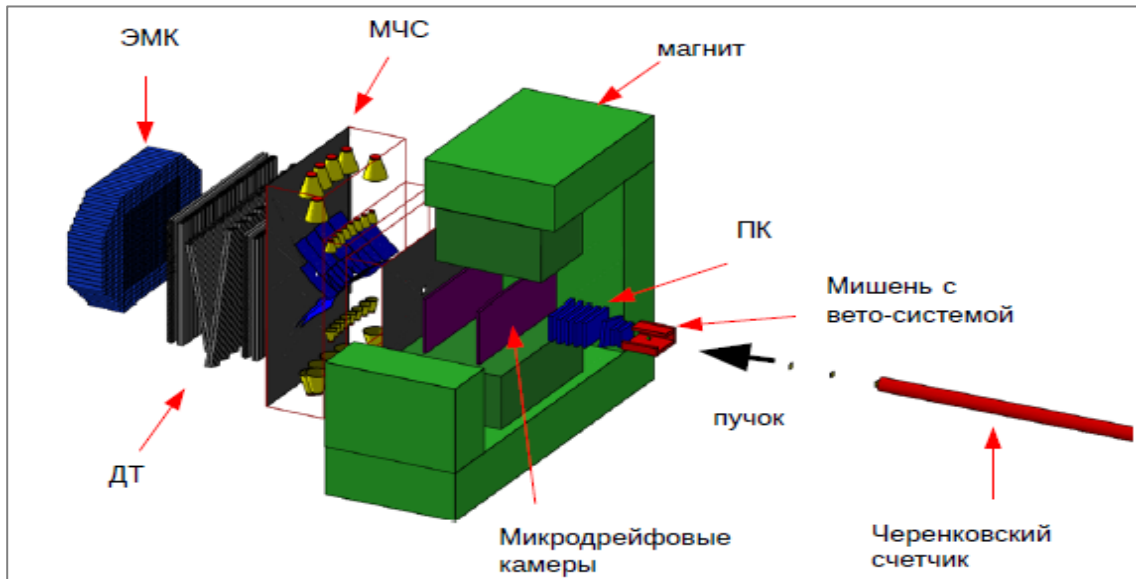
Спиновая выстроенность и спиновая асимметрия обычно имеют общую природу. В экспериментах на RHIC и LHC наблюдается значительная спиновая выстроенность векторных мезонов в реакциях с тяжелыми ионами. Результаты активно обсуждаются с привлечением моделей непертурбативной физики. Данных по выстроенности резонансов при наших энергиях почти нет, а данных по спиновой асимметрии в инклюзивных реакциях рождения векторных частиц нет совсем. Результаты ожидаются с большим нетерпением.

# Установка ВЕС (рук. Ю.А. Хохлов)

## Спектроскопия легких мезонов

НИЦ КИ-ИФВЭ: 13 сотрудников

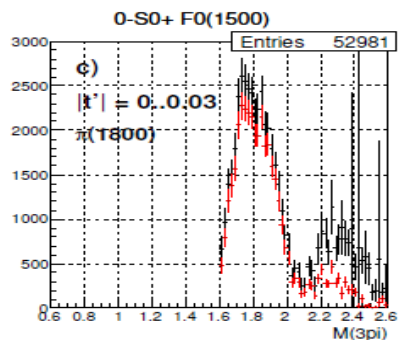
Первый вариант установки запущен в 1990 году. До 2005 года установка работала на вторичном пучке с импульсом  $p = -37$  ГэВ/с, далее -  $p = -29$  ГэВ/с



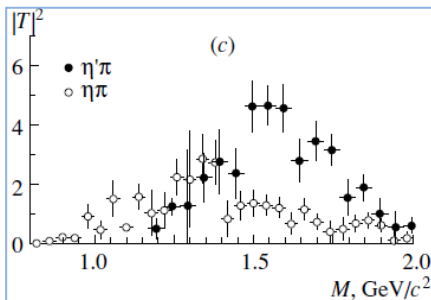
В 2005-2015 годах установка существенно модернизирована:  $\gamma$ -детектор, трековые детекторы, идентификация, пучковый спектрометр, вето-система, триггер, сбор данных, управление и контроль

### Избранные результаты

$\pi(1800)$  (1991-2020)  
Наблюдение, измерение параметров, анализ каналов распада



Наблюдение экзотического состояния  $J^{PC} = 1^{-+}$  (1993-2021)



Резонансное нарушение изотопической инвариантности в распаде  $f_1 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  (2011)

Киральная аномалия  $\pi\gamma \rightarrow \eta\pi$  (1998)

Исследование  $f_0(1770)$  (2023)  
Кандидат в глоболы


Измерено:  
 $Br(f_0(\pi^+\pi^-)) \times Br(f_0(\omega\phi))$   
Найдено:  
 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1770))^2 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(\pi^+\pi^-)) \times \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(\omega\phi)) / (Br(f_0(\pi^+\pi^-)) \times Br(f_0(\omega\phi)))$

## Исследование $f_0(1770)$

(неужели глюбол)

1. Размеры глюбола ( $\rho \approx 0.3\text{ф}$ )
2. Рождение  $f_0(1770)$  в разных реакциях, например  
 $\pi\text{-N} \rightarrow \pi\text{-}f_0(1770)\text{N}$   
 $\pi\text{-p} \rightarrow f_0(1770)\Delta_{33}$
3. Детальное изучение сигнала в разных каналах
4. Изучение соседей  $f_0(1770)$
5. Поиски  $f_2(2300)$

## Исследование $\pi(1800)$

  $\pi(1800) = \pi + G$  (пиглюн)  
 [А. Petrov, 2023]

1. Детальное исследование различных каналов распада
2. Одно или два состояния?
3. Рождение  $\pi(1800)$  в разных реакциях
4. Поиски нейтрального  $\pi(1800)$
5. Исследование  $d\sigma/dt$
6. Поиски SU(3) партнеров

## Исследование экзотики $1^{-+}$

1. Поиски нейтральных состояний.
2. Уточнение сечений и измерение параметров в каналах  $\eta\pi$ ,  $\eta'\pi$ ,  $\rho\pi$ ,  $\omega\rho$ ,  $K\bar{K}\pi$
3. Поиски в других реакциях, например, с «лишним»  $\pi$

## Исследование OZI

Сравнение  $\omega/\phi$

$\omega\pi^0$ ,  $\omega\pi^-$ ,  $\omega\pi^0\pi^0$ ,  $\omega\pi^+\pi^-$ ,  
 $\omega\pi^0\pi^-$ ,  $\omega\omega$ , .....  
 $\phi\pi^0$ ,  $\phi\pi^-$ ,  $\phi\pi^0\pi^0$ ,  $\phi\pi^+\pi^-$ ,  
 $\phi\pi^0\pi^-$ ,  $\phi\omega$ ,  $\phi\phi$ , .....

Разное:

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} + \text{скаляры}$

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow K^+/K^-/K^0 + X$  проверка изотопики

$p + p \rightarrow (p\pi^+ K^+) K^- n$  пентакварки

$\pi^- p, n \rightarrow N, \Delta + \text{резонанс «меченые реджеоны»}$

Развитие установки:

Новая система детекторов вокруг мишени

Быстрая система АЦП

Водород?

# Перспективы развития

В рамках осуществляемой программы развития ускорительного комплекса У-70 планируется значительное повышение интенсивности ускоренного пучка.

Это позволит в перспективе развить ряд новых направлений:

## 1. Фабрика каонов

- исследование эффектов высших порядков электрослабого взаимодействия и поиск аномальных вкладов в такие процессы ( $FCNC$ ,  $K_L \leftrightarrow K_S$ ,  $K \rightarrow \pi \nu \nu$  и т.д.)
- детальное изучение параметров слабых распадов и поиски отклонений от предсказаний стандартной модели ( $\Gamma(K \rightarrow e \nu) / \Gamma(K \rightarrow \mu \nu)$ , поиск скалярных и тензорных вкладов в  $K \rightarrow \pi l \nu$  и т.д.)
- поиск запрещенных или сильно подавленных в СМ реакций ( $K \rightarrow e \mu$ ,  $\Delta Q \neq \Delta S$  и т.д.)

## 2. Интенсивные пучки антипротонов

- спектроскопия
- физика гиперонов
- «меченые»  $K^0 / \bar{K}^0$

## 3. Поиски легких очень слабозаимодействующих частиц

## 4. Высокоточные измерения дифференциальных сечений эксклюзивных реакций

.....

**Ускорительный комплекс У-70 имеет уникальный потенциал для развития актуальных направлений физики высоких энергий**

**СПАСИБО**



# Медицинский пучок и канал №24

