

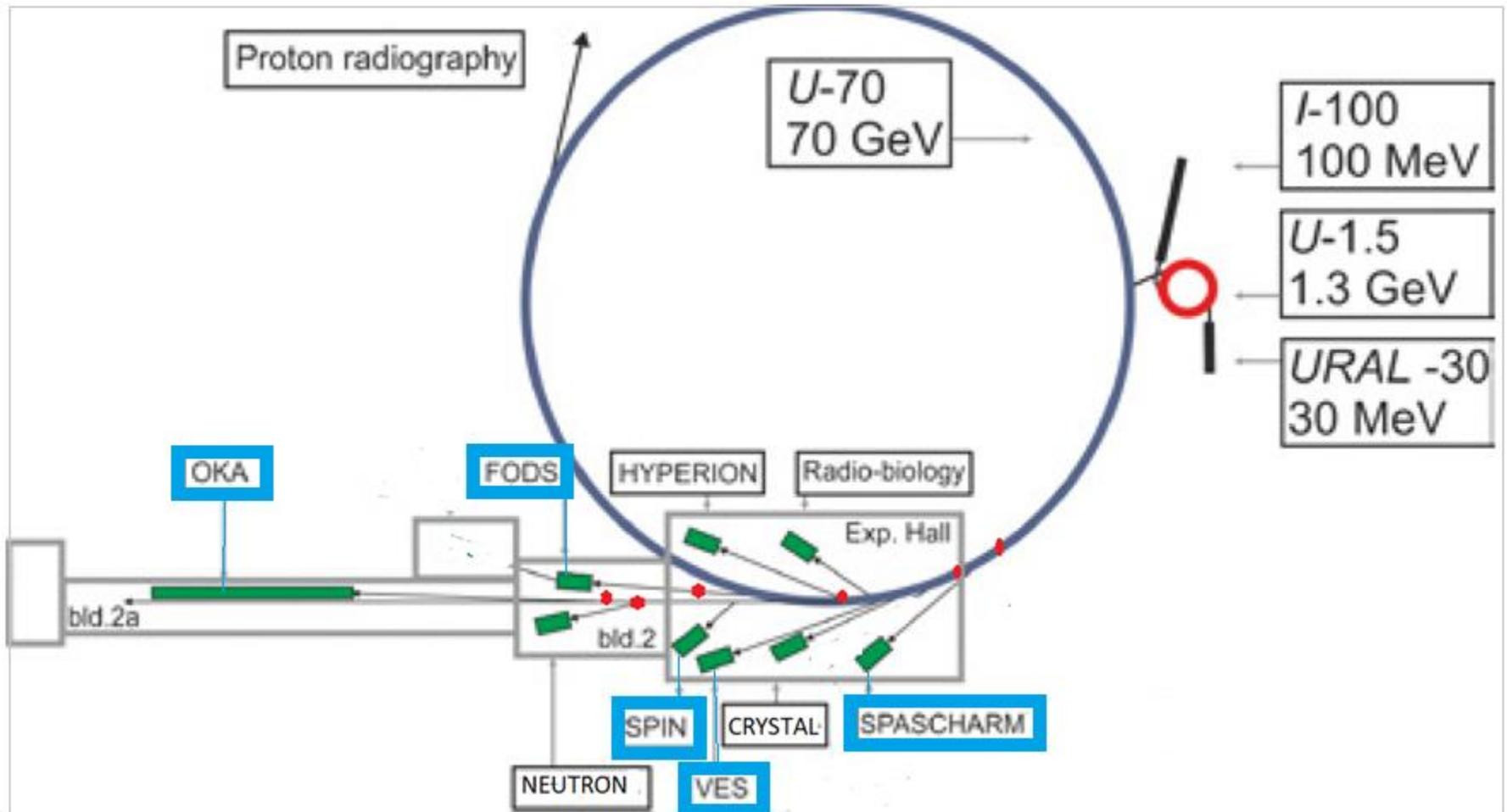


Ускорительный комплекс У-70: установки и вычислительные ресурсы

А.М. Зайцев, В.В. Котляр
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

Совещание 11-12 апреля 2024 г.
ОИЯИ

Ускорительный комплекс У-70

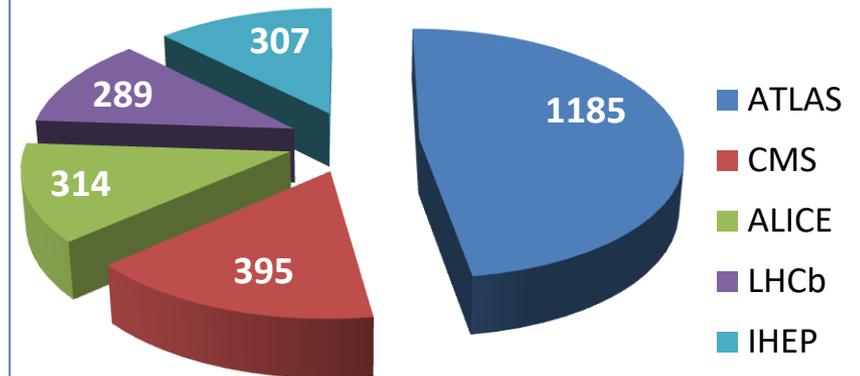
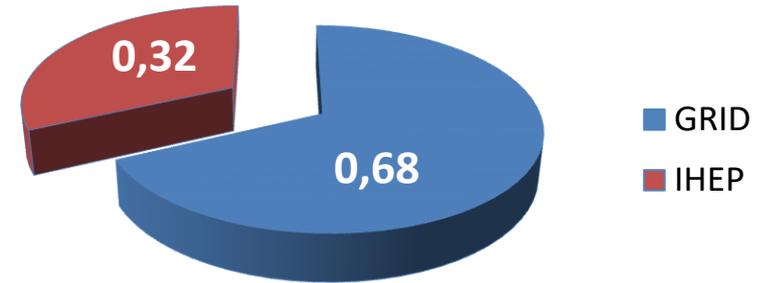


Central Linux Cluster

- Computer power (base OS CentOS7):
- 147 servers; **2956**CPU
(≈ 10 HEP-SPEC06, ≈ 2 GB)
- GRID 68%; IHEP 32%

- Storage systems:
- GRID (disks) **2183** TB:
Atlas 1185 , CMS 395,
Alice 314 , LHCb 289
- IHEP (disks) **307** TB

- Tapes
- 83TB in the libraries
- 232TB with the shelf



Цели экспериментальных исследований 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 хромоманнитный момент кварка \rightarrow яркие поляризационные явления при P_t вплоть до ≈ 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
ИЯИ
ОИЯИ



K[±] распады:
Формфакторы
Аномальные
взаимодействия

$K\mu 3$ (2002, ISTR⁺)

$Ke 3$ (2016)

Радиационные
распады:

$K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \gamma$ (2004, ISTR⁺)

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

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ (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:

$K^- \rightarrow \mu^- \nu_h (\nu_h \rightarrow \nu_\gamma)$
(2012, ISTR⁺)

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

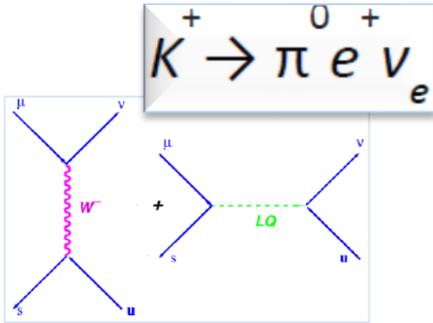
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$ (2023)

Реакции в
кулоновском поле
ядер:

WZW anomaly

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

ОКА: примеры



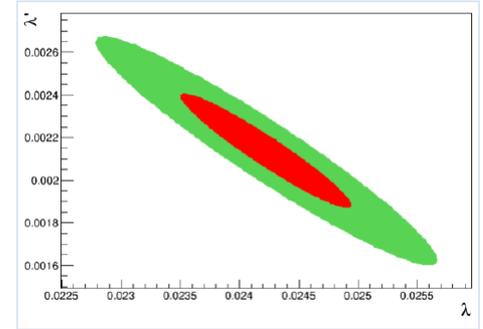
$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$$

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

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

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

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



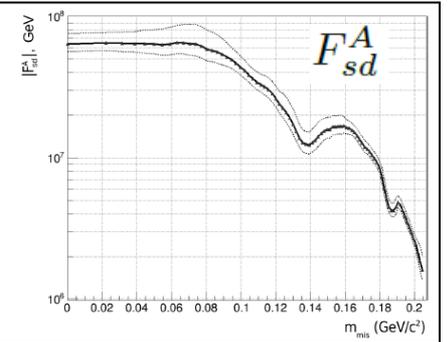
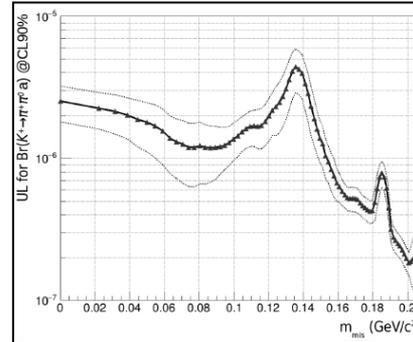
$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$$

«a» аксион

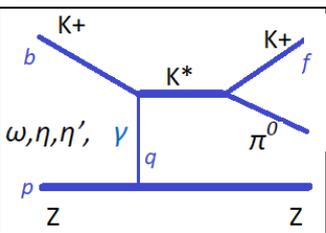
$$\mathcal{L} = q_\mu a \{ \bar{d} (\gamma_\mu / F_{sd}^V + \gamma_\mu \gamma_5 / F_{sd}^A) s \}$$

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

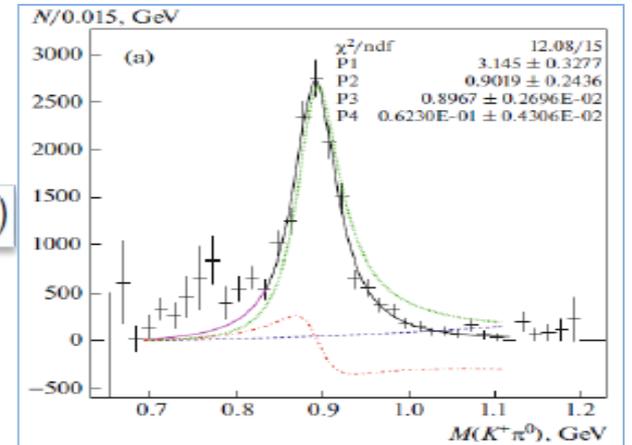


Когерентное образование $K^+ \pi^0$



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

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



Планы:

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

Один-два больших сеанса для исследования распадов

Далее - спектроскопия в пучке каонов

Установка ОКА

ОКА имеет свой компьютерный кластер из 50-ти процессоров и 100 ТБ дискового пространства. На нем выполняется реконструкция сырых данных и событий МК. Часть работ по МК выполняется на центральном кластере. Использование центрального кластера будет увеличиваться.

1	Количество регистрируемых событий за цикл У-70 (9 секунд)	30 000
2	Размер события	4 кБ
3	Объем хранимых сырых событий	20 ТБ диски, 15 ТБ ленты
4	Процессорное время для реконструкции одного события	0,003 сек
5	Количество реконструированных событий	6E9 (сырые)-> 3E9(DST)
6	Сколько раз реконструируется событие	2-4 раза
7	Сколько места занимают рек. события	12 ТБ
8	Количество созданных МК событий	8E10
9	Процессорное время на генерацию и реконструкцию МК	0,02 сек на событие
10	Сколько места занимают данные МК	20 ТБ (gzipped)
11	Требования к выч. комплексу для реконструкции и МК	Кластер ОКА*2-3

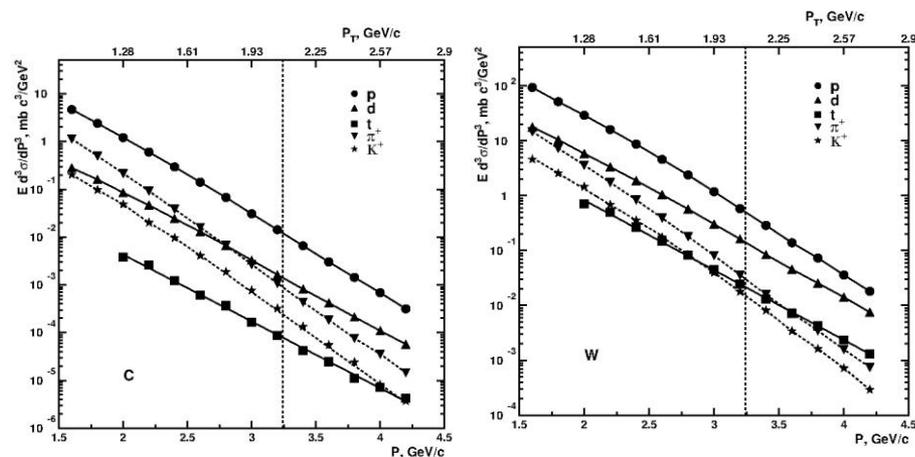
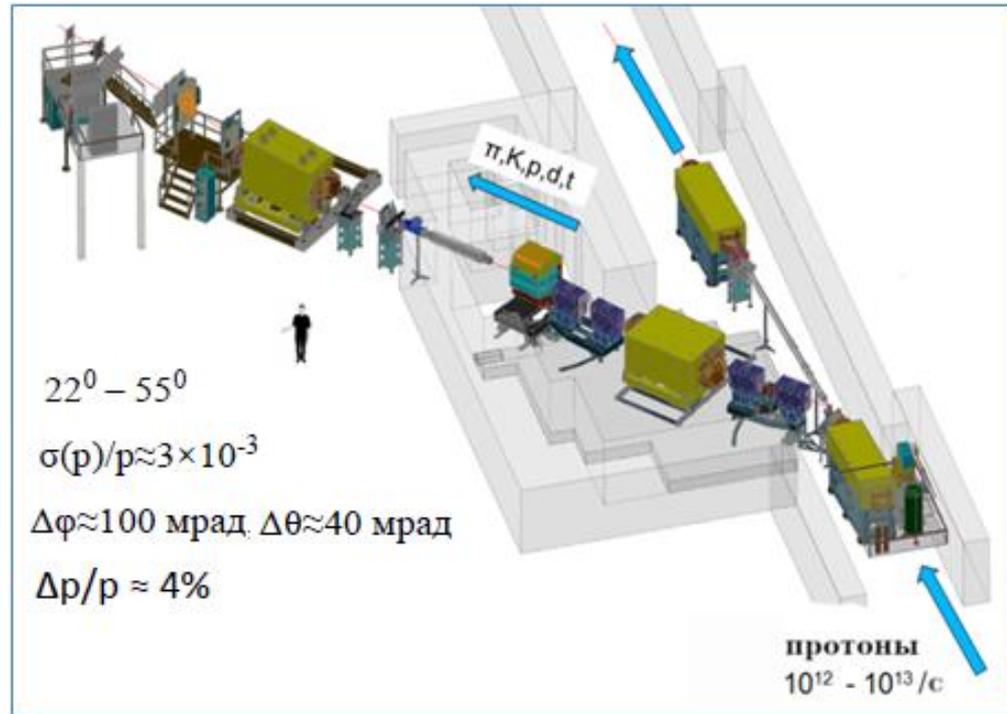
Установка СПИН (рук. В.А. Гапиенко)

Кумулятивные процессы с большими P_T

Сотрудничество НИЦ КИ-ИФВЭ, ОИЯИ

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 ~ 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° из углеродной и из вольфрамовой мишеней.

Установка СПИН

1	Количество событий за цикл У-70	400->1000
2	Размер события	1,5 кБ
3	Объем хранимых сырых событий	8 ТБ
4	Процессорное время для реконструкции одного события	0,2 сек
5	Сколько места занимают рек. события	8 ТБ
6	Количество созданных МК событий	2,5Е9
7	Процессорное время на генерацию и реконструкцию МК	0,004 сек на событие
8	Требования к выч. комплексу для реконструкции и МК	15 ТБ диск

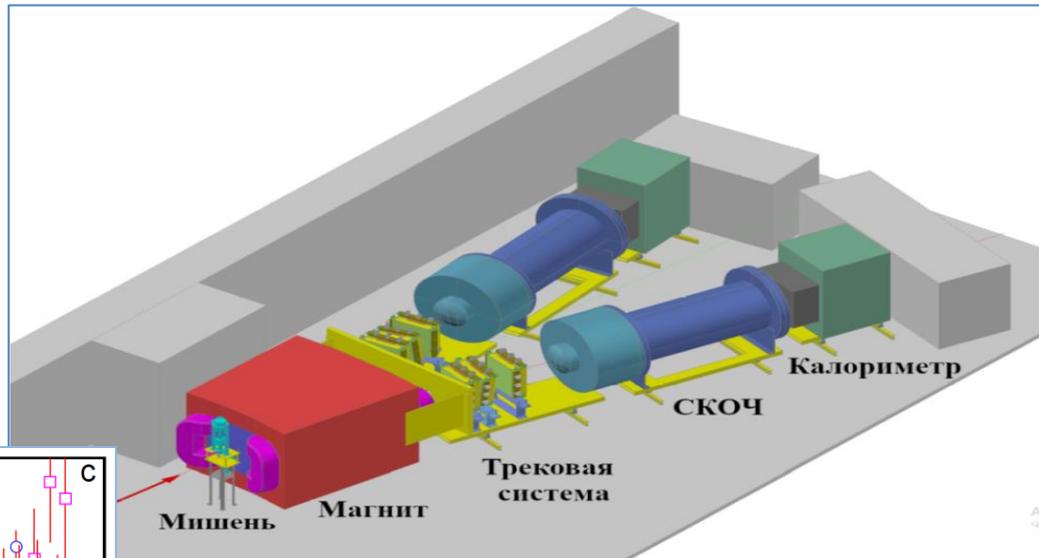
Установка ФОДС (рук. А.А. Волков)

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

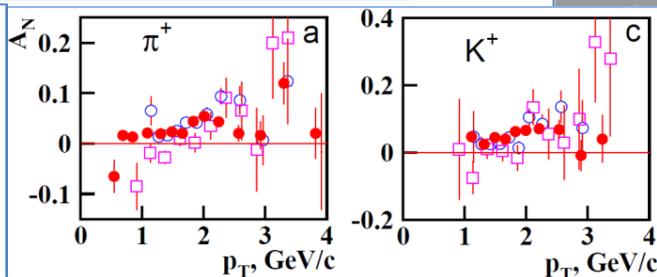
НИЦ КИ-ИФВЭ

Двухплечевой спектрометр с идентификацией заряженных частиц

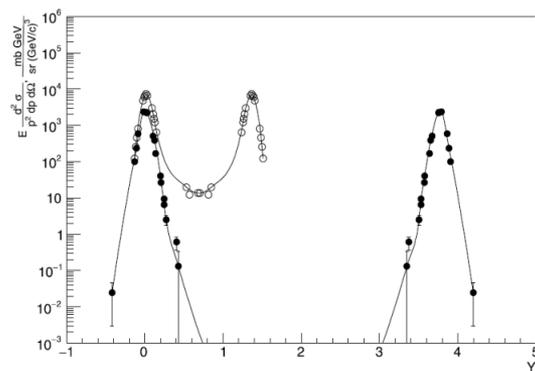
Основные результаты



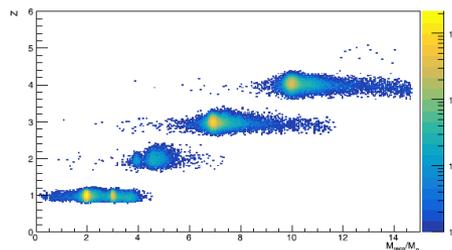
Односпиновые асимметрии при больших p_T в $p \uparrow A$ взаимодействиях



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



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



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)

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

Цели: дикварки, плотная материя

Установка ФОДС

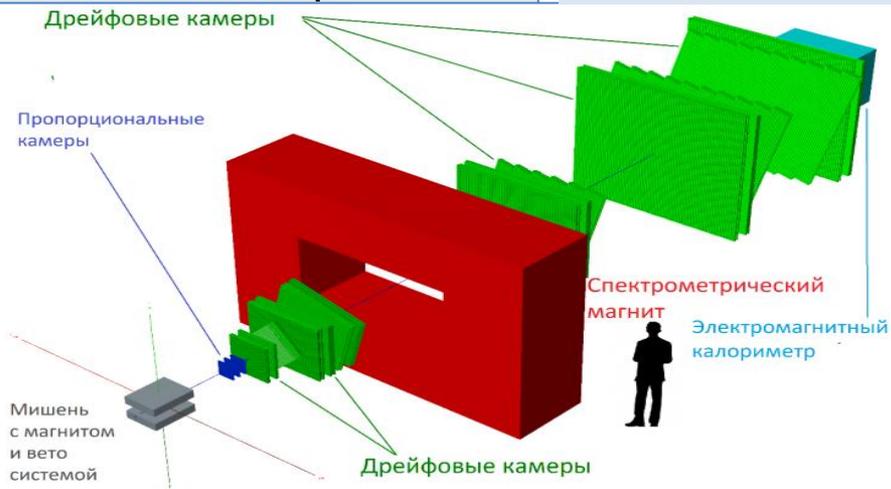
1	Количество событий за цикл У-70	30 000
2	Размер события	1,5 кБ
3	Количество хранимых сырых событий	2 ТБ
4	Процессорное время для реконструкции одного события	0,001 сек
5	Количество реконструированных событий	1 E8
6	Сколько раз приходится реконструировать событие	3-4 раза
7	Сколько места занимают рек. события	2 ТБ
8	Количество созданных МК событий	5E10
9	Требования к выч. комплексу для МК и анализа данных	+10 ТБ

Установка СПАСЧАРМ

(рук. А.Н. Васильев)

Спиновая физика

Сотрудничество:
НИЦ Ки-ИФВЭ
МИФИ
НИЦ Ки
НИЦ Ки-ПИЯФ



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

Предстоит:

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

Ближайшая задача – исследование спиновой выстроенности (ρ^{00}) векторных, а в дальнейшем и тензорных мезонов, а также поляризации Λ .
На первом этапе это ρ^{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 (γ) $\rho^+, \rho^-, \omega, K^{*0}, a_2(?)$

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 СПАСЧАРМ

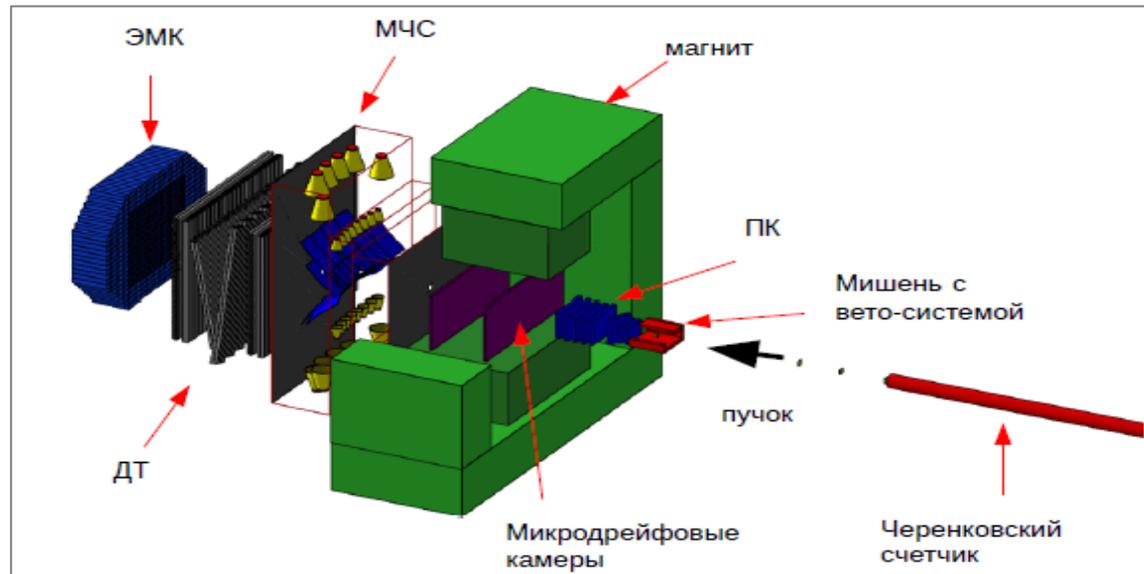
1	Количество событий за цикл У-70	15 000
2	Размер события	3 кБ
3	Объем хранимых сырых событий	1,4 ТБ
4	Процессорное время для реконструкции одного события	1 сек
5	Количество реконструированных событий	2Е9
6	Сколько раз приходится реконструировать событие	1-3
7	Сколько места занимают рек. события	2 ТБ
8	Количество созданных МК событий	3Е8
9	Процессорное время на генерацию и реконструкцию МК	1 сек на событие
10	Сколько места занимают данные МК	1 ТБ
11	Требования к выч. комплексу для реконструкции и МК	Удвоить выч. мощности +20 ТБ

Установка ВЕС (рук. Ю.А. Хохлов)

Спектроскопия легких мезонов

НИЦ КИ-ИФВЭ

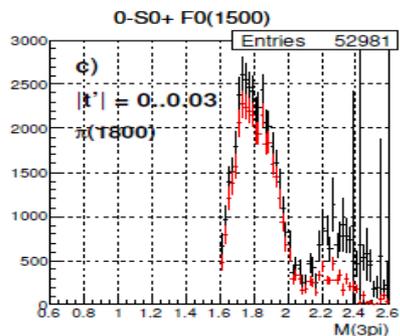
Первый вариант установки запущен в 1990 году. До 2005 года установка работала на вторичном пучке с импульсом $p = -37$ ГэВ/с, далее - $p = -29$ ГэВ/с



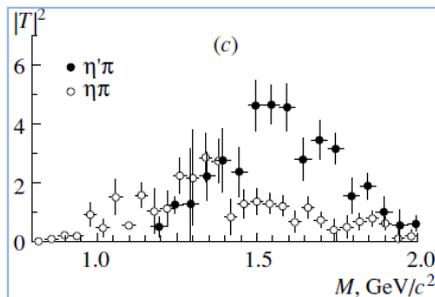
В 2005-2015 годах установка существенно модернизирована: γ -детектор, трековые детекторы, идентификация, пучковый спектрометр, вето-система, триггер, сбор данных, управление и контроль

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

ВЕС: планы

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» π

Исследование OZI

Сравнение ω/ϕ

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

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?

Установка ВЕС

1	Количество событий за цикл У-70	20 000
2	Размер события	4 кБ
3	Количество хранимых сырых событий	1,8E10
4	Процессорное время для реконструкции одного события	0,1 сек
5	Количество реконструированных событий	1,8E10
6	Сколько раз приходится реконструировать событие	2
7	Сколько места занимают рек. события	72 ТБ
8	Количество созданных МК событий	1,2E10
9	Затраты процессорного времени на МК	1,7 сек на событие
10	Сколько места занимают данные МК	40 ТБ
11	Требования к выч. комплексу для реконструкции и МК	Удвоить выч. процессоры+100 ТБ

Основной вывод по вычислительным ресурсам НИЦ КИ-ИФВЭ в ближайшие годы

В связи с завершением работ по экспериментам на БАК на кластере НИЦ КИ-ИФВЭ высвобождаются вычислительные мощности (≈ 2000 CPU) и диски (≈ 2000 ТБ)

В 2025 году высвобождающиеся CPU будут полностью загружены задачами экспериментов , выполняемых на ускорительном комплексе У-70. При нормальной эксплуатации ускорительного комплекса этих вычислительных мощностей будет недостаточно уже в 2026 году.

Высвобождающиеся объемы дисковой памяти позволят решить ряд острых проблем сегодняшнего дня и обеспечат нормальный процесс накопления и анализа данных экспериментов на У-70 вплоть до 2027 года.

СПАСИБО