

Экспериментальные работы на ускорительном комплексе ВЭПП-4М

К.Ю. Тодышев

Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН

- 1 Физическая программа эксперимента КЕДР на ускорительном комплексе ВЭПП-4М
- 2 Статус эксперимента КЕДР/ВЭПП-4М
- 3 Основные результаты 2023 года
 - 1 Лазерный поляриметр и сканирование $\Upsilon(1S)$
 - 2 Работы с тестовым пучком на ВЭПП-4М
 - 3 Методические работы по трековым системам
- 4 Результаты по анализу набранной статистики
- 5 Заключение

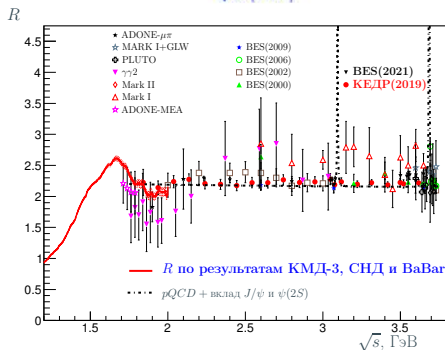
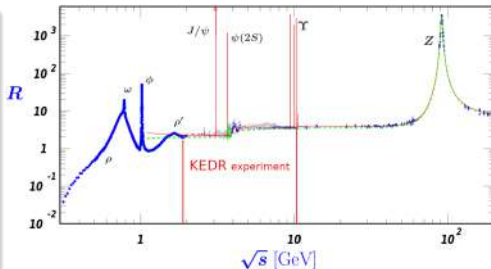
Эксперимент КЕДР на ВЭПП-4М

Физические задачи

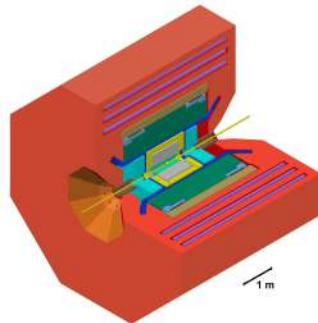
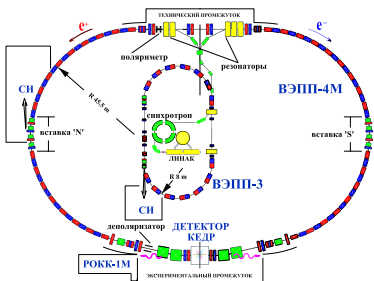
- Измерение масс элементарных частиц
 - Низкая энергия:
 J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$, D^0 , D^\pm , τ
 - Высокая энергия:
 $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$, $\Upsilon(4S)$
- Измерение лептонных ширин ψ - и Υ - мезонов
- Измерение R в области $2E = 2 \div 10$ ГэВ
- Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны
- Исследование ряда других процессов

Достижения КЕДР/ВЭПП-4М

- ✓ Выполнено более 20 измерений физических величин с лучшей в мире точностью



ВЭПП-4М и КЕДР



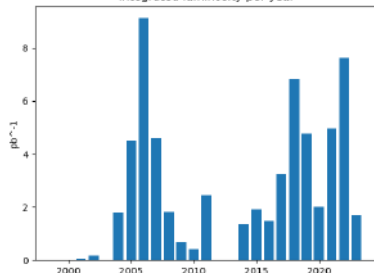
- Vertex detector
- Drift chamber
- Aerogel threshold counters
- ToF counters
- I&K calorimeter
- Superconducting coil
- Yoke
- Muon chambers
- Cal calorimeter
- Compensating solenoid

Энергия	0.9 ÷ 5 ГэВ
Число сгустков	2 × 2
Светимость ($E = 1.8$ ГэВ)	$2 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

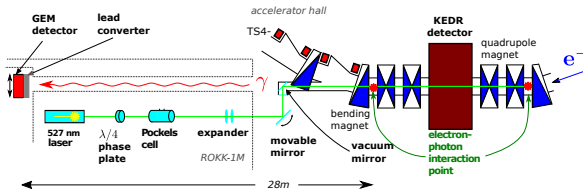
С 2003 года опубликовано:

- 23 статьи по физическим результатам эксперимента КЕДР,
- 31 статья по итогам конференции или связанных с анализом данных,
- 53 статьи по методике эксперимента и системам детектора.

Integrated luminosity per year

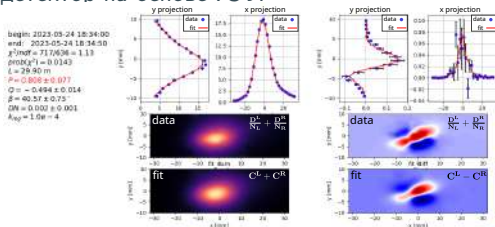


Лазерный поляриметр



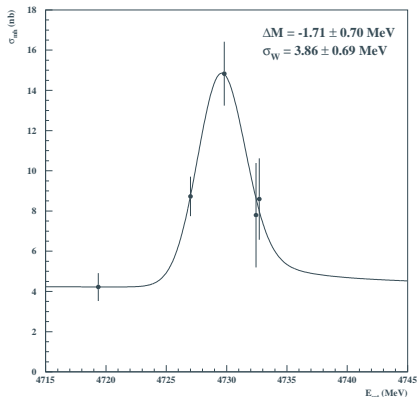
- Импульсный Nd:YLF 527 нм лазер.
- Управление поляризацией ячейкой Поккельса.
- Двухкоординатный пиксельный детектор на основе ГЭУ.

- Проведена замена узла ввода излучения.
- Установлено новое медное зеркало.
- Интенсивность регистрируемого излучения возросла в 10 раз.

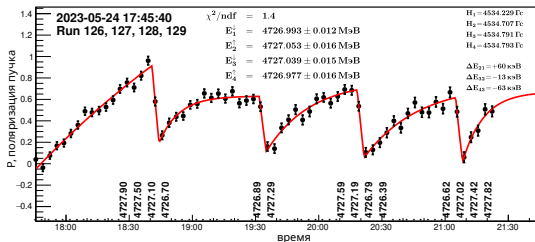


Пробное сканирование $\Upsilon(1S)$

Наблюдаемое сечение рождения адронов в зависимости от энергии при сканировании $\Upsilon(1S)$ -резонанса. Сканирование 24.05.2023 ($\int Ldt \sim 26 \text{ нб}^{-1}$).



Прецизионные измерения энергии во время сканирования $\Upsilon(1S)$.



Тестовые пучки электронов и гамма-квантов

Эксперименты 2023 года на выведенном пучке электронов (2.5 ГэВ), 20 смен:

- Исследование прототипа порогового черенковского детектора для космической дозиметрии (Роскосмос),
- Методические работы с прототипом системы идентификации FARICH,
- Сканирование прототипа аэрогелиевого счетчика для Снд,
- Исследования энергетического разрешения прототипа калориметра на основе кристаллов чистого CsI (матрица 4x4). В рамках данной работы создана система позиционирования, предназначенная для тестирования прототипов калориметров весом до 400 кг.



- Произведен и испытан (e^- @ 2.5 GeV) самый крупный 4-слойный фокусирующий аэрогелевый радиатор черенковских колец. Разрешение по черенковскому углу, определяемое аэрогелевым радиатором составило 5.7 мрад (в однофотонном режиме), что при позиционно-чувствительных фотосенсорах с пикселем 3x3 мм может обеспечить надежное разделение частиц:
 - $\pi/K \sim 3\sigma$ до $P=8.5$ ГэВ/c
 - $\mu/\pi \sim 3\sigma$ до $P=1.7$ ГэВ/c

Модернизация системы АШИФ для Снд:
(ФУ с МП → SPM & Аэрогель большой размер)

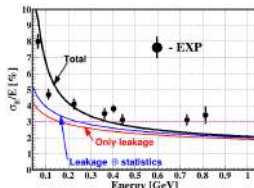
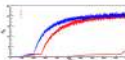
- Собран и протестирован прототип счетчика
- Счетчик улучшается в 2 раза
- Новая электроника может работать с системой считывания Снд
- μ/K -разделение на уровне 4 σ в рабочей области мильюнов
- В цеху в лаборатории изготавливаются корпуса и системы термо-стабилизации SPM.

АШИФ-SPM for Snd@VEPP-2000

- Aerogel: 3cm R, $n=1.13$
- $N_{ph}(\beta=1) = 20$
- 9 counters 26x10x3 cm in 2 layer
- WLS - 880, 260x17x3 mm²
- 5x8x05 SPMs 3x3 mm²



Prototyping & designing

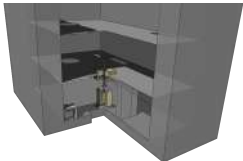


Стенд для исследования радиационного старения ТФЭУ

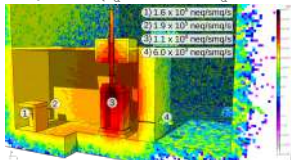
Ведутся работы по созданию стенда как части установки БНЗТ, с целью исследования поведения SiPMs при их облучении быстрыми нейтронами.

- Проработка вариантов размещения электроники выполнена с использованием пакета FLUKA

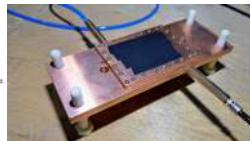
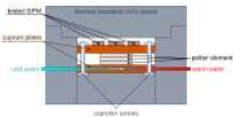
Пример описания геометрии бункера #2



Результаты расчёта ($E_d = 1.5 \text{ МэВ}$, $I_d = 1 \text{ мА}$, $t = 1 \text{ с}$)

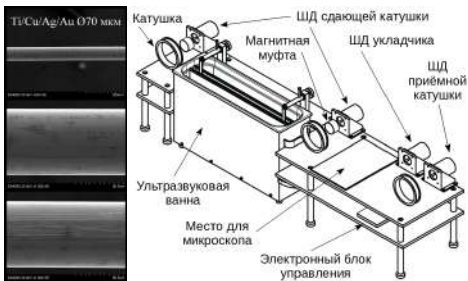


- Реализованная система транспортировки света от оптического генератора до радиационно опасной зоны.
- Разработана камера тепла и холода: диапазон температур от -20°C до $+40^\circ\text{C}$ ($\pm 0.1^\circ\text{C}$).

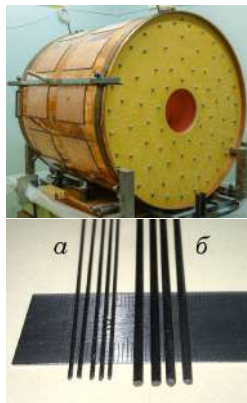


- Радиационные тесты начнутся в феврале 2024.

Работы по новым трековым системам

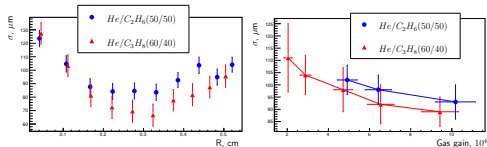
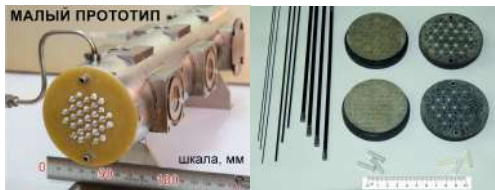
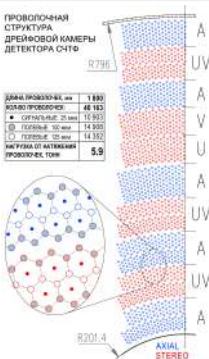


- Проведена модернизация перемоточного станка.
- Выполнены работы по исследованию качества поверхности проволоки.



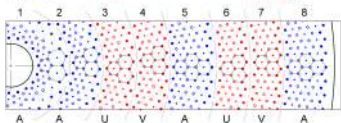
- В 2023 году в Институте космических и авиационных материалов (НИИКАМ), изготовлена новая оснастка для натяжения проволочек – спицы. Материал изделий углепластик (модуль упругости на изгиб 280 ГПа), обеспечивающий лёгкость оснастки и её малый прогиб. Диаметры спиц составляют 0.85 и 2 мм, длина до 2 м.

Работы над прототипами ДК СЧТФ и КМД-3



WIRE LAYER NUMBER	NUMBER OF WIRES	NUMBER OF WIRE LAYERS	NUMBER OF WIRE LAYERS	WIRE DIAMETER, mm	WIRE LENGTH, mm	WIRE WEIGHT, mg	WIRE RESISTANCE, Ohm	WIRE TENSILE STRENGTH, N	WIRE TENSILE ELONGATION, %	WIRE TENSILE MODULUS, GPa	WIRE TENSILE YIELD STRENGTH, MPa	WIRE TENSILE ELONGATION AT BREAK, %	WIRE TENSILE MODULUS OF ELASTICITY, GPa	WIRE TENSILE YIELD STRENGTH, MPa	WIRE TENSILE ELONGATION AT BREAK, %	WIRE TENSILE MODULUS OF ELASTICITY, GPa
1	3	15	30	0	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
2	3	30	30	0	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
3	3	30	150	-45	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
4	3	30	150	-45	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
5	3	30	150	-45	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
6	3	30	240	0	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
7	3	150	270	-45	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
8	3	150	270	-45	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
9	3	150	420	0	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
10	3	150	420	0	1.930	1710	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70

The CMD new drift chamber geometry



- Проведено измерение пространственного разрешения на прототипе ДК на основе гексагональной ячейки малого размера с рабочими смесями $\text{He}/\text{C}_3\text{H}_8(60/40)$ и $\text{He}/\text{C}_2\text{H}_6(50/50)$.
- При газовом усилении выше 6×10^4 среднее разрешение $\sigma \lesssim 100 \mu\text{m}$.

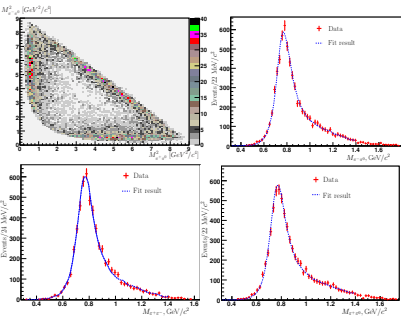
Измерение вероятностей распадов

$$J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \text{ и } J/\psi \rightarrow \rho \pi$$

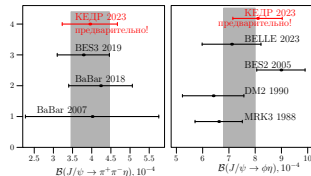
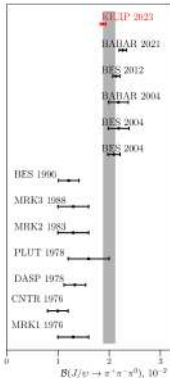
- Измерены величины вероятностей процессов $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ и $J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$. Получены следующие результаты:

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho \pi) = (2.072 \pm 0.017 \pm 0.062) \times 10^{-2}$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) = (1.878 \pm 0.013 \pm 0.051) \times 10^{-2}$$



ЖНЕР 06 (2023) 196



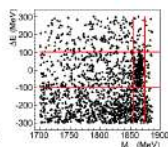
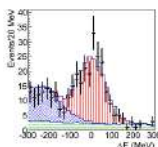
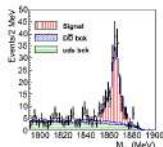
Ведётся анализ процессов $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ и $J/\psi \rightarrow \phi \eta$.

Измерение масс D -мезонов

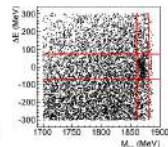
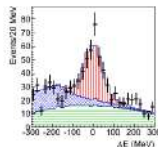
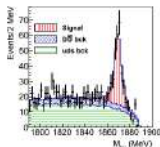
Анализ данных 2004 г. и 2016-2017 гг. ($\int L dt \simeq 4.9 \text{ пб}^{-1}$)

- Набор статистики в области $\psi(3770)$ -резонанса, который в распадается на $D\bar{D}$ -пару.
- Кинематическая реконструкция процессов $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$.

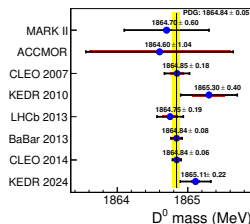
$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$$



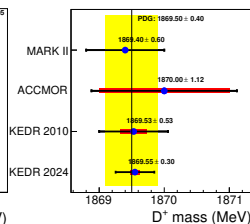
$$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$$



D^0 mass measurements



D^+ mass measurements

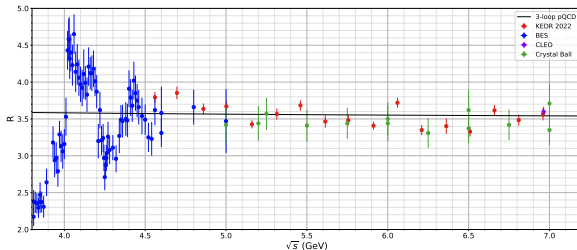


Анализ близок к завершению, подготовлена публикация.

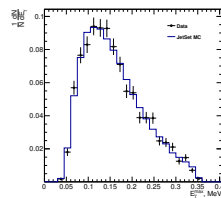
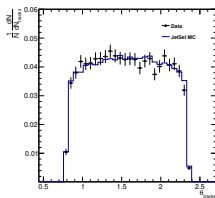
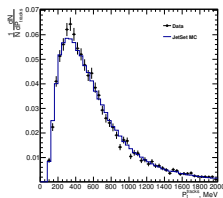
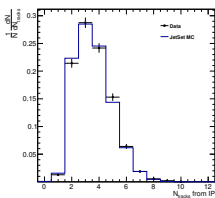
- $M_{D^0} = 1865.110 \pm 0.209 \pm 0.059 \text{ МэВ}$
- $M_{D^+} = 1869.550 \pm 0.288 \pm 0.075 \text{ МэВ}$

Предварительные результаты измерения R на высокой энергии $2E = 4.5 \div 7.0$ ГэВ

- 2 сканирования, 17 точек по энергии, $\int Ldt = 13.7$ пб $^{-1}$



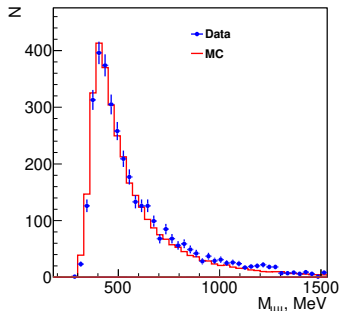
Для данных КЕДР указаны только стат. ошибки



Ведётся работа по настройке генератора $J/\psi \rightarrow$ адроны событий.

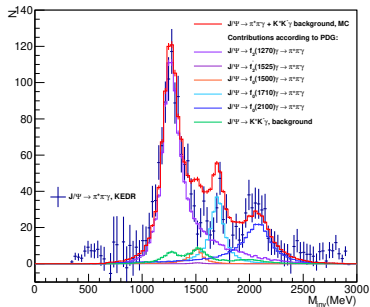
Анализ $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + l^+l^-$ и $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^- + l^+l^-$$



- На статистике 2023 года выделено 3490 событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + l^+l^-$.
- После починки триггера и очистки LKr для событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + l^+l^-$ согласие эксперимента с моделированием. Ведётся изучение систематик, связанных с разделением.
- Проведена проверка калибровки CPPЭ и определена эффективность.

$$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$$



Очень предварительные результаты

- $Br(J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (108.6 \pm 5.7 \pm 2.5) \times 10^{-5}$
(В PDG scale factor 1.3, согласие с данными CLEO)
- $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (223.1 \pm 7.6 \pm 5.0) \times 10^{-5}$
PDG:
 $Br(J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma) = (115. \pm 50.) \times 10^{-5}$

Заключение

- Набор статистики на энергии $2E=7$ ГэВ, $\int Ldt \sim 1.3$ пб⁻¹, 4 недели.
- Проведено пробное сканирование $\Upsilon(1S)$.
- Публикации:
 - *Experiments with the KEDR detector at the e^+e^- collider VEPP-4M in the energy range $\sqrt{s} = 1.84 - 3.88$ GeV*
Physics of Elementary Particles and Nuclei, **54** (2023) 185
 - *Measurement of the branching fraction of $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ at KEDR*
JHEP **06** (2023) 196
- Работы по созданию уникального стенда для проведения радиационных тестов с быстрыми нейтронами на установке БНЗТ и измерение вероятностей распадов $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ вошли в список достижений ИЯФ за 2023 год.

Ближайшие планы :

- Прецизионное измерение массы $\Upsilon(1S)$.
- Планируемое повышения точности массы до ~ 50 кэВ.

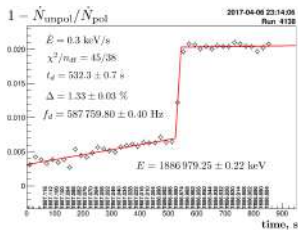
VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
9460.40 ± 0.09 ± 0.04	1 SHAMOV	2023	RVUE $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •			
9460.11 ± 0.11 ± 0.07	2 SHAMOV	2023	RVUE $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
9460.51 ± 0.09 ± 0.05	3, 4 ARTAMONOV	2000	MD1 $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
9460.60 ± 0.09 ± 0.05	5, 6 BARU	1992B	MD1 $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
9460.59 ± 0.12	BARU	1986	MD1 $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
9460.6 ± 0.4	7, 8 ARTAMONOV	1984	MD1 $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
9460.97 ± 0.11 ± 0.07	8 MACKAY	1984	CUSB $e^+e^- \rightarrow$ hadrons

Команда установки детектор КЕДР (фото А.А.Осипова)

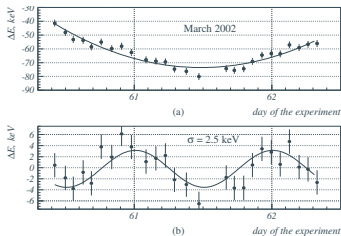


Спасибо за внимание !

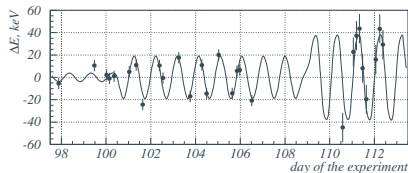
Измерение энергии в эксперименте КЕДР



Изменение скоростей счёта для поляризованного и неполяризованного пучков.



Верхний рисунок — энергия в зависимости от времени, нижний тоже самое после вычитания



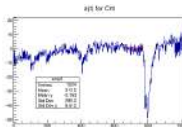
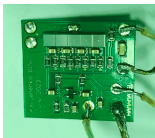
Интерполяция энергии после удаления всех аперiodических зависимостей.

- Точность интерполяции энергии составляет 10-30 кэВ.
- В течение эксперимента проведено более 3000 калибровок энергии.

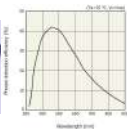
Обновление системы АШИФ Снд: ФЭУ МКП → КФЭУ (SiPM) 8÷10 (PDE≈14%)⇒20÷30 ф.э.(PDE≈40%)



- Прототип на основе сегмента системы АШИФ детектора Снд
- Аэрогель с $n = 1.12$
 - 4 больших блока толщиной 25 мм
- Линейка из 5 SiPM закрывает торец шифтера размером $17 \times 3 \text{ мм}^2$
- Параллельное соединение 5 SiPM по питанию и последовательное соединение по сигналу (NIMA 925 (2019) 148)



MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13363-3050NE-16



- Производитель: "Hamamatsu"
- Эффективная фоточувствительная область/канал $3 \times 3 \text{ мм}$
- Количество пикселей/канал 3584
- PDE=40% на $\lambda=500 \text{ нм}$, напряжение питания $<100 \text{ В}$ ($V_{BR}=53 \text{ В}$)
- Любое направление магнитного поля
- **Высокий уровень DCR (0.5 МГц на канал)**