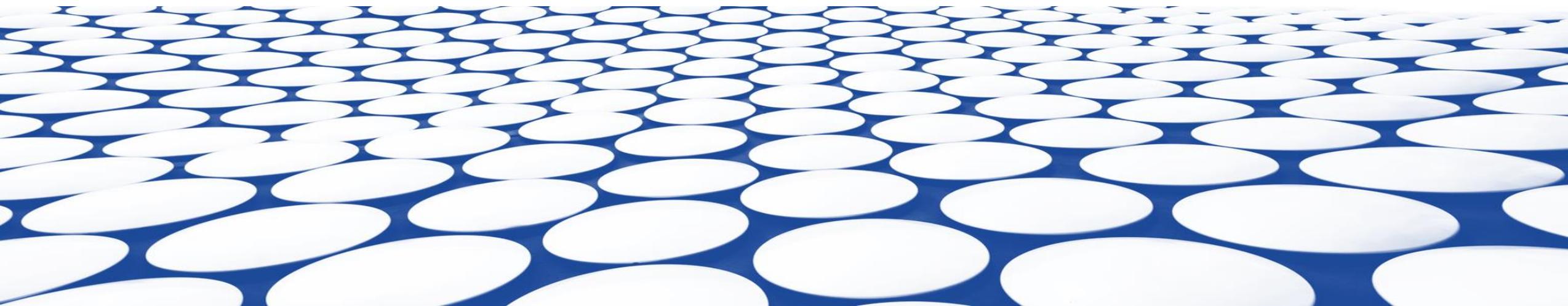




Проект «Супер Чарм-Тау Фабрики»

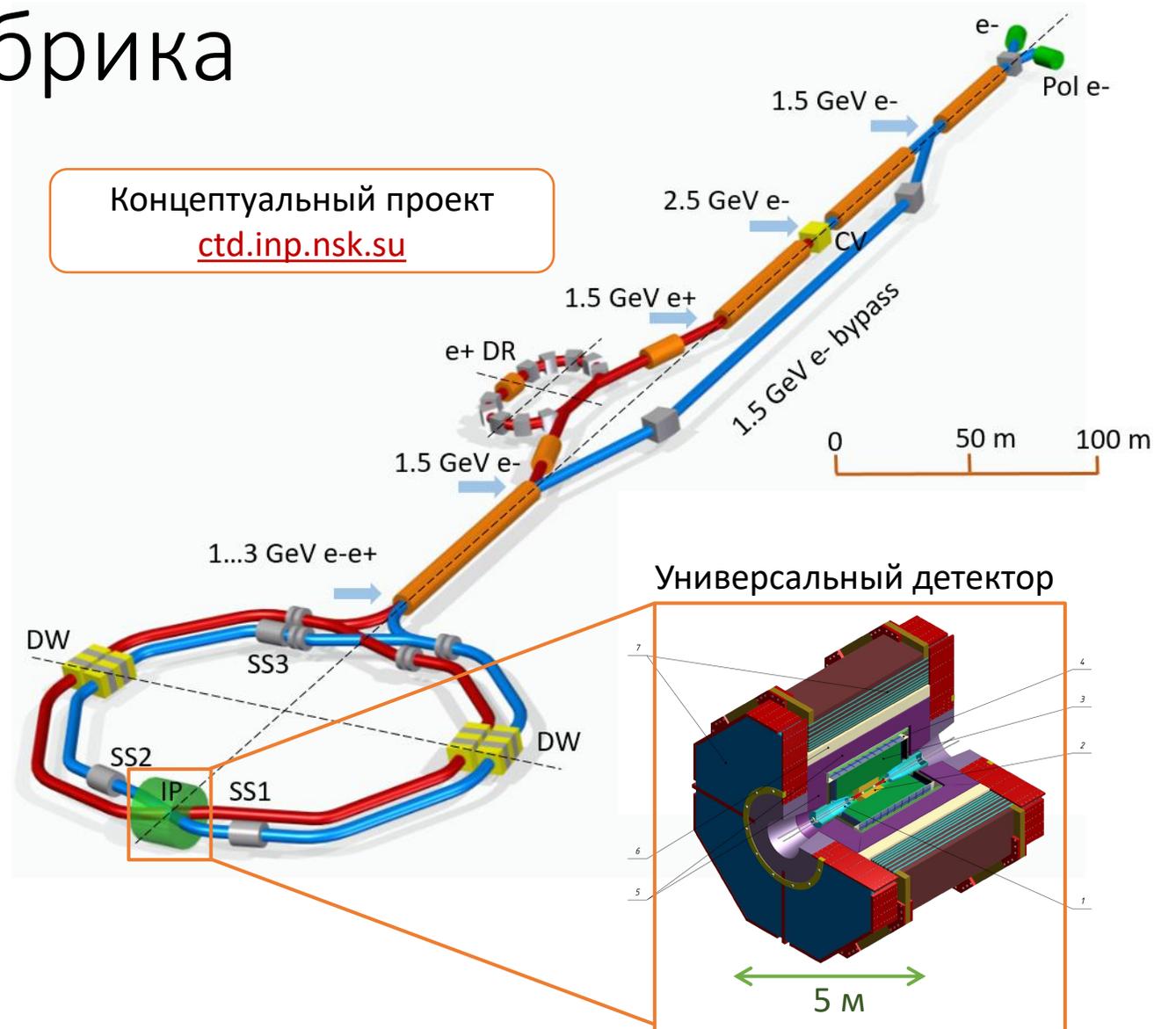
Виталий Воробьев, ИЯФ СО РАН

22.04.2021, ПИЯФ

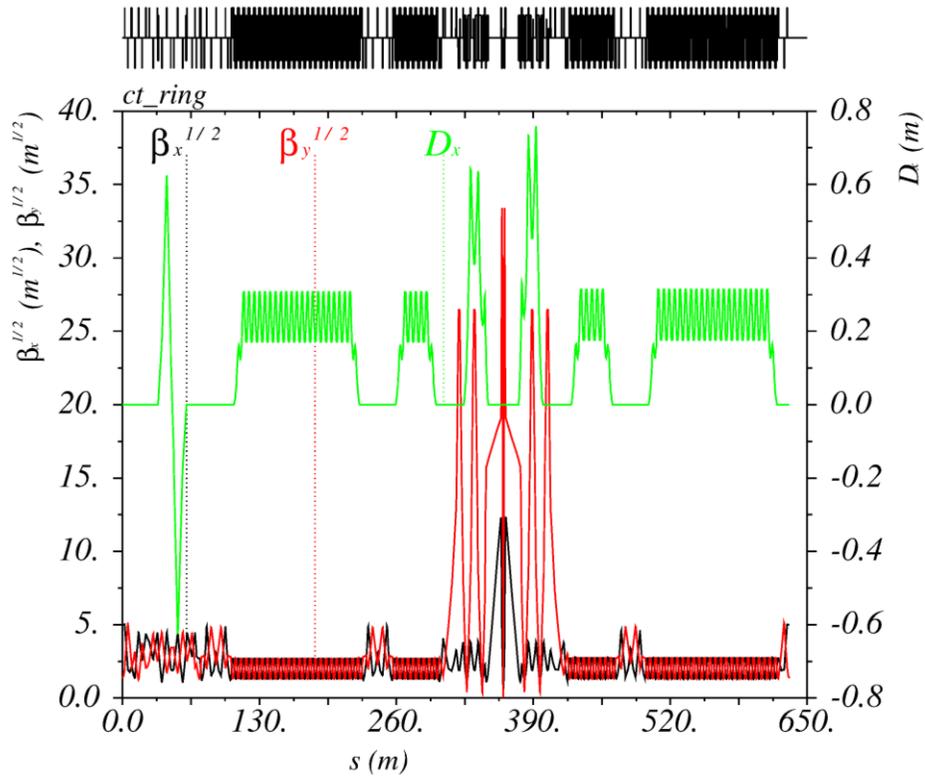


Супер Чарм-Тау Фабрика

- Электрон-позитронный коллайдер для прецизионных экспериментов с тау лептоном и очарованными адронами и поиска новой физики
 - Энергия пучка от 1.5 до 3.5 ГэВ
 - Светимость $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ @ 2 ГэВ
 - Продольная поляризация электронов
- Универсальный детектор частиц
 - Трековая система
 - Калориметр
 - Система идентификации частиц



Параметры коллайдера 2021

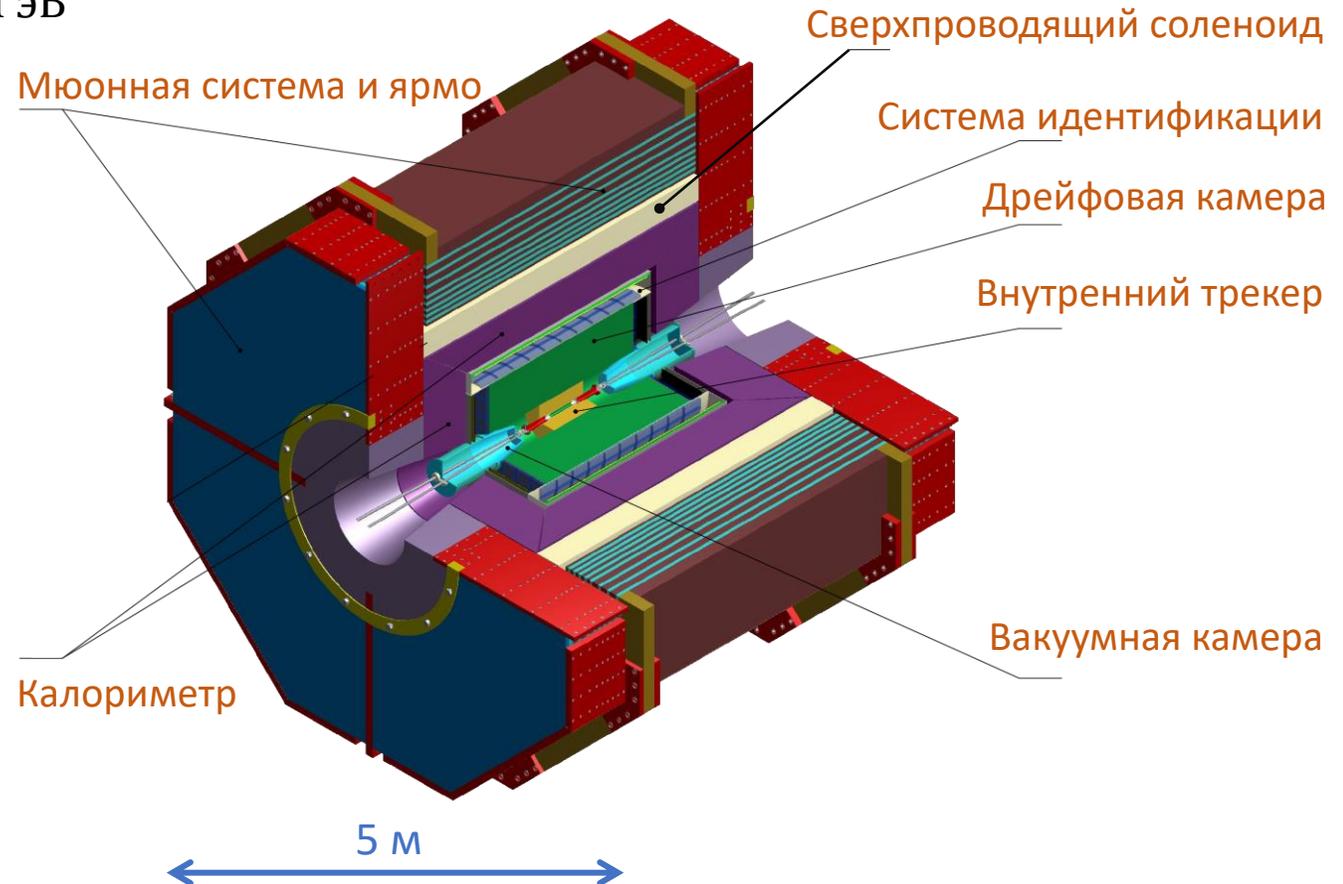


- Продолжается оптимизация динамической апертуры на низких энергиях

E(MeV)	1500	2000	2500	3000	3500
Π (m)	632.94				
F_{RF} (MHz)	350				
q	740				
2θ (mrad)	60				
$\varepsilon_y/\varepsilon_x$ (%)	0.5				
β_x^* (mm)	100				
β_y^* (mm)	1				
α	2.2×10^{-3}				
I(A)	2	2	2	2	2
$N_{e/bunch} \times 10^{10}$	9	8	8	9	10
N_b	292	328	328	292	262
U_0 (keV)	21	67	164	340	629
V_{RF} (kV)	1600	2000	2000	2000	3400
v_s	0.0164	0.016	0.0142	0.013	0.0155
δ_{RF} (%)	2	1.9	1.7	0.014	1.6
$\sigma_e \times 10^3$ (SR/IBS)	0.28/1	0.4/0.7	0.47/0.62	0.57/0.61	0.66/0.68
σ_s (mm) (SR/IBS)	4/13	5/10	7/9.4	9.5/10.2	9.2/9.4
ε_x (nm) (SR/IBS)	3/21	4.7/12.7	7.4/10.5	10.6/11.6	14.5/14.8
$L_{HG} \times 10^{35}$ ($cm^{-2}s^{-1}$)	0.5	0.8	1	1	1
ξ_x	0.008	0.009	0.009	0.007	0.008
ξ_y	0.11	0.12	0.11	0.092	0.084
$\tau_{Touschek}$ (s)	3600	2900	2400	2600	6400
τ_L (s)	3100	1900	1600	1700	1600

Концепция детектора

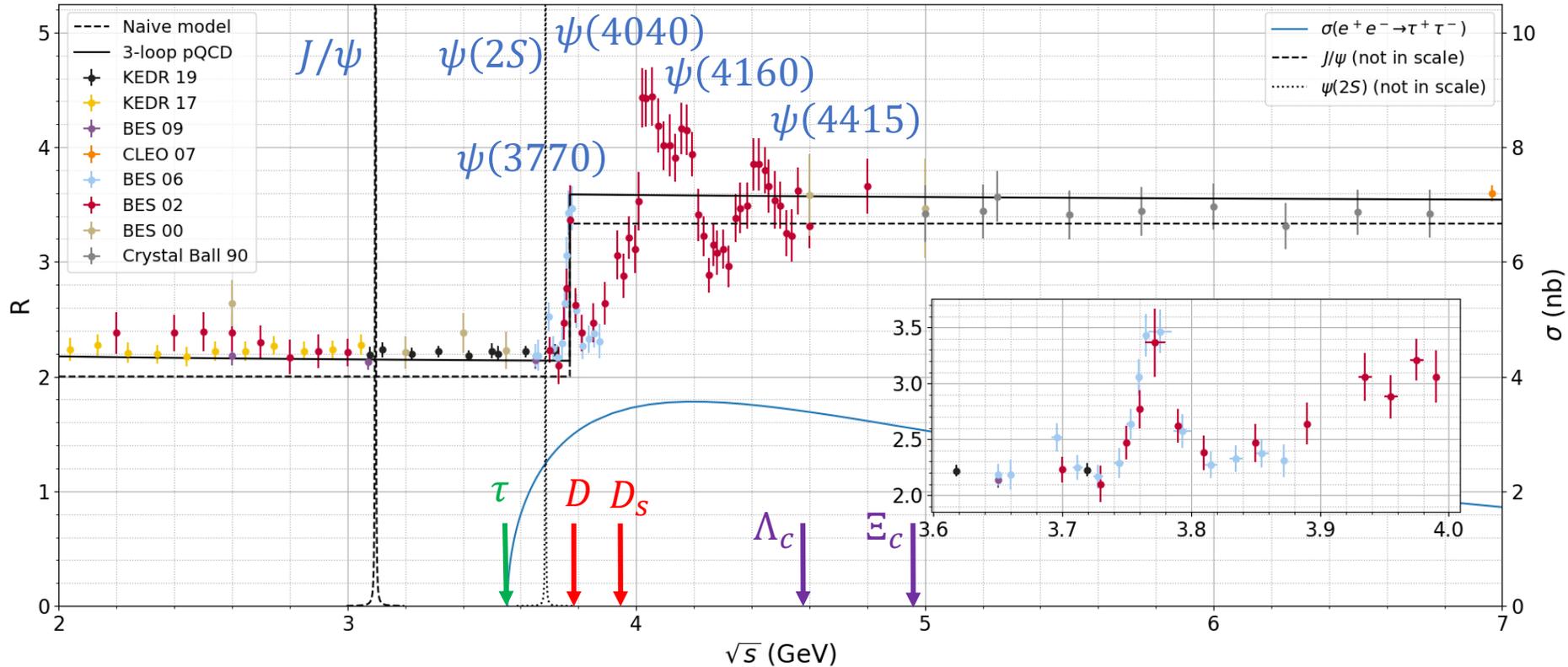
- Импульсное разрешение на уровне 0.5% @ 1 ГэВ
- Герметичность $\approx 95\%$ телесного угла
- Реконструкция треков, начиная с $p_t \approx 50$ МэВ
- Превосходное разделение $\mu/\pi/K/p$ до 1.5 ГэВ
 - dE/dx в трековой системе
 - Черенковское излучение
 - μ/π разделение!
- Хорошее π^0/γ разделение и регистрация γ в диапазоне энергий от 10 МэВ до 3000 МэВ
 - Хорошее энергетическое разрешение
 - Быстрый калориметр ($\sigma_t < 1$ нс)
- Сбор данных с частотой ~ 300 кГц @ J/ψ



Энергетический диапазон

Рождение нерелятивистских частиц на пороге обеспечивает возможность их детального изучения

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma_0(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$



$$\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

Сезон набора данных

$2E, \text{ ГэВ}$	Количество
3.1	$10^{12} J/\psi$
3.69	$10^{11} \psi(2S)$
3.77	$10^9 D\bar{D}$
4.17	$10^8 D_s\bar{D}_s$
$3.55 \div 4.3$	$10^{10} \tau\tau$
4.65	$10^8 \Lambda_c^+\Lambda_c^-$

Физическая программа

СЧТФ – эксперимент с широкой программой прецизионных измерений

ФАНУ России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени г.И. Бухарина
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯИ СО РАН)

Супер Чарм – Тау фабрика

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
"ЧАСТЬ ПЕРВАЯ"
(Физическая программа, детали)

Новосибирск - 2017

ctd.inp.nsk.su

- ✓ Измерение сильных фаз амплитуд распадов D -мезонов
- ✓ Измерение абсолютных вероятностей распадов
- ✓ Поиск редких распадов очарованного кварка
- ✓ CP -нарушение в чарме
- ✓ ...

Необходимо для изучения B мезонов на LHC***b* и Belle II**

charm

КХД



tau

- ✓ Физика возбужденного кваркония
- ✓ Молекулярные состояния
- ✓ Пороговые взаимодействия барионов
- ✓ Поиск глоболов в распадах J/ψ и ψ'
- ✓ ...

Проверка электрослабой модели

- ✓ Прецизионное измерение свойств τ лептона
- ✓ Параметры Мишеля, проверка лептонной универсальности
- ✓ Прецизионное измерение адронных распадов τ лептона
- ✓ Поиск нарушения CP и T симметрий в распадах τ
- ✓ ...

КХД, α_s , V_{us} . Проверка электрослабой модели, поиски нестандартных вкладов

Загрузка и объемы данных

Основные процессы			
	J/ψ	$\psi(2S)$	$\psi(3770)$
E (МэВ)	3097	3686	3770
σ (нбн)	1400	370	≈ 6
f (кГц)	110	34	0.6
Частота фоновых процессов (кГц)			
Космика	≈ 2		
Адронные события	19	17	16
Vhabha	90	80	80



Максимальная частота
триггера 300 кГц

	BESIII	СЧТФ	Belle II
Интеграл светимости (1/аб)	≈ 0.02	10	50
Число событий (10^{10})	≈ 4	200	10
Размер события (кБ)	12	50	300
Сырые данные (ПБ)		100	200
Обработанные данные (ПБ)		10	80

- Характерные параметры системы хранения и вычислительного кластера понятны
- Подобные системы существуют

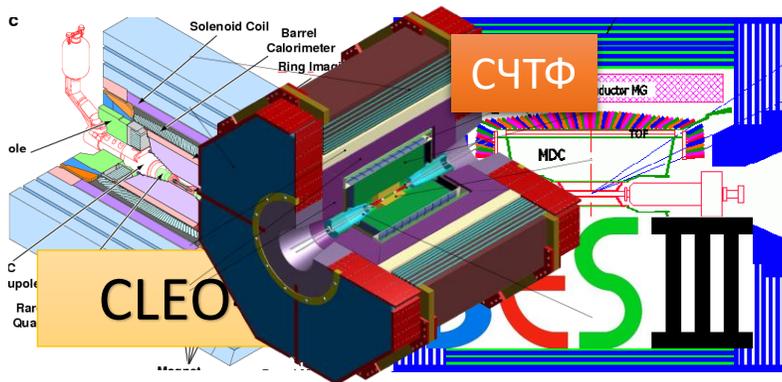
КОНТЕКСТ

Коллайдеры-фабрики

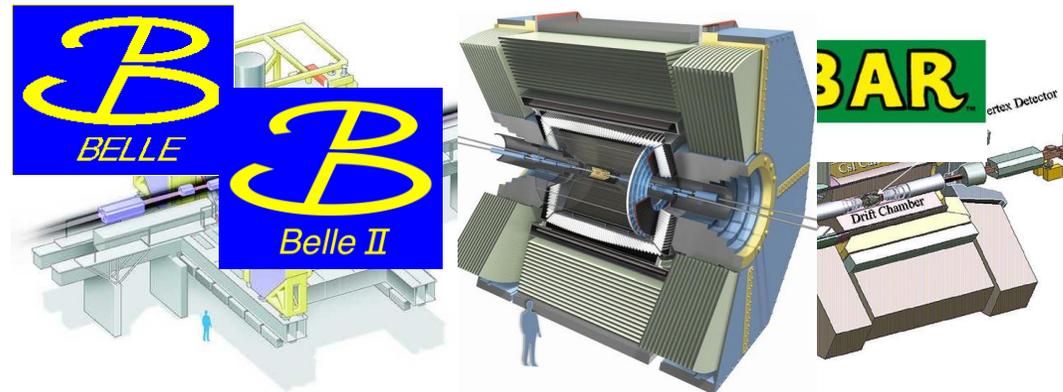


Эксперименты в области charm и tau

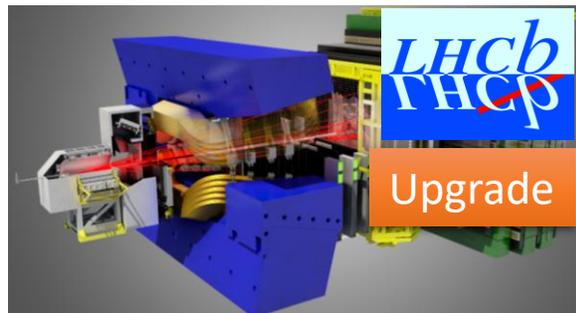
Пороговые



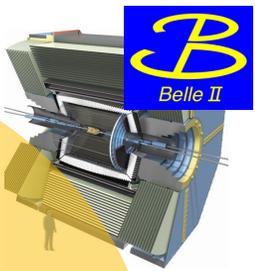
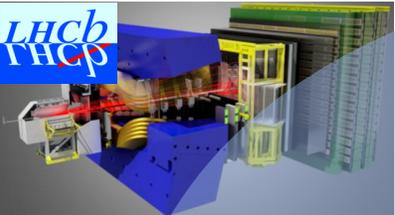
Асимметричные e^+e^- @ $\Upsilon(4S)$



Протонные
столкновения



Супер чарм-тау фабрика –
пороговый эксперимент нового
поколения



$$B^0 \rightarrow D^0 \pi^+ \pi^- \quad B^+ \rightarrow h_1^+ h_2^+ h_3^-$$

Только заряженные частицы
в конечном состоянии

B_s Λ_b $D^0 \rightarrow e\mu$ $\text{Время жизни и осцилляции } B^0$
 Ω_b $\text{СКМ } \gamma$

Σ_b $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ $\text{Время жизни и осцилляции } B_s^0$ φ_s

$$B^0 \rightarrow \mu\mu \quad \tau \rightarrow \mu\mu\mu$$

$$D^0 \rightarrow \mu\mu$$

Заряженный Хиггс

Ясный сигнал новой физики

Поиск темной материи

Ясный сигнал новой физики

Новые источники CPV

$D \rightarrow \text{невидимое}$

$$\tau \rightarrow \mu\gamma \quad \sin\theta_W$$

Когерентные $D^0 \bar{D}^0$

CPV в очарованных адронах

Нейтральные частицы
в конечном состоянии

Спектроскопия очарованных адронов

$$X(3872) \rightarrow J/\psi \pi\pi$$

Осцилляции D^0

CPV в $D^0 \rightarrow h^+ h^-$

$$B \rightarrow K^* l l$$

$$B \rightarrow D^* \tau \nu$$

Абсолютные вероятности распадов

Поляризованный пучок

$$J/\psi(c\bar{c}) \rightarrow W^+ s \quad J/\psi \rightarrow \text{адроны}$$

$$b \rightarrow s/d \gamma$$

СКМ α, β $b \rightarrow ulv$

время жизни τ

$$B \rightarrow K_S^0 \pi^0 \gamma$$

$$B \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$$

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

$$D \rightarrow l\nu$$

$\tau \rightarrow \text{адроны}$ V_{us}

$$\tau \rightarrow l\nu\nu$$

V_{ub}

V_{cb}

$$B \rightarrow D^0 \tau \nu$$

$\Upsilon(6S)$

$\Upsilon(5S)$

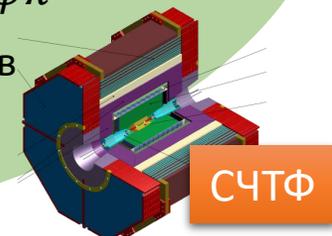
$$B \rightarrow h\nu\nu, \tau\nu$$

Заряженный Хиггс

Заряженный Хиггс

LFU

LFU



СЧТФ

Преимущества Супер чарм-тау фабрики

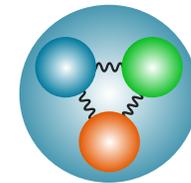
- Подход «предельной энергии» на LHC пока не позволил обнаружить новую физику
- Подход «предельной точности» становится все более актуальным: эксперименты на фабриках тяжелых кварков, эксперимент LHCb

Стратегические задачи

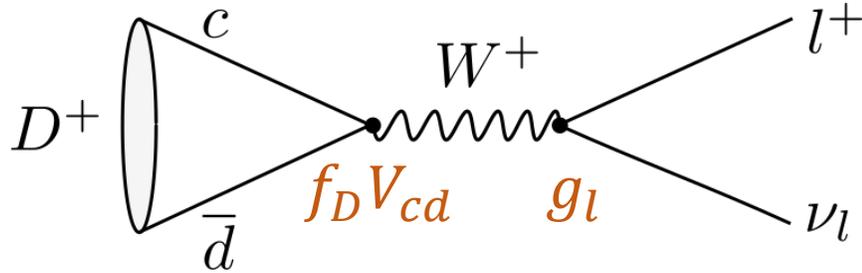
1. Поиск новой физики
2. Измерения в области непертурбативной квантовой хромодинамики (КХД)
3. Изучение электрослабого взаимодействия кварков первого и второго поколений и лептонов

1. Пороговое рождение пар τ лептонов и очарованных адронов
 - Хорошо определенное начальное состояние
 - Дополнительная кинематическая информация
2. Продольная поляризация электронов в месте встречи
 - CP нарушение в распадах очарованных барионов и τ лептонов
 - Измерение угла Вайнберга
3. Рождение когерентных пар $D^0\bar{D}^0$ мезонов
 - Осцилляции чарма и CP нарушение
 - Измерение фаз амплитуд распадов
4. Возможность полной реконструкции событий
 - Измерение абсолютных величин вероятностей распадов

Очарованные адроны



Лептонные распады $D_{(s)}$ мезонов



$$\Gamma(D^+ \rightarrow l\nu) = \frac{G_F^2}{8\pi} f_D^2 m_l^2 m_D \left(1 - \frac{m_l^2}{m_D^2}\right) |V_{cd}|^2$$

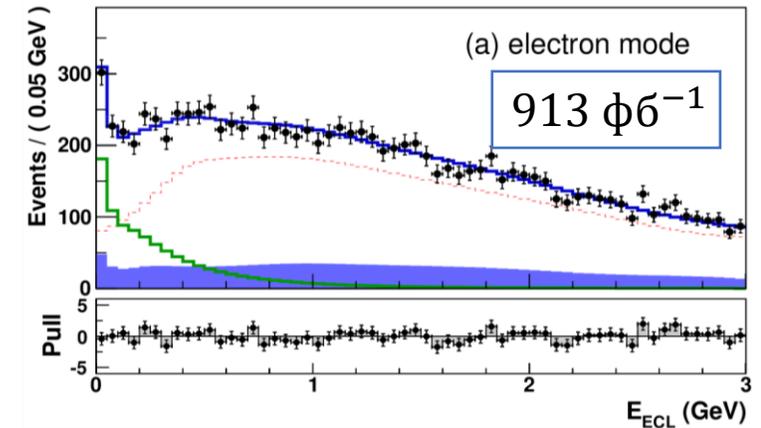
- Измерение бранчингов: f_D, V_{cd}, V_{cs}
- Проверка лептонной универсальности

Table 1: LFU test at BESIII with (semi)leptonic D decays.

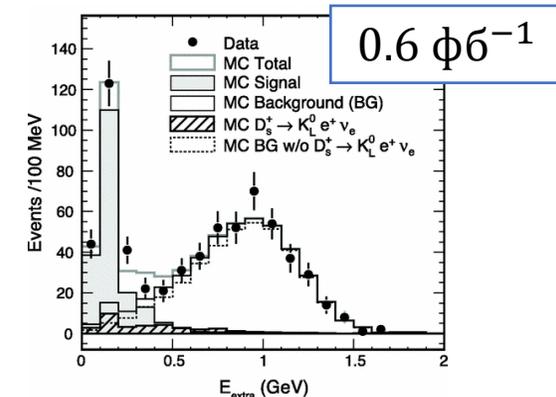
	$R(D_s^+)$	$R(D^+)$	$R(K^-)$	$R(\bar{K}^0)$	$R(\pi^-)$	$R(\pi^0)$
SM	9.74(1)	2.66(1)	0.975(1) [31]	0.975(1) [31]	0.985(2) [31]	0.985(2) [31]
BESIII	9.98(52)	3.21(64)	0.978(14)	0.988(33)	0.922(37)	0.964(45)

$$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu, \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$$

[Belle, JHEP 09 (2013), 139]



[CLEO-c, PRD 79 (2009), 052002]

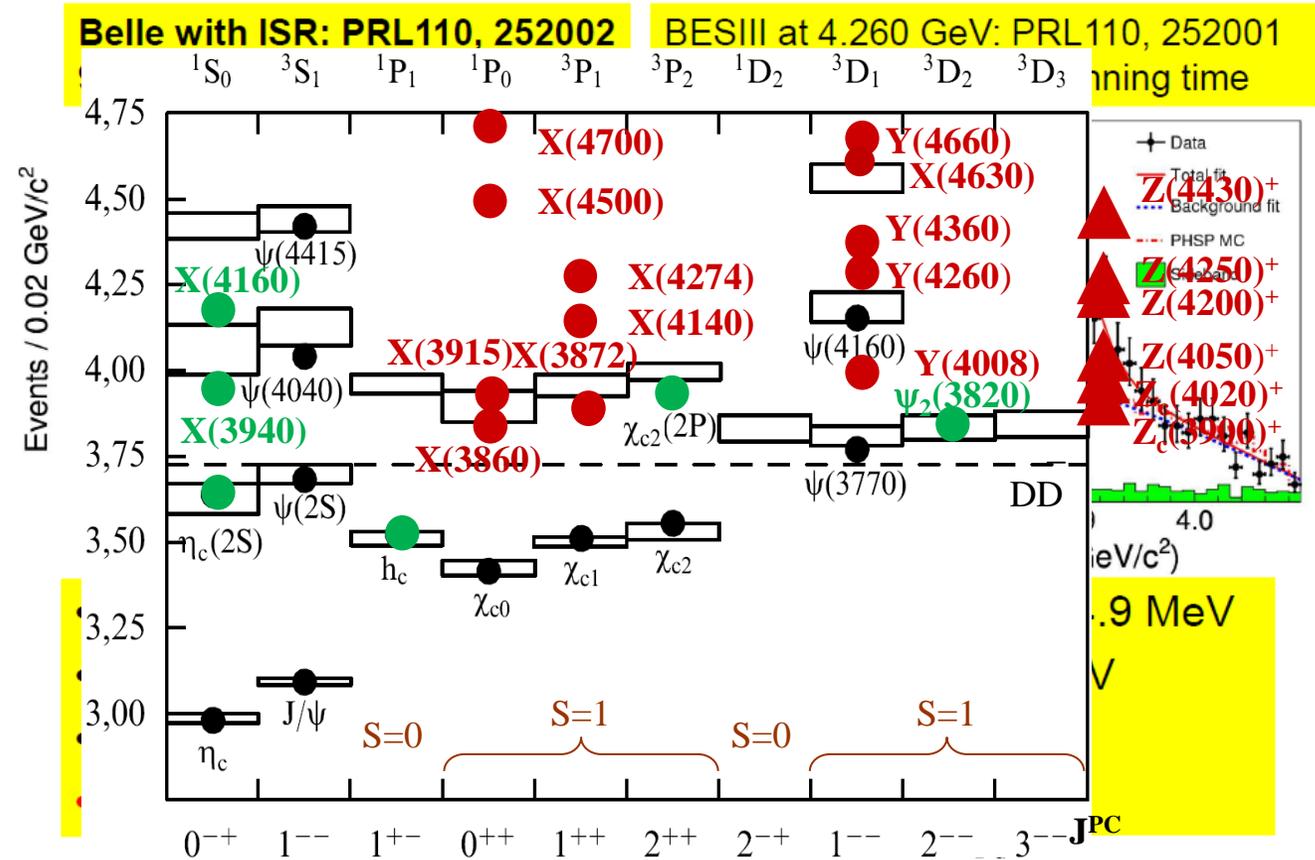
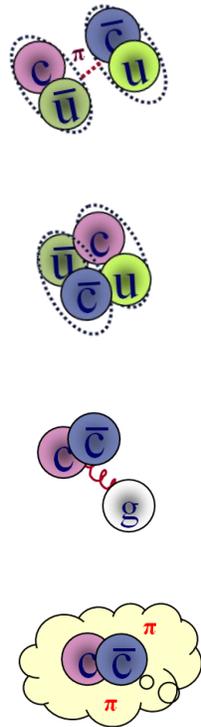


Состояния X, Y, Z

➤ Лаборатория для изучения явлений КХД

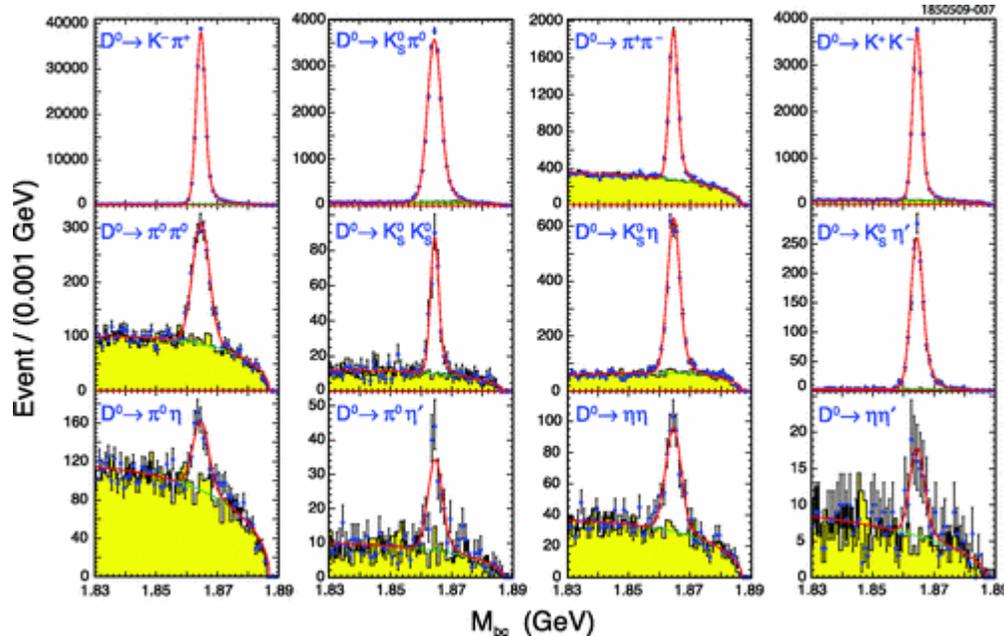
➤ Измерение сечений:

- $e^+e^- \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$
- $e^+e^- \rightarrow J/\psi\pi^0\pi^0$
- $e^+e^- \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-$
- $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}, D^*\bar{D}, \dots$
- $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}\gamma$
- $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(n\pi)$
- $e^+e^- \rightarrow D_s^+D_s^-$
- $e^+e^- \rightarrow D_s^+D_s^-(n\pi)$
- $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$
- ...

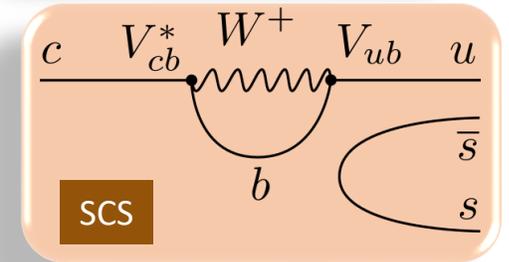
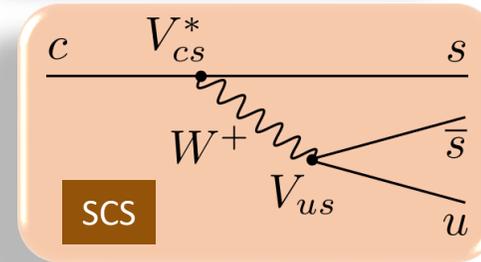
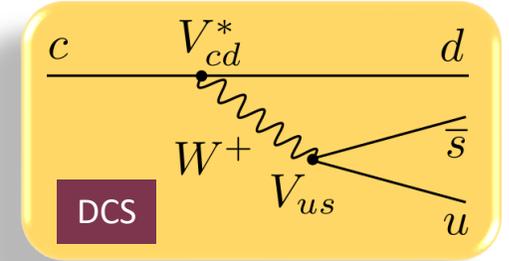
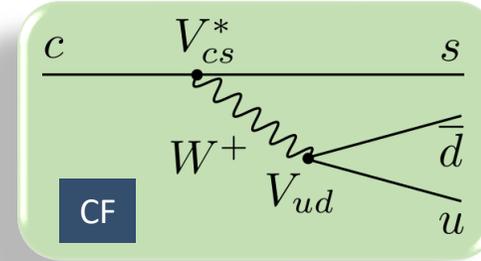


CP нарушение в D мезонах

- Всестороннее изучение CP нарушения в распадах D^0, D^+, D_s^+ мезонов на уровне точности $\sim 10^{-4}$
 - Преимущества полной реконструкции событий
 - Использование когерентных D^0



CLEOc 0.818 fb^{-1} @ 3774 MeV [PRD 81, 052013 (2010)]



$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

$$D^0 \rightarrow h^+ h^-$$



2019

long-distance dynamics is important in charm decays: re-scattering leads to the complex connections between the worlds of hadrons and quarks [I. Bigi] 16

Осцилляции D^0 мезонов

Изучение осцилляций D^0 с использованием различий когерентных и некогерентных распадов

- CLEO-c [1]: 0.82 фб^{-1} @ $\psi(3770)$, совместный анализ 261 процессов
 - $y = (4.2 \pm 2.0 \pm 1.0)\%$
 - $R_D = (0.533 \pm 0.107 \pm 0.045)\%$
 - $\cos \delta_{K\pi} = +0.81 \pm 0.22 \pm 0.07$
 - $\sin \delta_{K\pi} = -0.01 \pm 0.41 \pm 0.04$

[1] Phys. Rev. D86 (2012) 112001

$$C = -1$$

$$\Gamma(i, j) \propto |\langle i|D_2\rangle\langle j|D_1\rangle - \langle i|D_1\rangle\langle j|D_2\rangle|^2 + \mathcal{O}(x^2, y^2)$$

TABLE III. D final states reconstructed in this analysis. [1]

Type	Reconstruction	Final states
f	Full	$K^- \pi^+, Y_0 - Y_7$
\bar{f}	Full	$K^+ \pi^-, \bar{Y}_0 - \bar{Y}_7$
S_+	Full	$K^+ K^-, \pi^+ \pi^-, K_S^0 \pi^0 \pi^0$
S_+	Partial	$K_L^0 \pi^0, K_L^0 \eta, K_L^0 \omega$
S_-	Full	$K_S^0 \pi^0, K_S^0 \eta, K_S^0 \omega$
S_-	Partial	$K_L^0 \pi^0 \pi^0$
ℓ^+	Partial	$K^- e^+ \nu_e, K^- \mu^+ \nu_\mu$
ℓ^-	Partial	$K^+ e^- \bar{\nu}_e, K^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$

Модельно-независимый Далиц-анализ

Изучение осцилляций D^0 с распадом $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$

$$e^+ e^- \rightarrow \psi(4040) \rightarrow D \bar{D}^*$$

- Когерентные $\mathcal{C} = -1$: $D^0 \bar{D}^{*0} \rightarrow D^0 \bar{D}^0 \pi^0$

$$M_{ij}^- = K_i K_{-j} + K_{-i} K_j - 2 \sqrt{K_i K_{-j} K_{-i} K_j} (C_i C_j + S_i S_j)$$

- Когерентные $\mathcal{C} = +1$: $D^0 \bar{D}^{*0} \rightarrow D^0 \bar{D}^0 \gamma$

$$M_{ij}^+ = K_i K_{-j} + K_{-i} K_j - 2 \sqrt{K_i K_{-j} K_{-i} K_j} (C_i C_j + S_i S_j) + 2K_j \sqrt{K_i K_{-i}} (yC_i - xS_i) + 2K_{-j} \sqrt{K_i K_{-i}} (yC_i + xS_i) + 2K_i \sqrt{K_j K_{-j}} (yC_j - xS_j) + 2K_{-i} \sqrt{K_j K_{-j}} (yC_j + xS_j)$$

- Некогерентные $D^- D^{*+} \rightarrow D^- D^0 \pi^+$

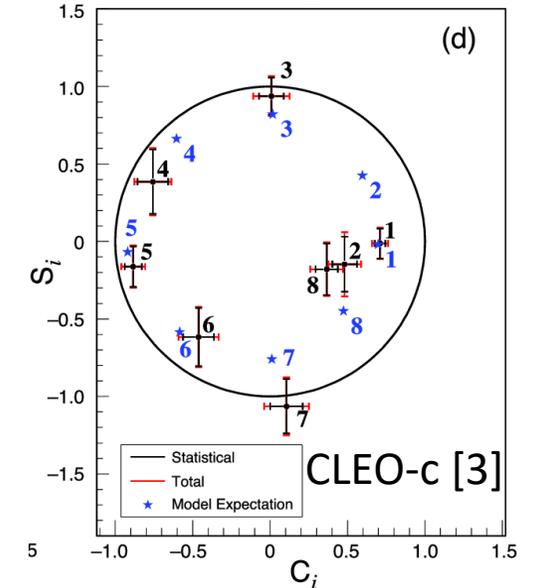
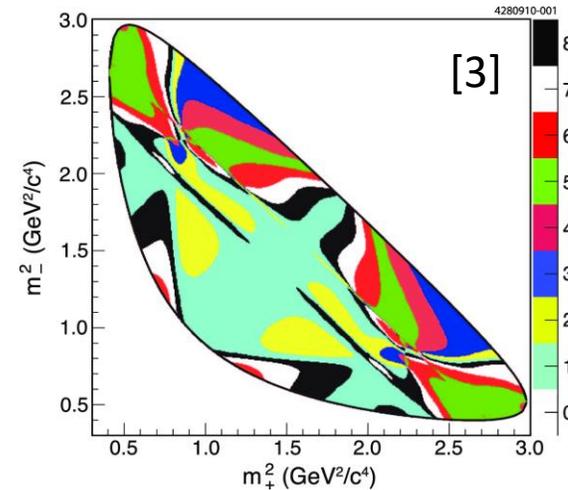
$$K_i' = K_i + \sqrt{K_i K_{-i}} (yC_i + xS_i)$$

[1] Phys. Rev. D68, 054018 (2003)

[2] Phys. Rev. D82, 034033 (2010)

[3] Phys. Rev. D82, 112006 (2010)

[4] JHEP 04 (2016) 033



$$Z_i = \frac{\int_{D_i} \mathcal{A}_D^* \mathcal{A}_{\bar{D}} dm_+^2 dm_-^2}{\sqrt{\int_{D_i} |\mathcal{A}_D|^2 dm_+^2 dm_-^2 \cdot \int_{D_i} |\mathcal{A}_{\bar{D}}|^2 dm_+^2 dm_-^2}}$$

$$C_i = \text{Re } Z_i, \quad S_i = \text{Im } Z_i$$

Модельно-независимый Далиц-анализ

Изучение осцилляций D^0 с распадом $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$

- Эволюция бинированных распределений Далица: [1,2]

$$\mathcal{P}_D(t, i) \propto e^{-\Gamma t} [K_i - \Gamma t \sqrt{K_i K_{-i}} (C_i y + S_i x)]$$

$$\mathcal{P}_{\bar{D}}(t, i) \propto e^{-\Gamma t} [K_{-i} - \Gamma t \sqrt{K_i K_{-i}} (C_i y - S_i x)]$$

- C_i и S_i измеряются на пороге [3]
- x и y – параметры осцилляций

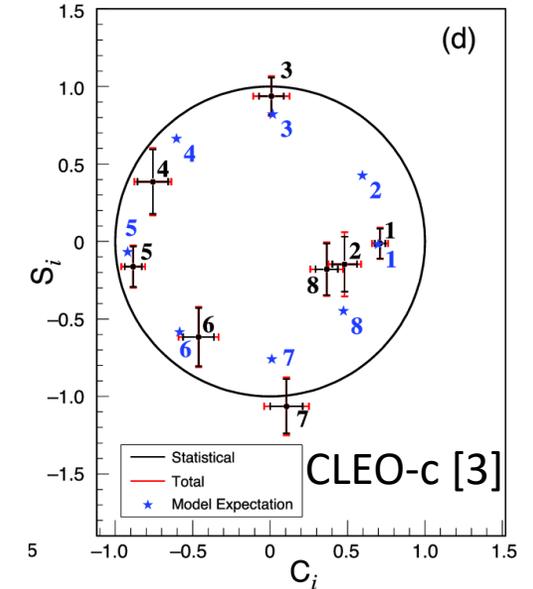
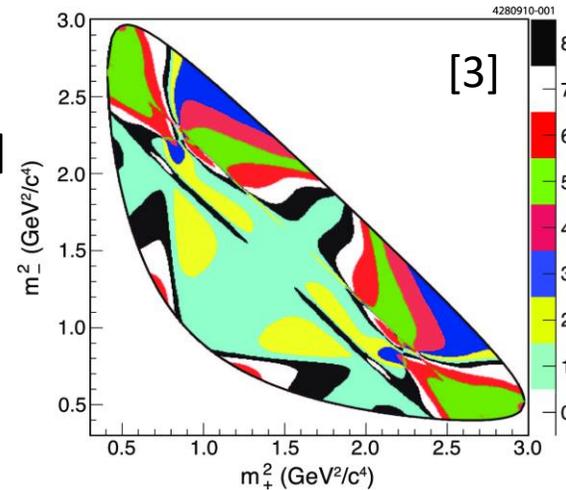
- LHCb [4]: 1.0 fb^{-1} @ 7 TeV , $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$, $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$

$$x = (-0.86 \pm 0.53 \pm 0.17)\%$$

$$y = (+0.03 \pm 0.46 \pm 0.13)\%$$



- [1] Phys. Rev. D68, 054018 (2003)
- [2] Phys. Rev. D82, 034033 (2010)
- [3] Phys. Rev. D82, 112006 (2010)
- [4] JHEP 04 (2016) 033



$$Z_i = \frac{\int_{D_i} \mathcal{A}_D^* \mathcal{A}_{\bar{D}} dm_+^2 dm_-^2}{\sqrt{\int_{D_i} |\mathcal{A}_D|^2 dm_+^2 dm_-^2 \cdot \int_{D_i} |\mathcal{A}_{\bar{D}}|^2 dm_+^2 dm_-^2}}$$

$$C_i = \text{Re } Z_i, \quad S_i = \text{Im } Z_i$$

Тау лептон



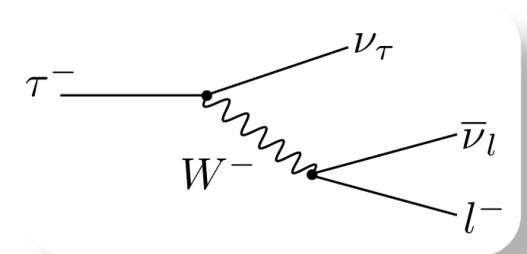
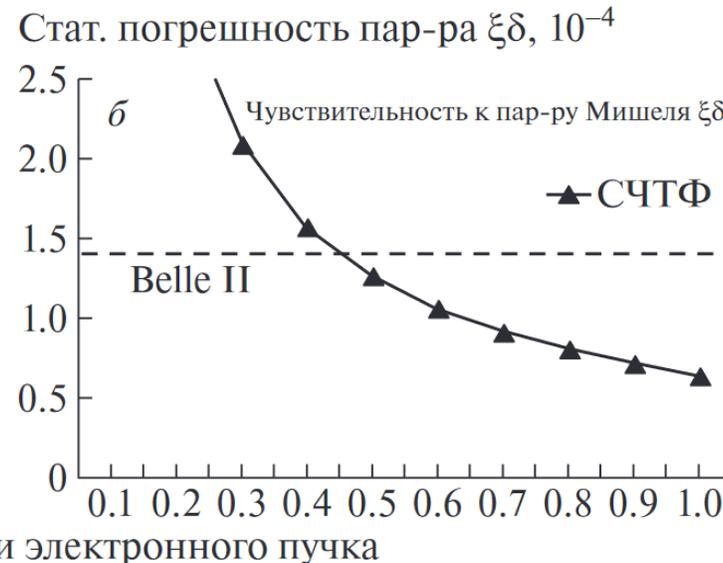
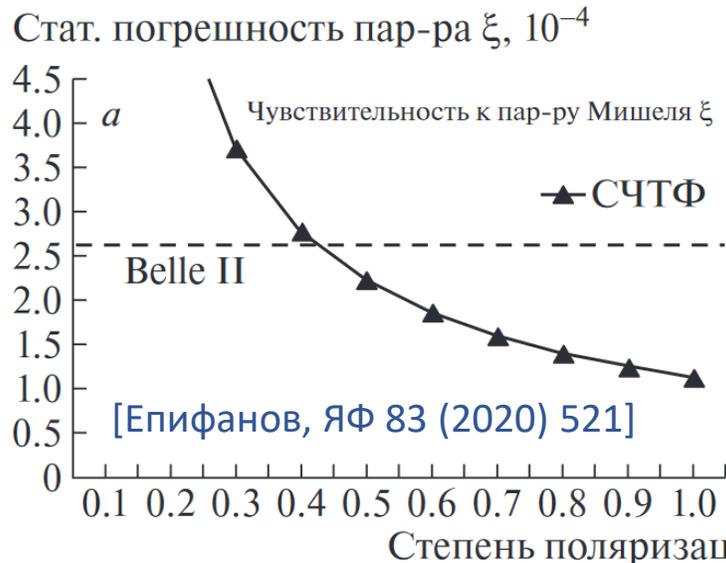
Лептонные распады τ

Параметры Мишеля

$$\frac{d\Gamma(\tau^\mp)}{d\Omega dx} \propto x(1-x) + \frac{2}{9}\rho(4x^2 - 3x - x_0^2) + \eta x_0(1-x) \mp \frac{1}{3}P_\tau \cos\theta_l \xi \sqrt{x^2 - x_0^2} \left[1 - x + \frac{2}{3}\delta \left(4x - 4 + \sqrt{1 - x_0^2} \right) \right]$$

- На СЧТФ с поляризованными e^- параметры Мишеля могут быть измерены с большей точностью, чем в эксперименте Belle II

$$x \equiv \frac{E_l}{E_{\max}}, \quad x_0 \equiv \frac{m_l}{E_{\max}}$$



Лептонные распады τ

Параметры Мишеля

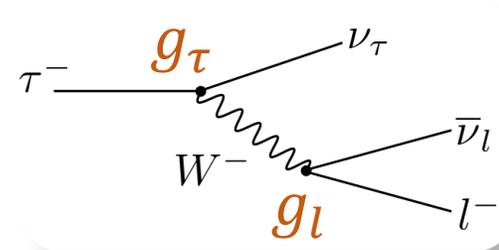
$$\frac{d\Gamma(\tau^\mp)}{d\Omega dx} \propto x(1-x) + \frac{2}{9}\rho(4x^2 - 3x - x_0^2) + \eta x_0(1-x) \mp \frac{1}{3}P_\tau \cos\theta_l \xi \sqrt{x^2 - x_0^2} \left[1 - x + \frac{2}{3}\delta \left(4x - 4 + \sqrt{1 - x_0^2} \right) \right]$$

- На СЧТФ с поляризованными e^- параметры Мишеля могут быть измерены с большей точностью, чем в эксперименте Belle II

$$x \equiv \frac{E_l}{E_{\max}}, \quad x_0 \equiv \frac{m_l}{E_{\max}}$$

Проверка лептонной универсальности

$$\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau l^- \bar{\nu}_l) = \frac{G_\tau G_l m_\tau^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_l^2}{m_\tau^2}\right) r_{EW}$$



Параметр	Расчет	Лучшее измерение
$\frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e)}$	0.972564 ± 0.000010	$0.9796 \pm 0.0016 \pm 0.0036$ [BaBar, PRL 105 (2010) 051602]

Адронные распады τ

Спектральные функции

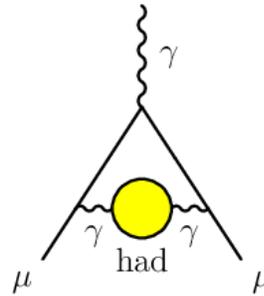
$$\frac{d\Gamma(\tau^- \rightarrow \text{had } \nu_\tau)}{d(\text{phsp})} = \frac{G_F^2}{4m_\tau} |V_{CKM}|^2 L_{\mu\nu} H^{\mu\nu}$$

- Факторизация адронного и лептонного токов
- Измерение $|V_{ud}|$, $|V_{us}|$, $\alpha_s(m_\tau)$ и m_s
- Проверка сохранения векторного тока
- Информация об адронной поляризации вакуума в непертурбативной области

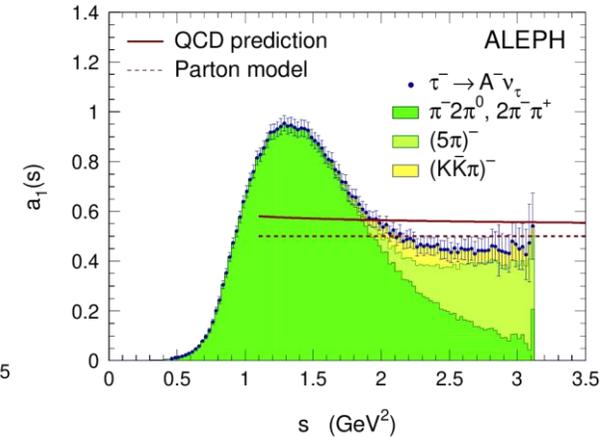
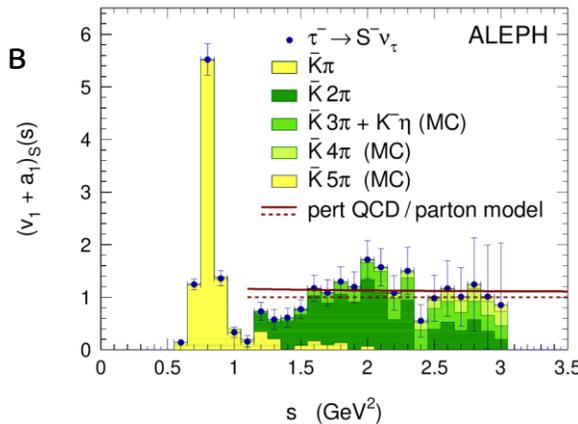
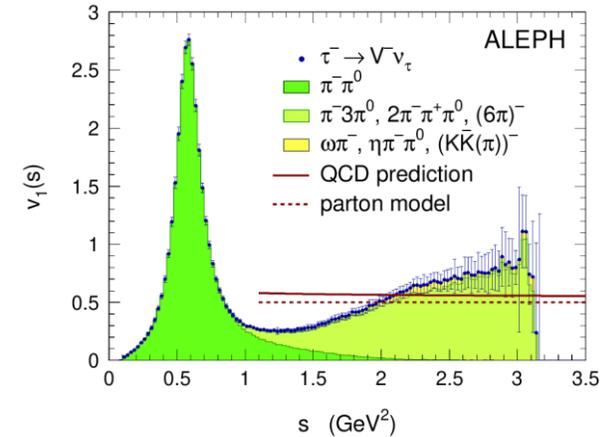
Токи второго класса

$$J^{PG} = 0^{+-} (a_0), 1^{++} (b_1), \dots$$

- Подавлены по изотопической четности ($\tau \rightarrow \eta^{(\prime)} \pi \nu$, ...)



[Rev. Mod. Phys. 78 (2006) 1043]



LFV и CP нарушение с тау лептоном

$$\tau \rightarrow \mu \gamma$$

- Разрешен в разных сценариях новой физики (суперсимметрия, лептокварки, technicolor, дополнительные бозоны Хиггса, ...)
- $\mathcal{O}(10^{-9})$ – ожидаемый предел на бранчинг $\tau \rightarrow \mu \gamma$.

CP нарушение

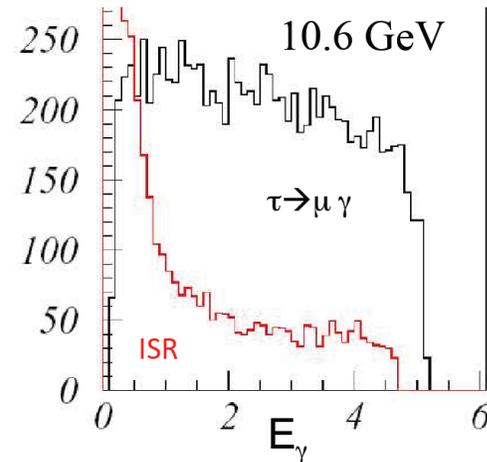
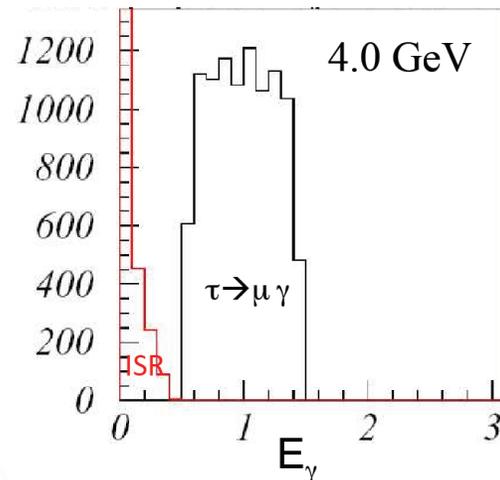
- CP нарушение в рождении тау

$$J_{EM} \propto F_1 \gamma^\mu + \left(\frac{i}{2m_\tau} F_2 + \gamma^5 F_3 \right) \sigma^{\mu\nu} q_\nu$$

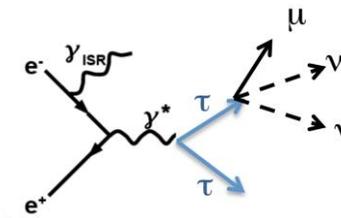
- Текущее ограничение: $|d_\tau| \lesssim 10^{-17} e \cdot \text{см}$
- EDM тау с поляризованными электронами [PRD 51 (1995) 5996]: $\sigma(d_\tau) \sim 10^{-20} e \cdot \text{см}$

- CP нарушение в распадах тау (например, $\tau \rightarrow K \pi \nu_\tau$)

Фон от ISR фотона [arXiv:1206.1909 [hep-ex]]



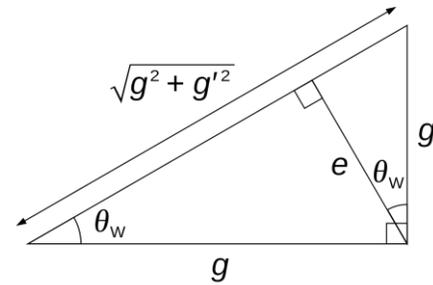
Измерения с поляризованным пучком электронов!



Electroweak model $SU(2)_L \times U(1)_Y$ (Glashow, 1961)

$$A_\mu = B_\mu^0 \cos \theta_W + W_\mu^0 \sin \theta_W$$

$$Z_\mu = W_\mu^0 \cos \theta_W - B_\mu^0 \sin \theta_W$$



Угол Вайнберга

Асимметрия сечения в пике J/ψ

- Интерференция между процессами $e^+e^- \rightarrow \gamma^*, Z \rightarrow J/\psi$ создает асимметрию сечения

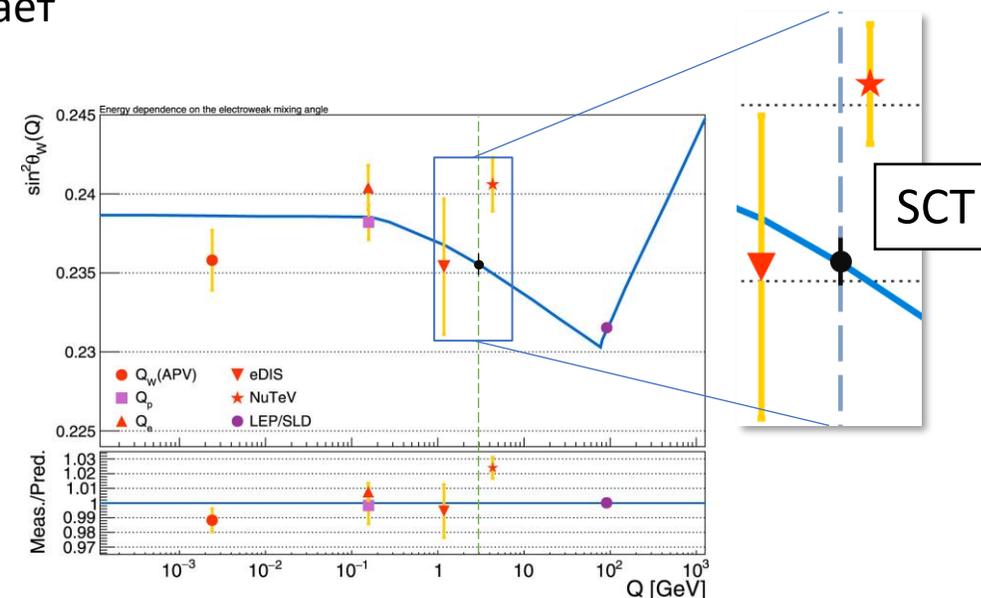
$$A_{LR} \equiv \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-} = \frac{3/8 - \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c}{2 \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c (1 - \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c)} \left(\frac{m_{J/\psi}}{m_Z} \right)^2 P_e$$

$$A_{LR} \approx 4.7 \times 10^{-4} P_e$$

- σ_+ (σ_-) – сечение $e^+e^- \rightarrow J/\psi$ при правой (левой) поляризации электронов
- P_e – средняя поляризация электронов, $P_e < 1$
- Достижимая статистическая точность за один сезон

$$\frac{\sigma(\sin^2 \theta_{\text{eff}}^c)}{\sin^2 \theta_{\text{eff}}^c} \approx 0.3\%, \quad \sigma(\sin^2 \theta_{\text{eff}}^c) \approx 5 \times 10^{-4}$$

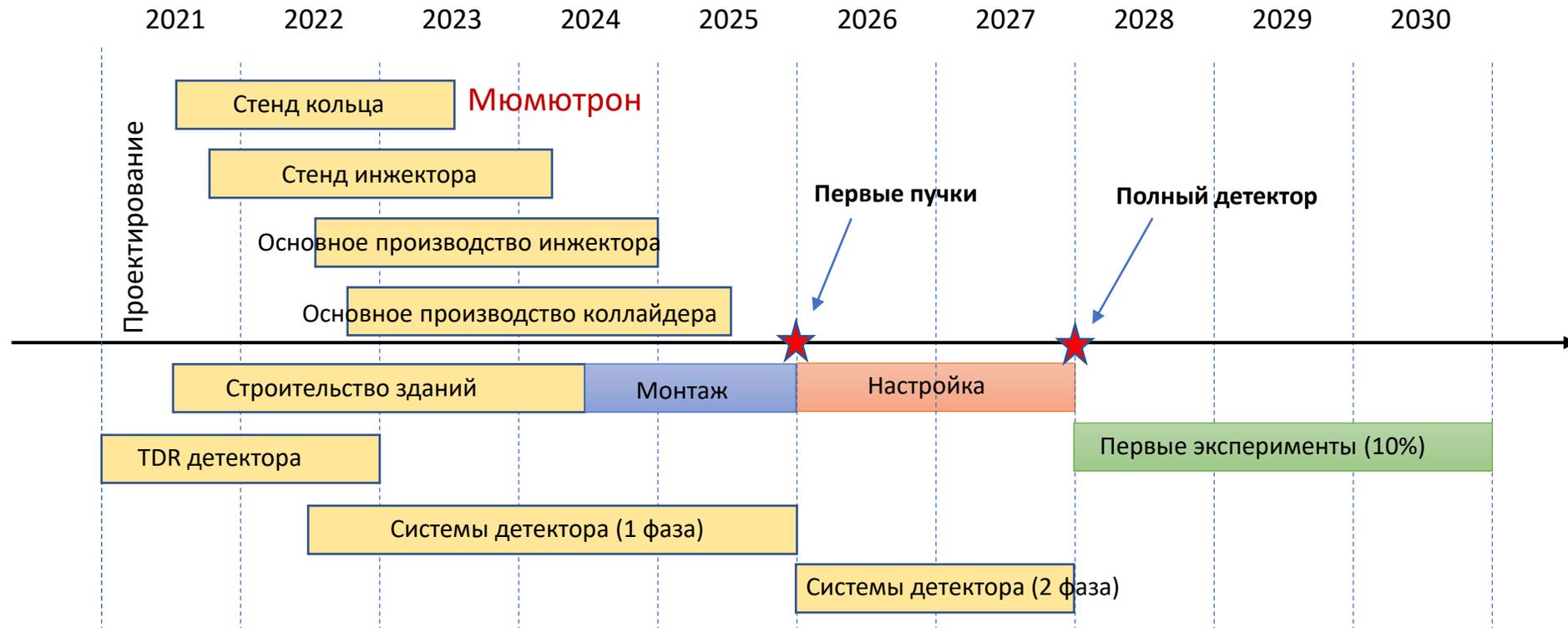
- Проверка электрослабого взаимодействия очарованного кварка
- Наблюдение отличия $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^c$ от его значения в пике Z (проверка электрослабой модели)



Статус проекта

- 2011 год: проект СЧТФ вошел в число шести проектов класса мегасайенс, выбранных правительственной комиссией для реализации на территории России.
- С 2017 года – сформирован IAC, проводятся регулярные международные совещания
- 2018 год – обновленный концептуальный проект (продолжает развиваться)
- 2020 год – грант Еврокомиссии CREMLIN+, поддержка участия европейских групп в развитии проекта
- 2020 год – включение СЧТФ в проект Большой Саров
- 2021 год – решение о старте проекта?

План-график



На пути к международной
коллаборации



Международные совещания

- 2017.12, Новосибирск ([link](#))
- 2018.03, Пекин ([link](#))
- 2018.05, Новосибирск ([link](#))
- 2018.12, Орсе ([link](#))
- 2019.09, Москва ([link](#))
- 2020.11, Хефей (online, [link](#))

Комитет советников

- Сформирован международный комитет советников (13 человек, Италия, CERN, США, Россия, Китай, Испания, Германия, Мексика, Польша)

Рабочие группы

- Внутренний трекер
- Дрейфовая камера
- Система идентификации частиц
- Калориметр
- Мюонная система
- Сверхпроводящая катушка и ярмо
- Физическая программа
- Компьютинг
- Система сбора данных и триггер
- Пучковый фон





Евростратегия

- В 2020 году состоялось обновление Европейской стратегии по физике элементарных частиц
- Заинтересованность в СЧТФ отражена в Physics Briefing book: [arXiv:1910.11775](https://arxiv.org/abs/1910.11775) [hep-ex]

Precision experiments at electron-positron collider Super Charm-Tau Factory

A contribution to the Update of the European Strategy for Particle Physics

Budker INF, Novosibirsk



Precision experiments at Super Charm-Tau Factory Letter of Interest for Snowmass 2021

M.N. Arshav,¹ E.M. Baldin,¹ V.E. Blinov,¹ A.V. Bobrov,¹ A.V. Bozsmangolov,¹ A.E. Bondar,¹ A.F. Buzulutskov,¹ V.L. Chernysk,¹ V.F. Dmitriev,¹ V.P. Druzhinin,¹ A. Garmosh,¹ S.I. Eidelman,¹ D.A. Epifanov,¹ A.G. Kharlamov,¹ I.A. Koop,¹ E.A. Kozirev,¹ E.A. Kravchenko,¹ P. Krokoryn,¹ I.B. Logashenko,¹ P.A. Lukin,¹ D.V. Matvienko,¹ D.A. Maximov,¹ G.P. Buzanov,¹ Yu.A. Rogovskiy,¹ A.A. Tikhonov,¹ A.S. Rudenko,¹ L. Shakhmatov,¹ D. Shwarts,¹ B.A. Shwarts,¹ A.V. Sokolov,¹ A.M. Sukharov,¹ V.I. Tikhov,¹ V.S. Vorobyov,¹ V. Zhilich,¹ R.R. Akhmetshin,² M.Yu. Baryakov,² V.S. Bobrovnikov,² A.G. Bogdanichikov,² A.R. Buzyaev,² V.L. Dorokhov,² F. Ignatov,² V.R. Groshev,² T.A. Kharlamova,² V.A. Kislev,² A.N. Kozirev,² V.M. Malyshov,² A.L. Maslennikov,² O.I. Meshkov,² K.Yu. Mikhailov,² S.A. Nikitin,² A.A. Osipov,² S.V. Pologatskiy,² P.A. Puzinov,² S.I. Seredinskiy,² T.M. Shakhinov,² D.N. Shatilov,² Yu.M. Shatunov,² D.A. Shest,² A. Skrinitskiy,² E.P. Sokolov,² Yu.A. Tikhonov,² Yu.V. Yudin,² A.Yu. Baryakov,² N.N. Arshav,³ A.A. Dzuyba,³ E.E. Boos,⁴ M. Merkin,⁵ Y. Kuzenko,⁵ A.V. Nefediev,⁵ T. Ugllov,⁵ E. Sokolova,⁵ V.I. Raebichikov,⁵ O.V. Bakina,⁶ I.R. Boyko,⁶ A. Gushin,⁶ Yu.A. Nefedov,⁶ A. Znamenskaya,⁶ M. Finger,⁷ M. Finger Jr.,⁷ M. Volt,⁸ C.Z. Yuan,⁸ J. Ritman,⁹ M. Dusen,⁹ A. Hayrapetyan,¹⁰ F. Khalid,¹⁰ M. Schmidt,¹⁰ A. Denig,¹⁰ S.A. Wolf,¹⁰ M. Traxler,¹¹ I. Schmitt,¹¹ C. Schwarz,¹² F. Nerling,¹² K. Gandhi,¹² G. Venanzoni,¹² A. Lusiani,¹² M.E. Biagini,¹² M. Bacci,¹³ B. Cao,¹³ E. De Lucia,¹³ C. Milardi,¹³ B. Spataro,¹³ S. Tomassini,¹³ M. Zobov,¹⁴ N. De Filippo,¹⁴ Sh. Bhanushvili,¹⁴ M. Migliorini,¹⁴ F. Anelli,¹⁵ G. Mandaglio,¹⁵ G. Chinetti,¹⁶ I. Garcia,¹⁶ P. Roig,¹⁶ A. Kupsc,¹⁶ P. Fernandez Declara,¹⁶ A. Salfer,¹⁶ S. Nishida,¹⁷ A. Gajda,¹⁷ A.O. Poluektov,¹⁷ O.B. Malyshev,¹⁷ V. Smaluk,¹⁷ and K. Azizi¹⁸

¹Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia
²Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 630090, Russia
³Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 630090, Russia
⁴Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630092, Russia
⁵Siberian Institute of Mathematics, Novosibirsk, 630090, Russia
⁶Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute", Leningradskaya skaya, Gatchina, 188200, Russia
⁷M.V. Lomonosov Moscow State University
⁸Siberian Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), (IE), Leningradskaya gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation
⁹Institute for Nuclear Research, Moscow, 117218, Russia
¹⁰Leibniz Physics Institute of BAS, Moscow, 119991, Russia
¹¹National Research Nuclear University, 115191, Russia
¹²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia
¹³Charles University, Faculty of Mathematics, 18000 Prague, Czech Republic
¹⁴Department of Power System Engineering, University of West Bohemia, Plzeň 301 00, Czech Republic
¹⁵Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
¹⁶Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany
¹⁷II. Physical Institute, Justus Liebig University, 35392 Giessen, Germany
¹⁸Institute for Nuclear Physics, Johannes Gutenberg-University, 55099 Mainz, Germany
¹⁹GSI Helmholtzcentre for Heavy Ion Research GmbH, 64291 Darmstadt, Germany
²⁰GSI Helmholtzcentre GmbH, 64291 Darmstadt, Germany
²¹Goethe University Frankfurt, 60321 Frankfurt am Main, Germany
²²GSI Helmholtzcentre for Heavy Ion Research GmbH, 64291 Darmstadt, Germany
²³Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat 395007, Gujarat, India

Snowmass2021

- Письмо об СЧТФ в Snowmass 2021 (процесс стратегического планирования в области физики частиц в США и в мире)
- 38 организаций, 10 из РФ
- Задача 2021 года: подготовка white papers

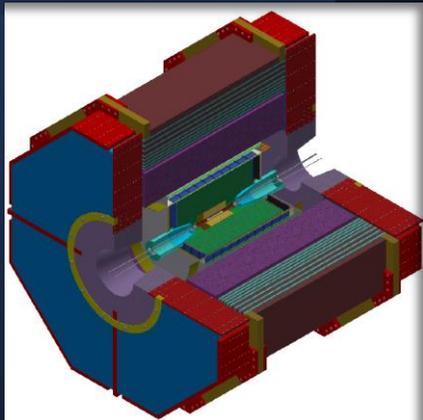


CREMLINplus



- Грант Европейской Комиссии
- Сроки: с 2020 по 2024 годы
- Рабочий пакет 5 посвящен СЧТФ
 - Интернационализация проекта
 - Прототипирование элементов коллайдера
 - **Разработка ПО для детектора**
 - **Прототипирование подсистем детектора**
- Партнеры ИЯФ в рамках проекта:
 1. CERN
 2. INFN (Ferrara, Bari, Lecce, Frascati)
 3. IJCLab (Orsay)
 4. JLU (Giessen)

R&D для подсистем детектора



- Внутренний трекер
 - Время-проекционная камера (TPC) – ИЯФ СО РАН
 - Цилиндрический микро-структурный газовый детектор (CMPGD) – INFN (LNF, Ferrara)
- Основная трековая система
 - Дрейфовая камера (DC) – ИЯФ СО РАН
 - Ультратонкая ДК (TraPID) – INFN (Lecce, Bari)
- Система идентификации (PID)
 - ФАРИЧ – ИЯФ СО РАН
 - FDIRC – Giessen Univ.
- Электромагнитный калориметр (EMC) – ИЯФ СО РАН
- Мюонная система – ФИАН
- Магнитная система – ИЯФ СО РАН

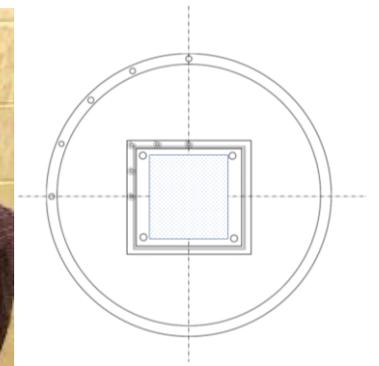
ТРС как внутренний трекер

Элементы первого прототипа

- Рассчитано распределение полей
- Подготовлены чертежи торцов и считывающей структуры
- Подготовлен концептуальный проект считывающей электроники

Планы на 2021 год:

- Разработать считывающую плату
- Подготовить тех. проект прототипа
- Собрать прототип



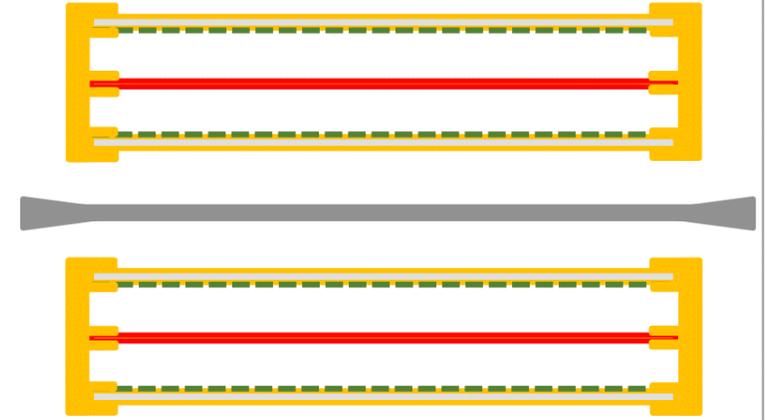
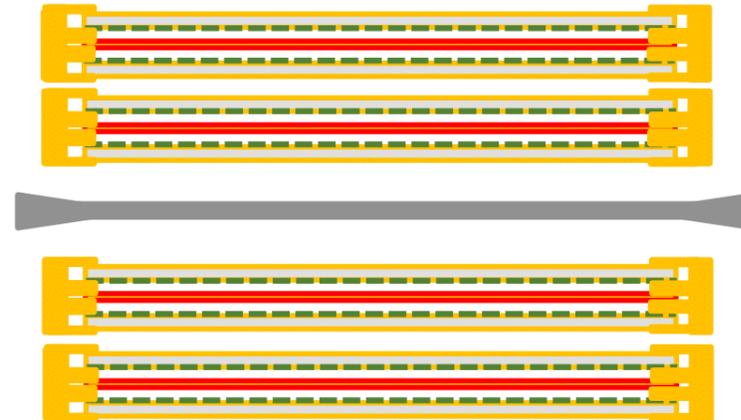
Внутренний детектор – опция CMPGD (INFN – Ferrara, Frascati)

preliminary

- N. 4 independent C+layers \rightarrow 1.9÷2.5% X0
- 1 cm gas gap/layer
- 4 cm global sampling gas

- N.2 small gap B2B C+layers \rightarrow 1.5÷1.9% X0
- 2 × 1 cm gas gap/B2B device
- 4 cm global sampling gas

- N.1 large gap B2B C+layers \rightarrow 0.75÷0.95% X0
- 2 × 5 cm gas gap/B2B device
- 10 cm global sampling gas



Operation of large gas gap radial TPC to be verified

Material budget estimated taking into account different material choices for the mechanics, cathode and faraday cage.

All these layouts require the design, construction and test of a C+RWELL prototype.

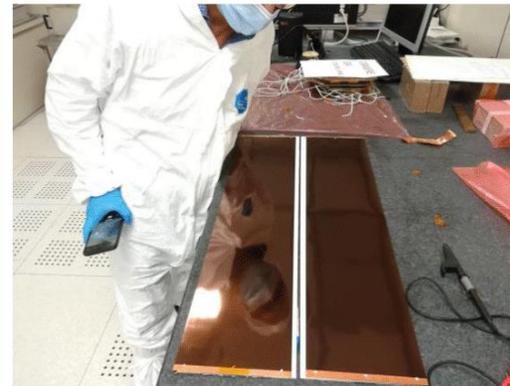
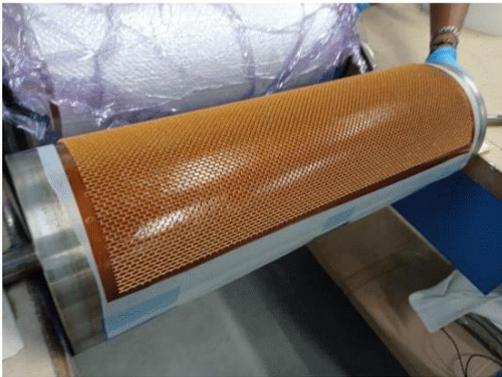
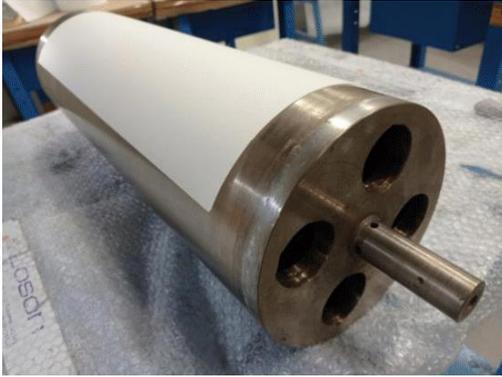
The prototype under discussion is based on the innovative concept of the **modular roof-tile shaped detector**.

A Radial Time Projection Chamber for α detection in CLAS at Jlab, R. Dupré et al., 10.1016/j.nima.2018.04.052

Roof tile & detector mock-up tests



work done at LOSON



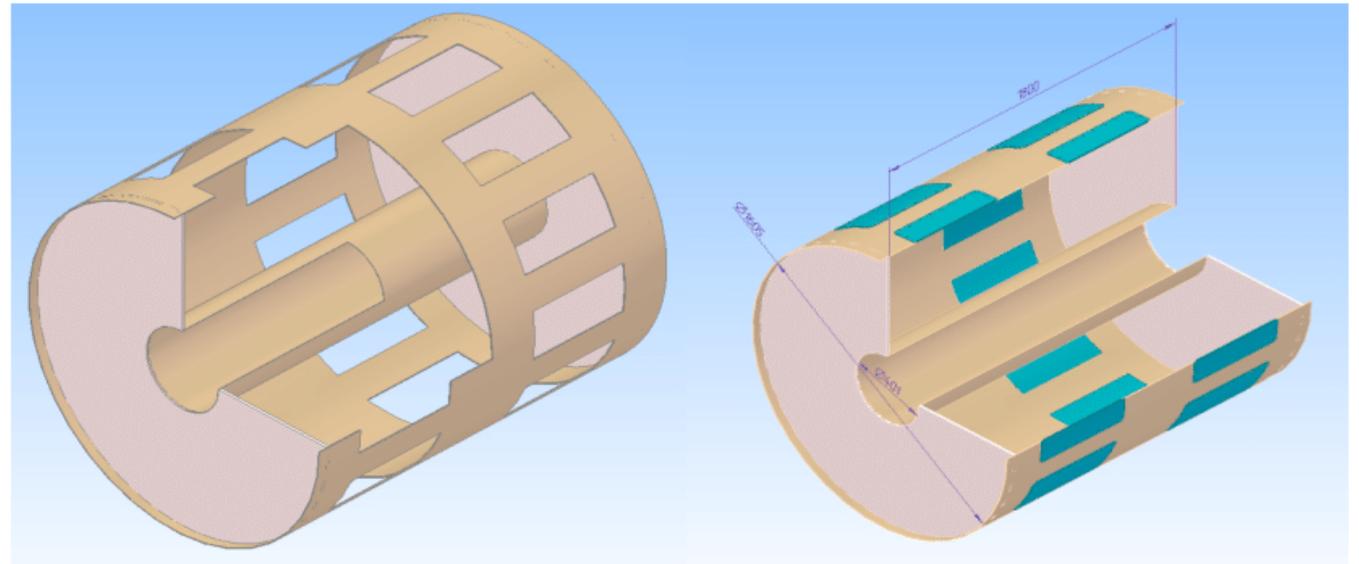
work done at CERN

detector layering

5 um Copper
50 um KAPTON
50 um prepreg 106
5 um Copper
50 um KAPTON

Дрейфовая камера

- Модель с несколькими ячейками изготавливается в ИЯФ
- Закуплены образцы разных проволок
- Продолжаются испытания газовых смесей на основе гелия
- Исследуются новые композитные материалы



DC Project. Cutaway view.

- To facilitate the wiring, the DCH is provided with 24 windows.
- Window covers are designed to withstand overpressure.
- The ANSYS program is used to simulate structural stability.

Основная трековая система – опция TraPid (INFN)

Команда INFN

INFN Bari

M. Abbrescia
R. Aly
N. De Filippis
D. Diacono
G. Donvito
W Elmetanawee
G. Iaselli
M. Maggi
I. Margjeka

INFN Lecce

A. Corvaglia
G. Chiarello
F. Cuna
E. Gorini
F. Grancagnolo
A. Miccoli
M. Panareo
M. Primavera
G. Tassielli
A. Ventura

$R_{in} - R_{out}$ [mm]		200 – 800
active L – service area [mm]		1800 – 200
inner cylindrical wall		
C-fiber/C-foam sandwich	2×80 μm / 5 mm	0.036 g/cm ² – 8×10 ⁻⁴ X/X ₀
outer cylindrical wall		
C-fiber/C-foam sandwich	2×5 mm / 10 mm	0.512 g/cm ² – 1.2×10 ⁻² X/X ₀
end plate		
gas envelope	160 μm C-fiber	0.021 g/cm ² – 6×10 ⁻⁴ X/X ₀
instrumented wire cage	wire PCB, spacers, HV distr. and cables, limiting R, decoupling C and signal cables	0.833 g/cm ² – 3.0×10 ⁻² X/X ₀
cell		
shape	square	
size [mm]	7.265 – 9.135	
layer		
8 super-layers	8 layer each	
<u>64 layer total</u>		
stereo angles	66 – 220 mrad	
n. sense wires [20μm W]	23,040	
n. field wires [40/50μm Al]	116,640	
n. total (incl. guard)	141,120	
gas + wires [600 mm]		
90%He – 10%iC ₄ H ₁₀	4.6×10 ⁻⁴	
W + 5 Al → Ti + 5 C	(13.1 → 2.5)×10⁻⁴	

$$\frac{\sigma_{dE/dx}}{(dE/dx)} = 8.1\%$$

$$\frac{\Delta p_{\perp}}{p_{\perp}} = 7.8 \cdot 10^{-4} p_{\perp} \oplus 1.8 \cdot 10^{-3}$$

(7.8 → 6.6 with cluster timing)

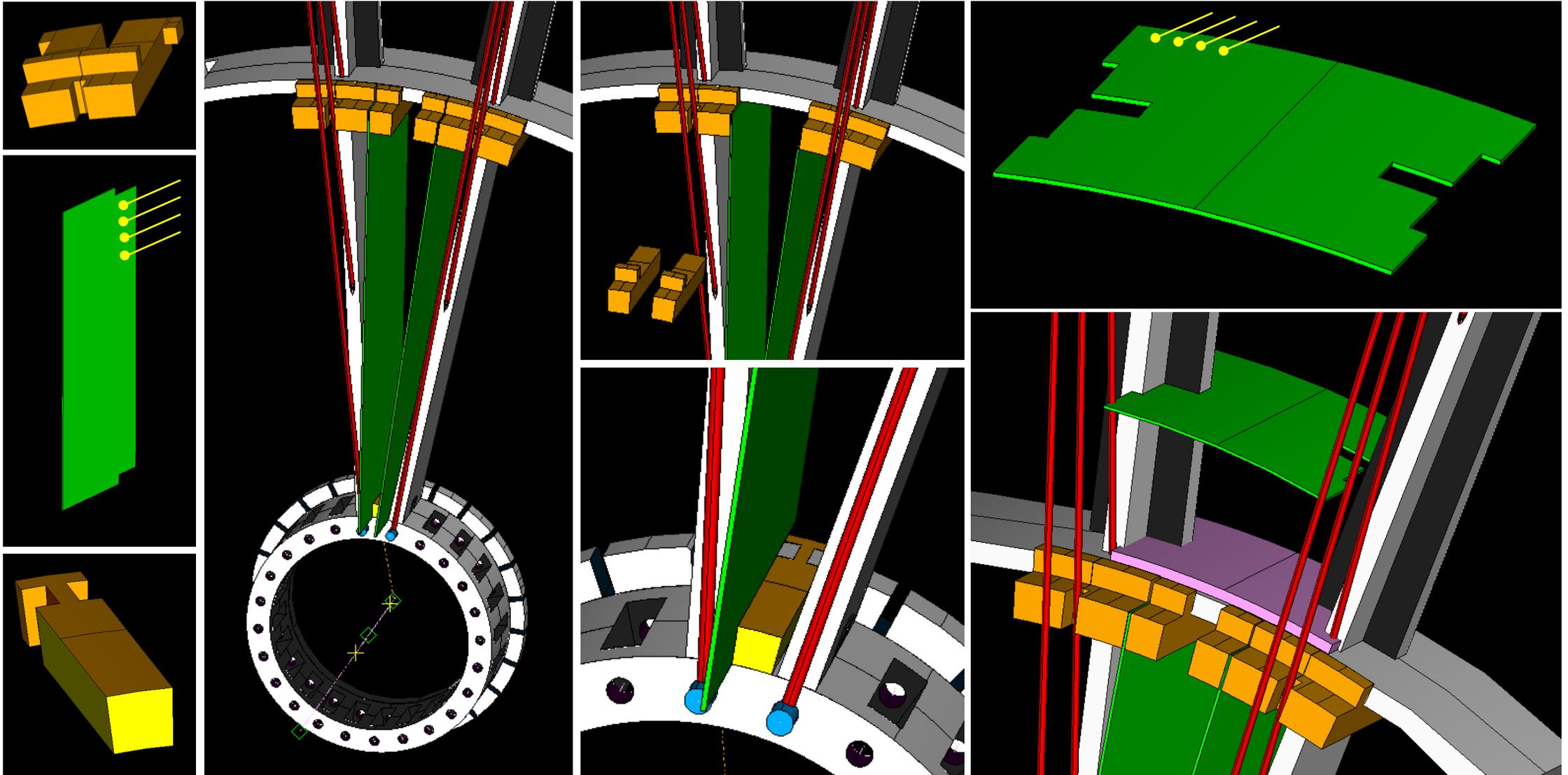
$$\Delta\phi = 1.1 \cdot 10^{-4} \oplus \frac{6.9 \cdot 10^{-4}}{p}$$

$$\Delta\theta = 3.8 \cdot 10^{-4} \oplus \frac{6.9 \cdot 10^{-4}}{p}$$

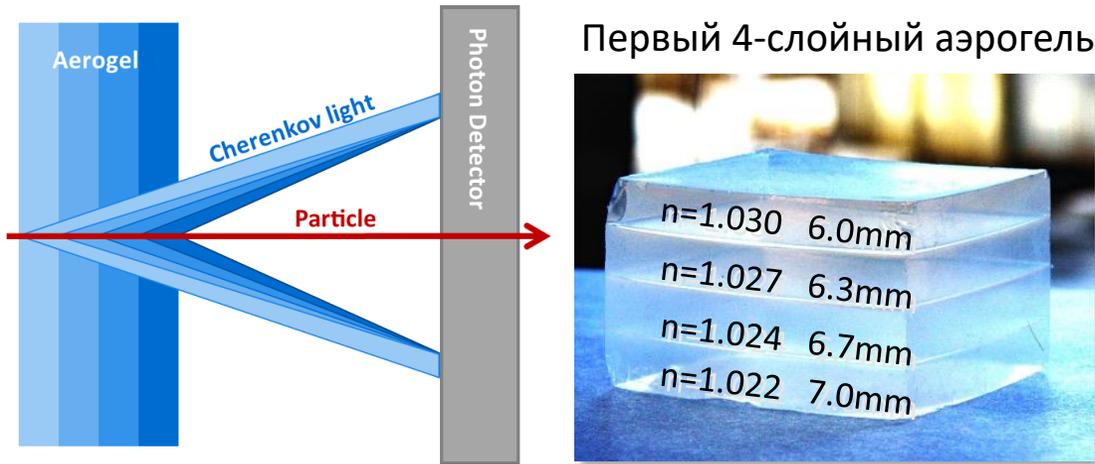
$$\frac{\sigma_{dN_d/dx}}{(dN_d/dx)} = 3.6\%$$

$$\frac{\Delta p_{\perp}}{p_{\perp}} = 2.0 \cdot 10^{-3}, \Delta\phi = 0.70 \text{ mrad}, \Delta\theta = 0.78 \text{ mrad @ 1 GeV}$$

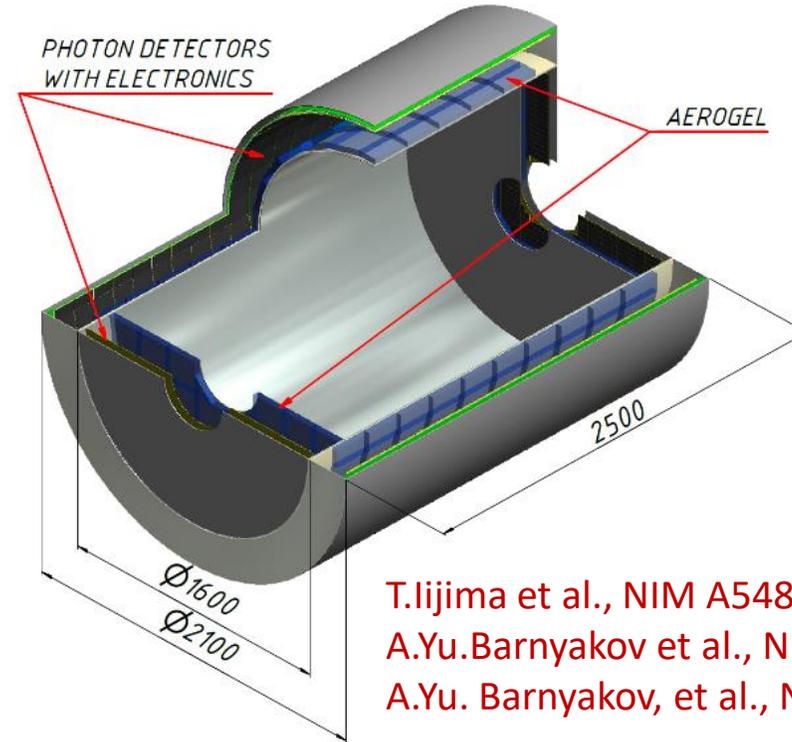
Конструкция ДК без торцевых пластин



Система идентификации – опция ФАРИЧ (ИЯФ СО РАН)



Увеличение $N_{\text{фэ}}$ за счет увеличения толщины радиатора без ухудшения $\sigma_{\text{Эс}}$



T.Iijima et al., NIM A548 (2005) 383
 A.Yu. Barnyakov et al., NIM A553 (2005) 70
 A.Yu. Barnyakov, et al., NIM A 732 (2013) 35



Возможность разделения μ/π на уровне $\geq 3\sigma$ при $P=1$ ГэВ/с продемонстрирована в 2012г.

- Proximity focusing RICH
- 4-layer or gradient aerogel radiator $n_{\text{max}} = 1.05$ (1.07?), thickness 35 mm
- **21 m²** total photon detector area
 - SiPMs in barrel (16 m²)
 - MCP PMTs in endcaps (5 m²)
- $\sim 10^6$ pixels with 4 mm pitch

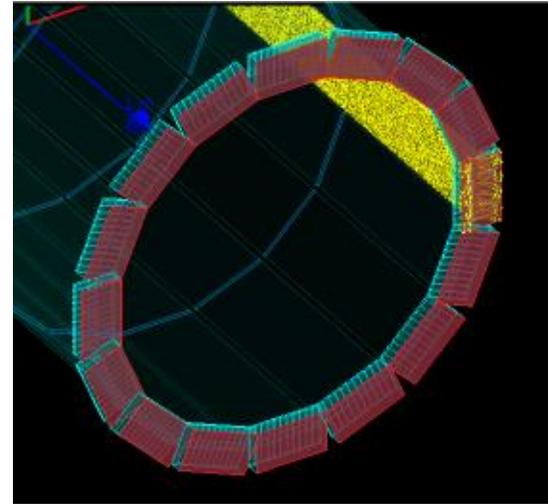
Система идентификации – опция FDIRC (JLU)

FDIRC option

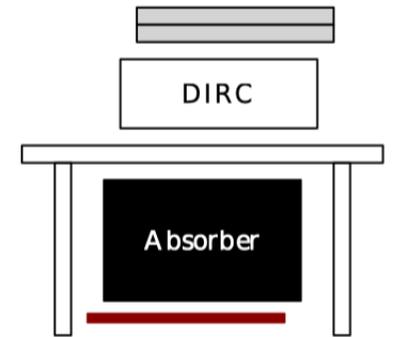
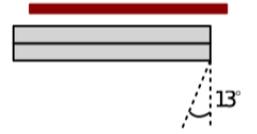
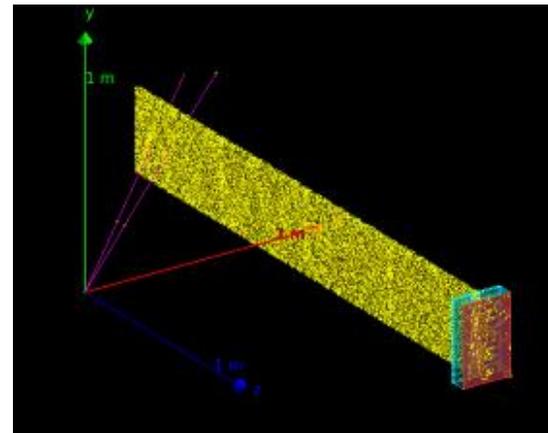
- Inspired by design from BaBar, SuperB, Belle II, and PANDA
- For PANDA $\sigma_{\theta_c} \approx 2.1$ mrad/track is achieved for π/K with $3\sigma@4$ GeV/c
- For SCTF $\sigma_{\theta_c} \approx 0.7$ mrad/track is required for μ/π with $3\sigma@1.5$ GeV/c

Main parameters:

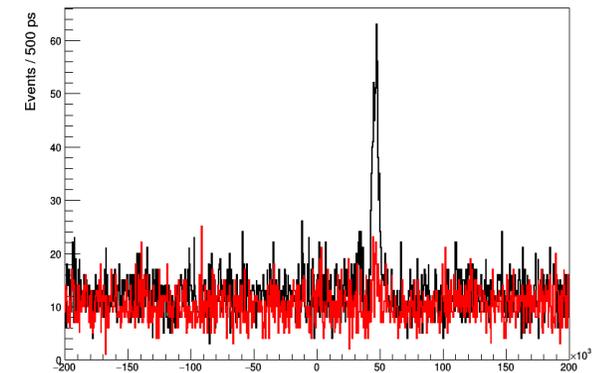
- ▶ Synthetic fused silica:
 - Barrel:** 2×16 plates $110 \times 32 \times 1.5$ cm
 - Endcap:** 2×4 sectors $1 \div 2$ cm thick
- ▶ Focusing optics: innovative rad-hard 3-layer spherical lens
- ▶ MCP-PMT or SiPM with $\sigma_t \leq 100$ ps
 - Barrel:**
 - ▶ $2 \div 3$ mm pixel
 - ▶ $2.56 \div 1.14 \cdot 10^5$ readout channels
 - Endcap:**
 - ▶ 16×0.5 mm pixel
 - ▶ $2.88 \cdot 10^4$ readout channels



2×16 plates $110 \times 32 \times 1.5$ cm³
and 2×16 expansion volumes
 $32 \times 20 \times 10$ cm³



Giessen cosmic station (GCS)



Электро-магнитный калориметр (ИЯФ СО РАН)

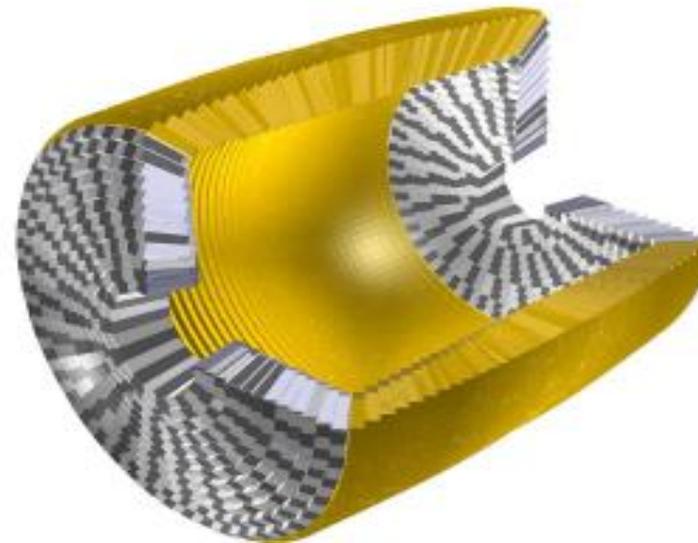
Чистый CsI:

- $\tau \approx 30$ ns.
- Применение WLS(NOL-9) для сбора света из кристалла ($6 \times 6 \times 30$ см³) и 4 APDs (Hamamatsu S8664-55) увеличивает светосбор в 6 раз.
- ENE=330±30 кэВ получено на космике.
- Прототип из 16 кристаллов оснащенных переизлучателями и 64-ми APD (по 4 на кристалл) планируется испытать на пучке в 2020г.



У ИЯФа накоплен хороший опыт в разработке и эксплуатации кристаллических калориметров: СНД (NaI), КМД-3 (CsI(Tl) и BGO), КЕДР (CsI(Tl)) и Belle-II (CsI(Tl)).

Calorimeter geometry



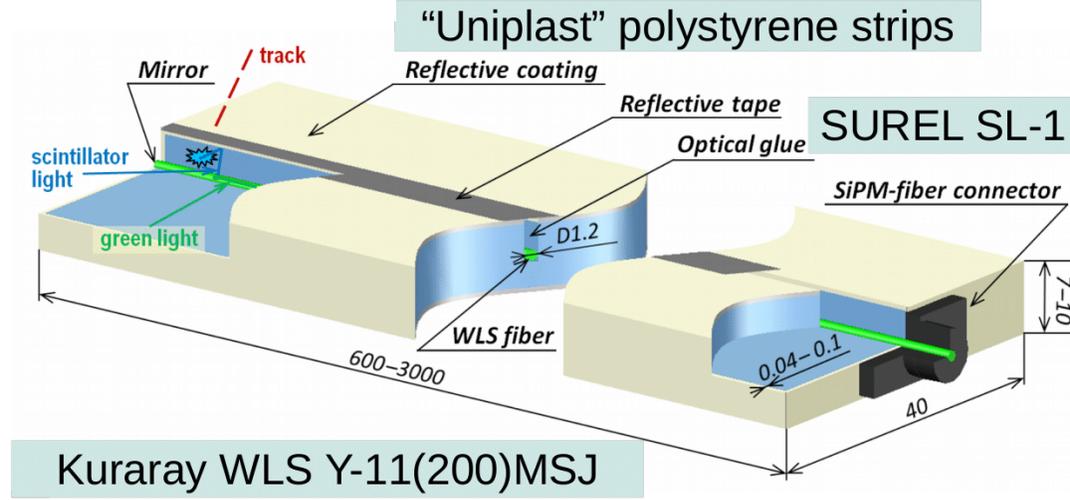
Описание геометрии для моделирования

Калориметр для СЦТФ на чистом CsI:

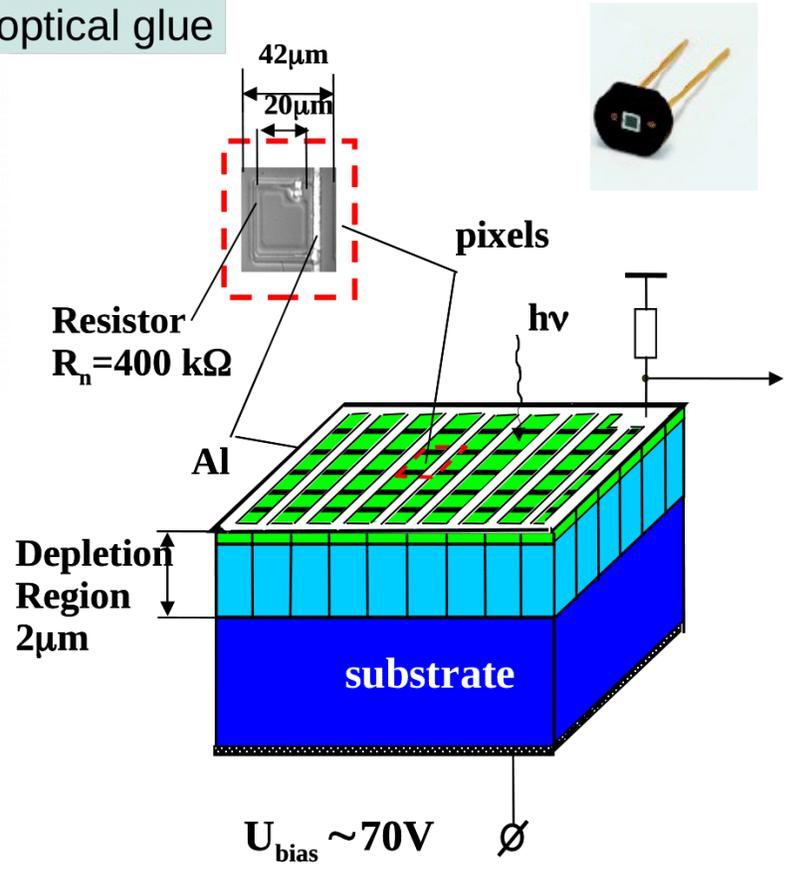
- Толщина 16/18X₀ – 30/34 см.
- 7424 кристалла, вес: 36/43 т.
- 29696 APDs + 7424 WLSs или 7424 Фотопентода.

Мюонная система (ФИАН)

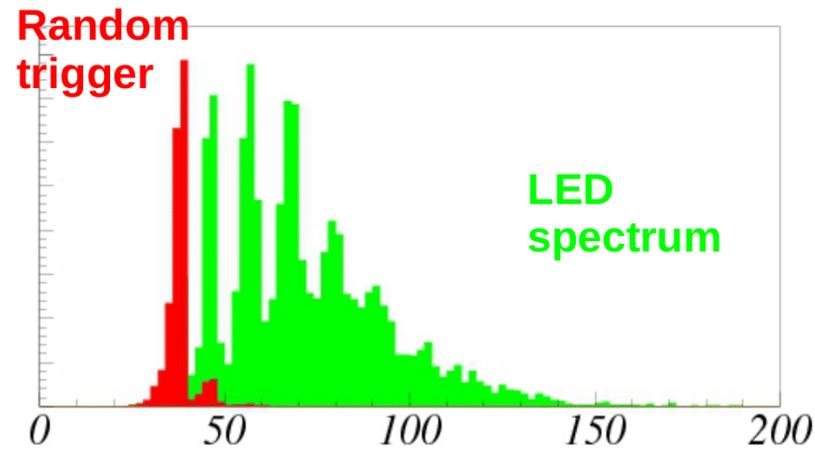
Scintillator - WLS – SiPM (Belle II)



Hamamtsu MPPC S10362-13-050



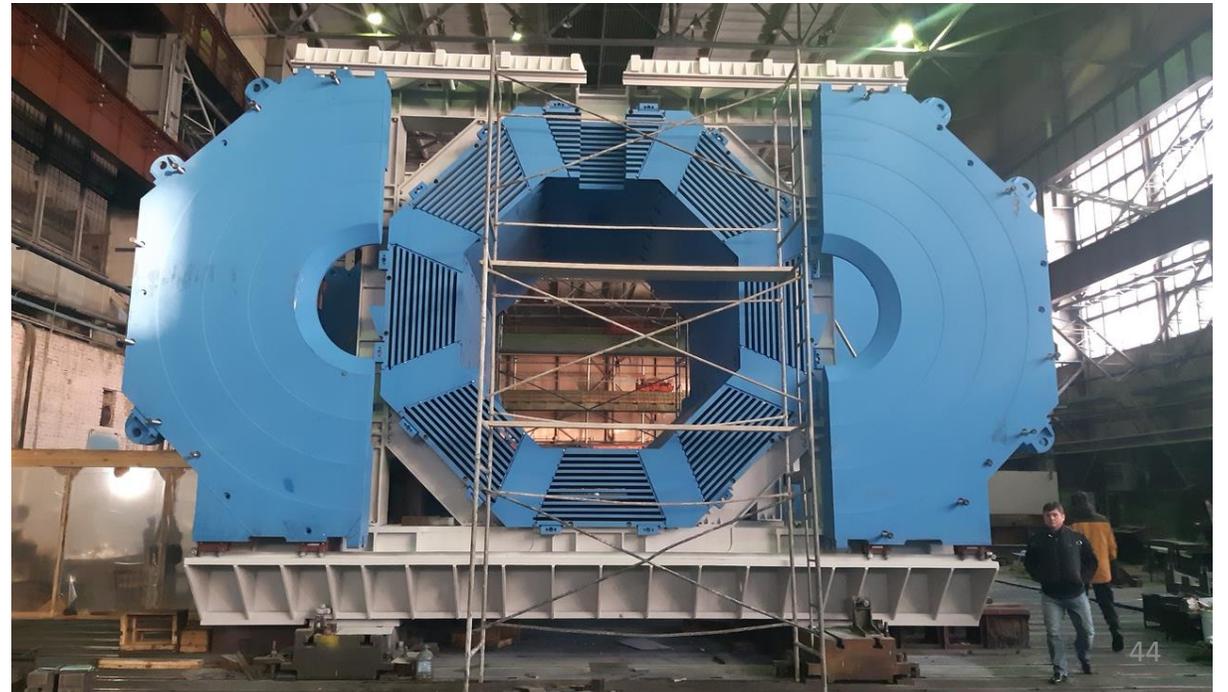
Kuraray WLS Y-11(200)MSJ



<https://c-tau.ru/indico/event/3/contributions/192/attachments/169/268/uglov.pdf>

Магнитная система

- ИЯФ выполняет контракт с GSI на производство магнита для PANDA:
 - Начато производство сверхпроводящего кабеля в РФ.
 - Произведено ярмо магнита в Новосибирске
 - Испытания пройдут в ИЯФ в 2022г.
- Полученный опыт полного производственного цикла поможет быстро сконструировать и произвести аналогичный магнит для СЧТФ



Заключение

1. Супер чарм-тау фабрика – установка мирового класса для прецизионных экспериментов по физике частиц; центр притяжения квалифицированных специалистов и развития технологий
2. Проект СЧТФ хорошо проработан, СЧТФ является оптимальной якорной установкой для Большого Сарова
3. Создание детектора и развитие физической программы эксперимента требует создания сильной международной коллаборации. Работы хватит всем.

Backup

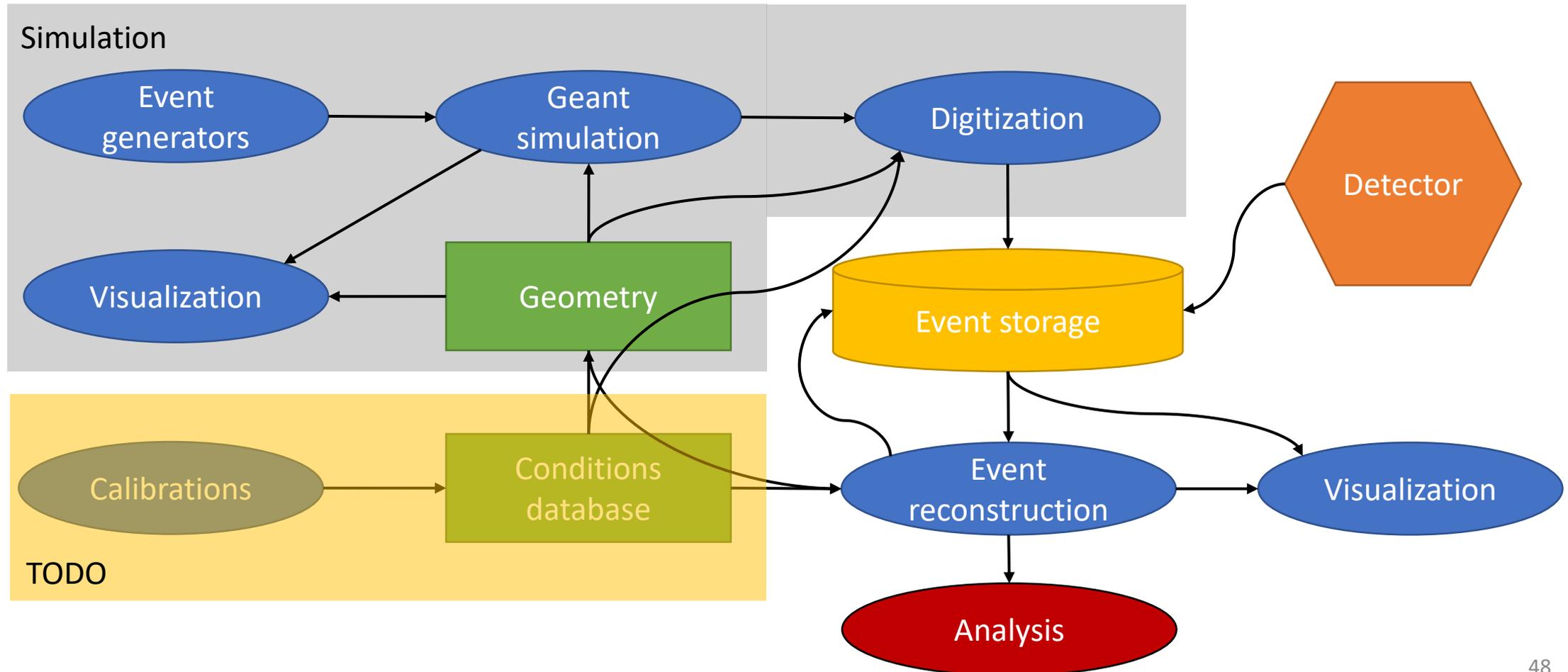
Проект Большой Саров

- Рядом с г. Саров создается новый Национальный центр физики и математики
- Супер с-тау фабрика станет «якорным» проектом этого центра
- Декабрь 2020: письмо на имя Президента РФ от имени А.Е. Лихачева (ген. директор Росатом), А.М. Сергеева (президент РАН), В.А. Матвеева (директор ОИЯИ) с предложением о строительстве Супер с-тау фабрики в Сарове. Резолюция: Согласен, А.А.Фурсенко проработать с заинтересованными сторонами.
- В настоящее время вопрос активно прорабатывается в ГК «Росатом», администрации президента, МНВО.



SCT detector software

- **Task 5.3.** Development of **software** for the design of an SCT detector





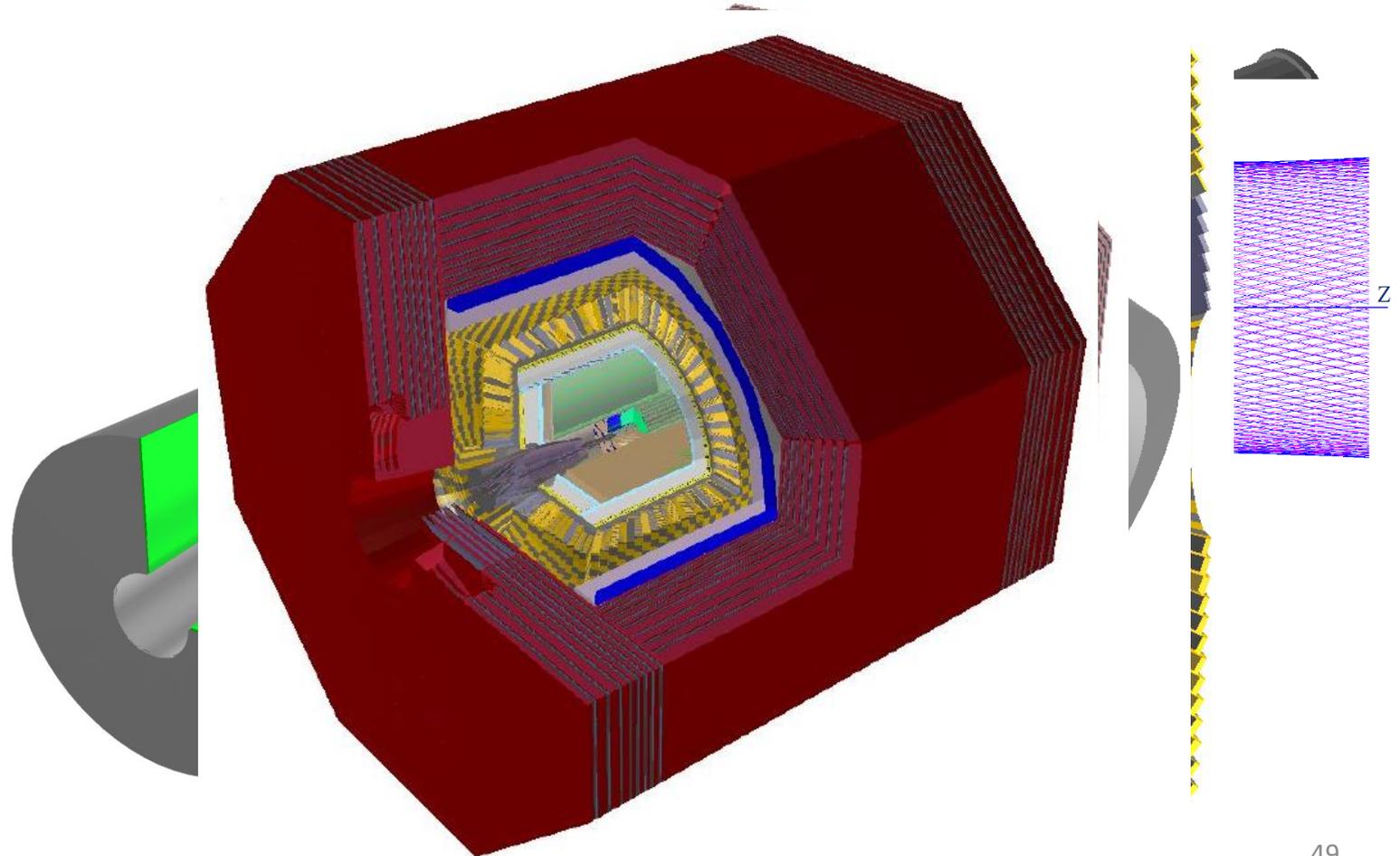
Detector geometry

- **Task 5.3.** Development of **software** for the design of an SCT detector

Subsystems described:

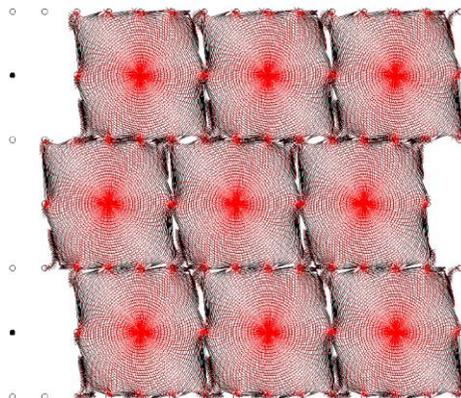
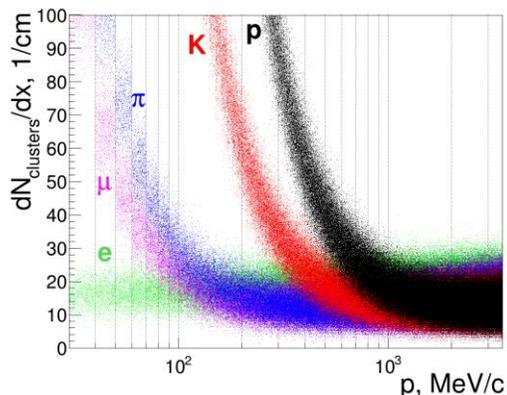
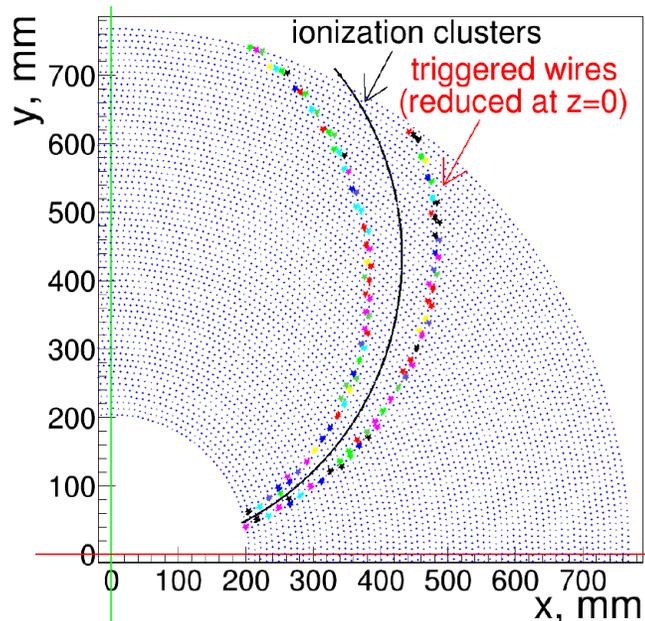
- Beam pipe and FF magnets
- Inner tracker
- Drift chamber
- Particle ID system
- Crystal calorimeter
- Superconducting coil
- Muon system and yoke

An option is implemented for each
detector subsystem

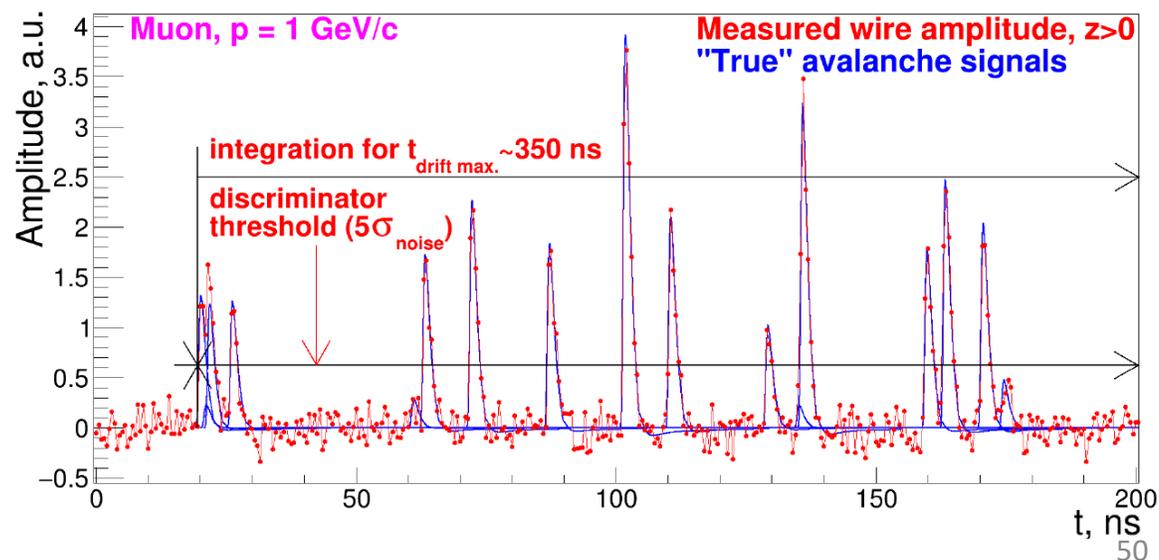
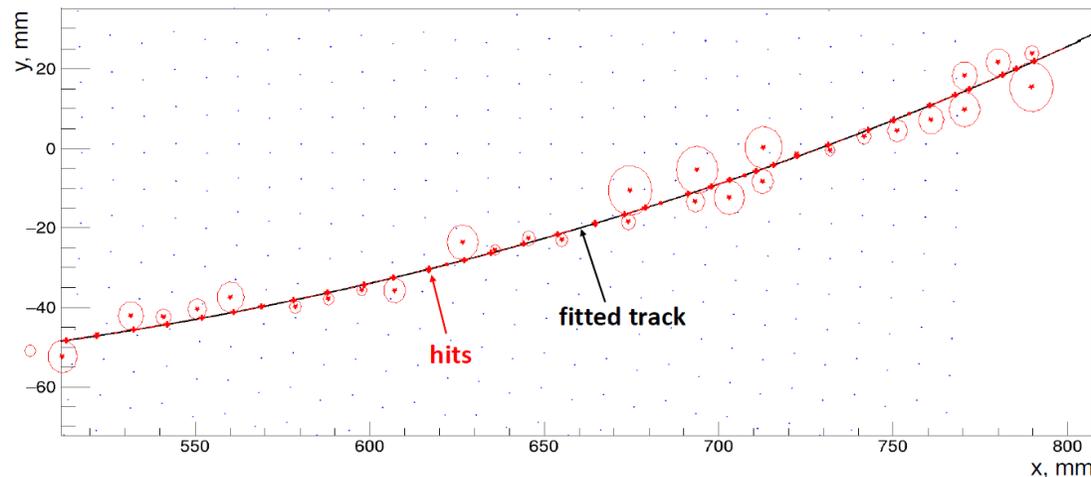


Track reconstruction

- Simulating the ionization cluster counting mode
- Boosted momentum resolution and particle identification



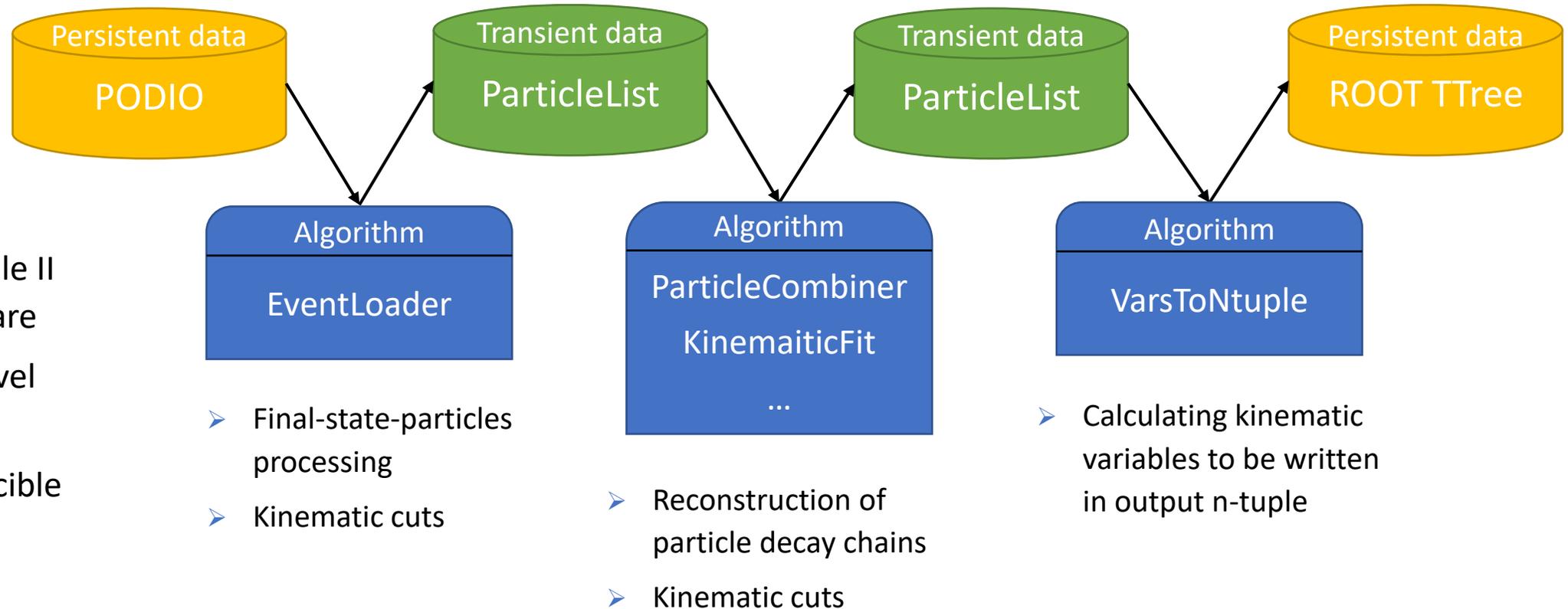
- **Task 5.3.** Development of software for the design of an SCT detector





SCT event analysis

- **Task 5.3.** Development of **software** for the design of an SCT detector



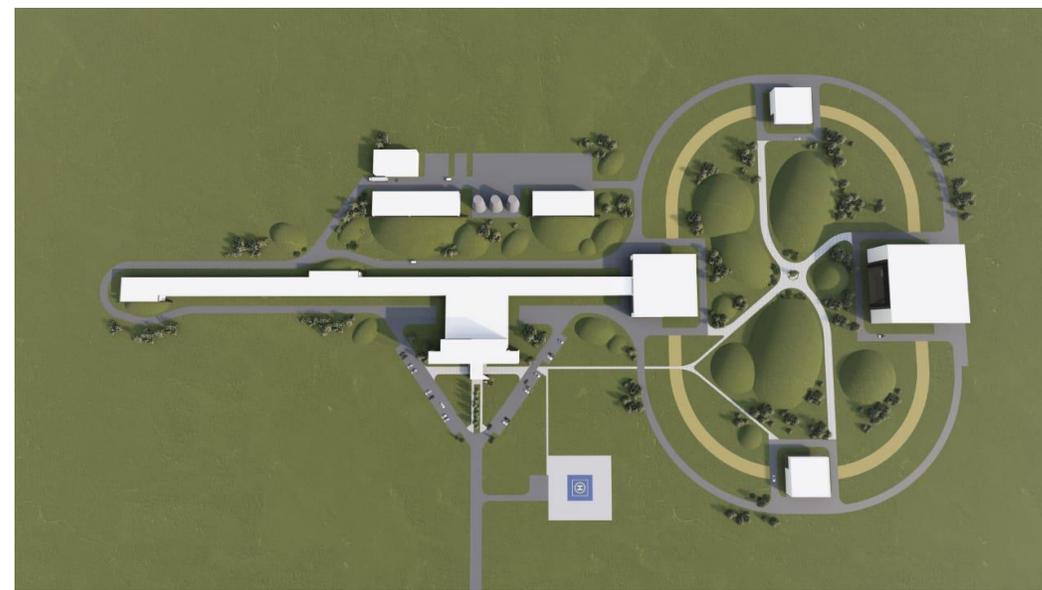
- Inspired by Belle II analysis software
- Simple high-level Python API
- Easily reproducible data analysis

- Final-state-particles processing
- Kinematic cuts

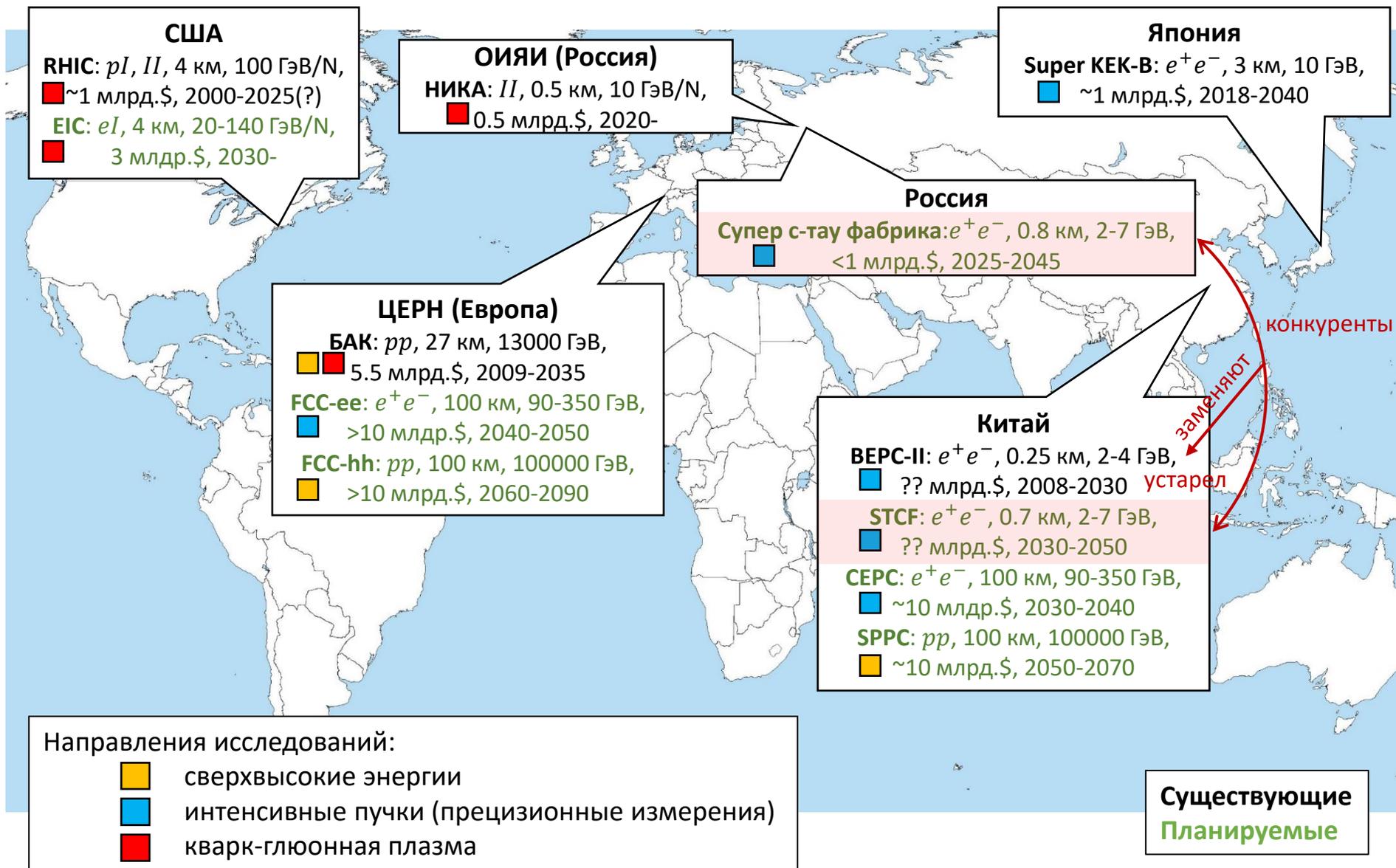
- Reconstruction of particle decay chains
- Kinematic cuts

- Calculating kinematic variables to be written in output n-tuple

Супер С-тау фабрика в Сарове

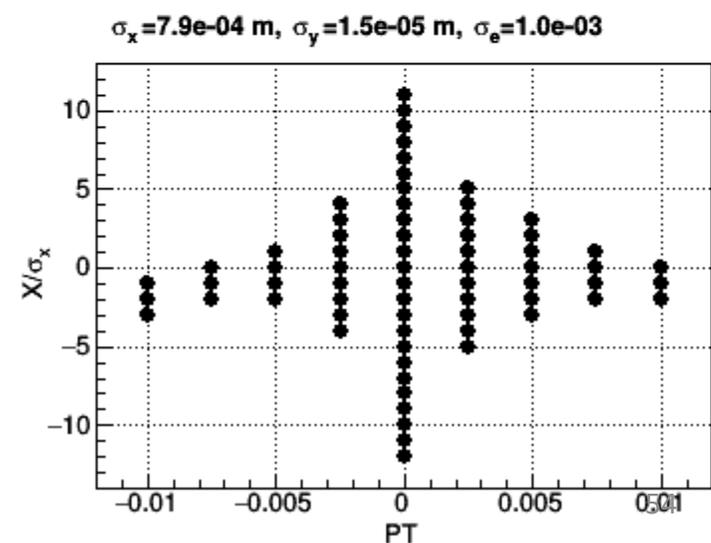
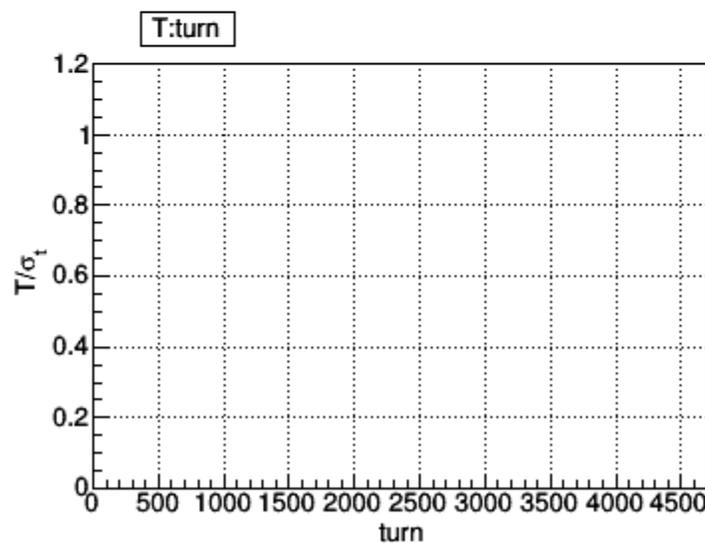
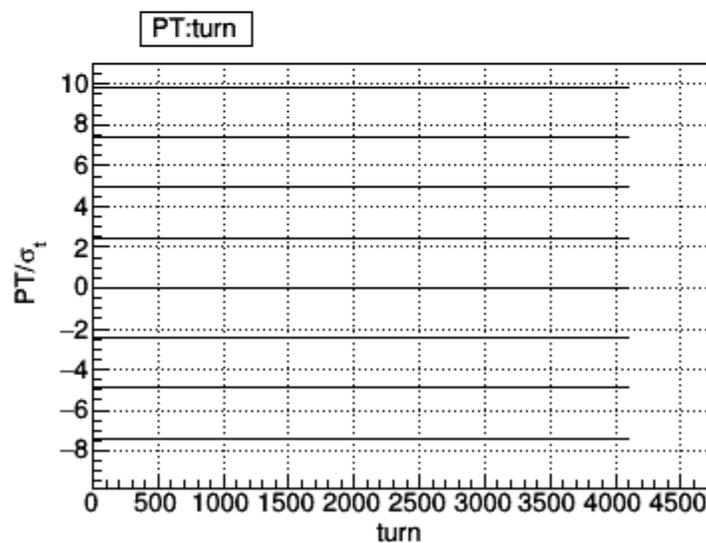
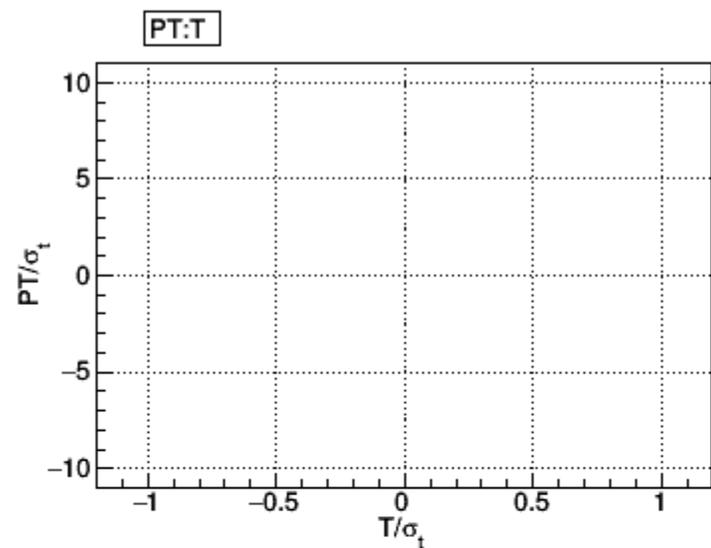
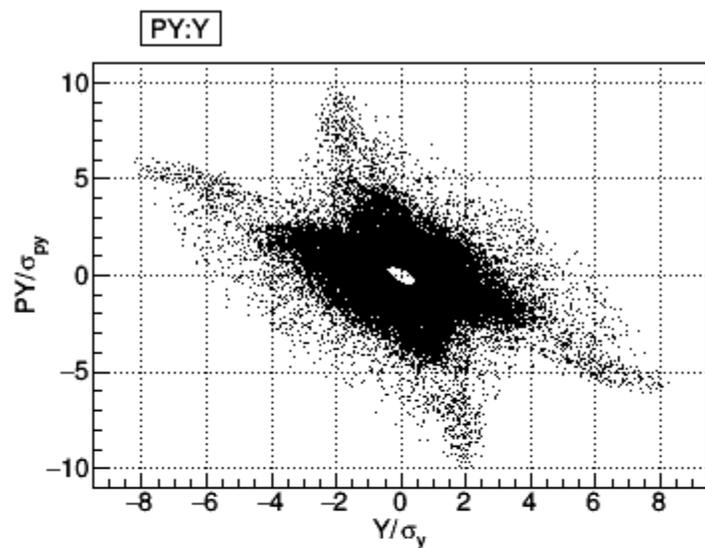
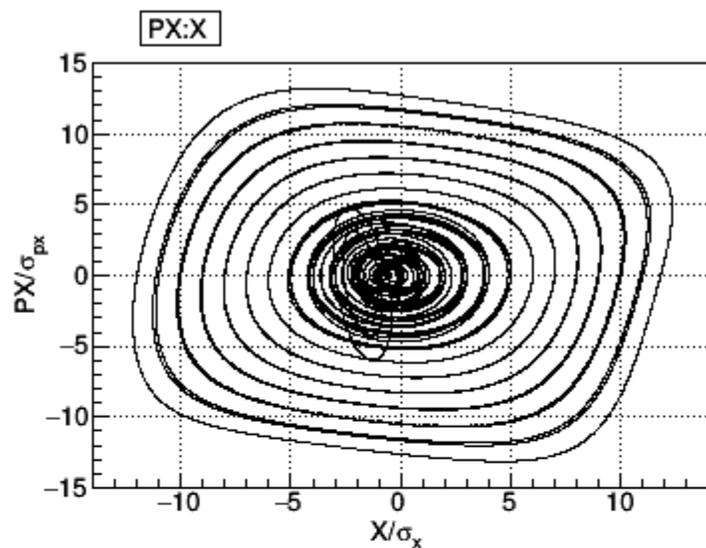


Коллайдерная программа в мире



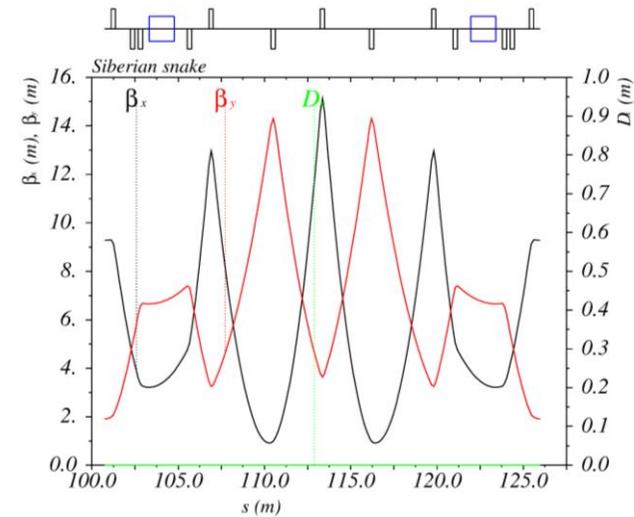
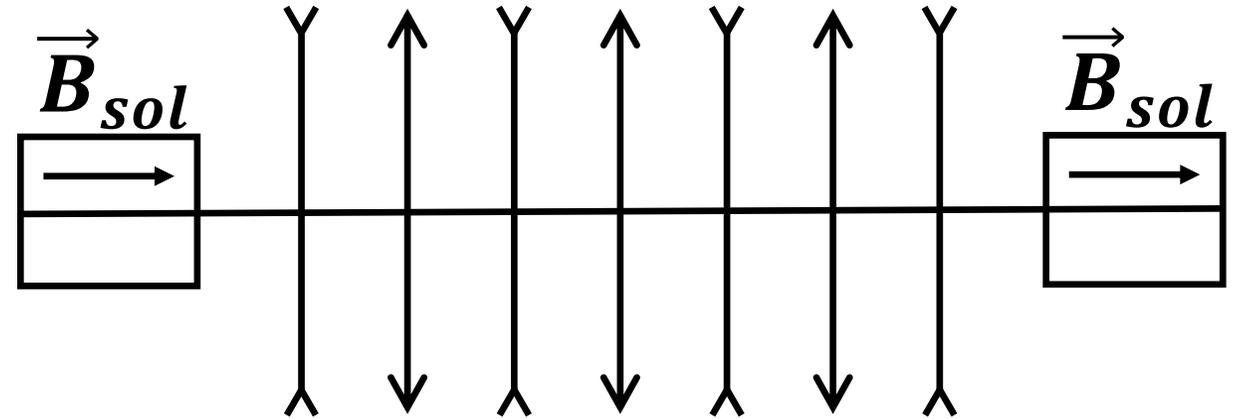
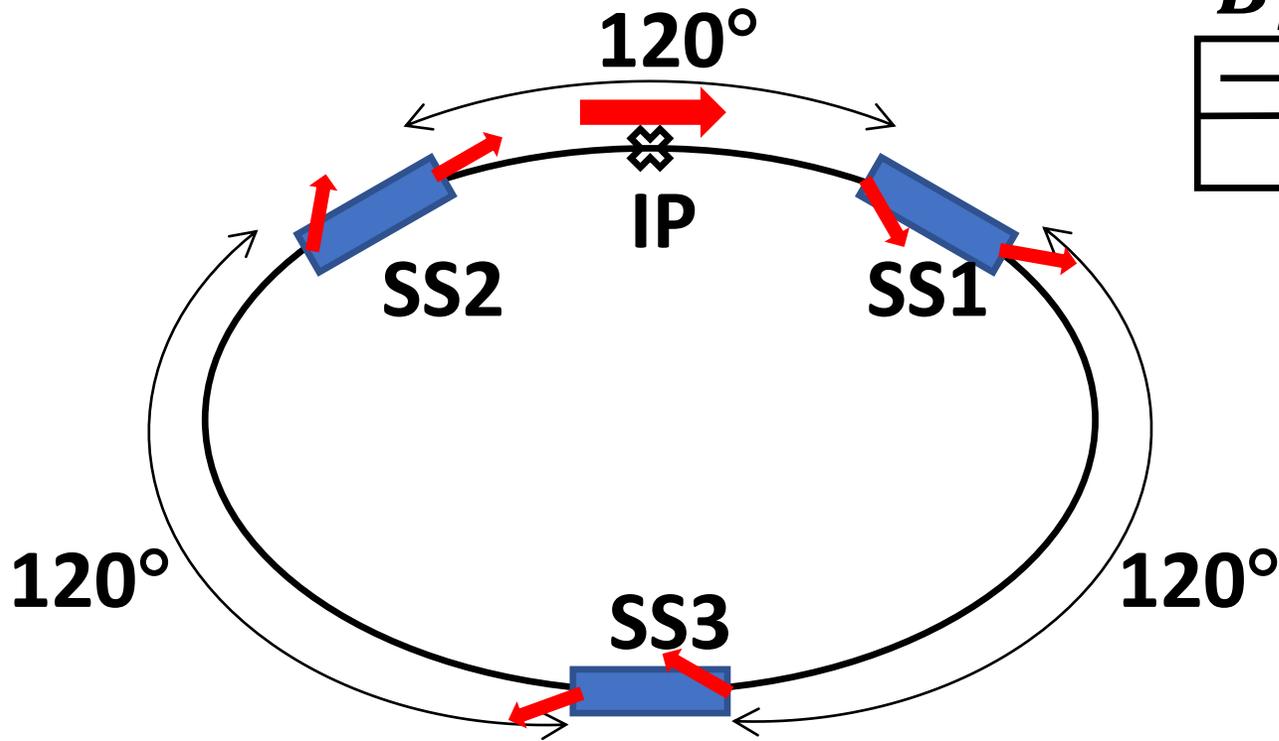
2021: Dynamic aperture

$y_0 = 1 \sigma_y$, $\epsilon_x = 25.19 \text{ nm}$, $\epsilon_y = 126 \text{ pm}$



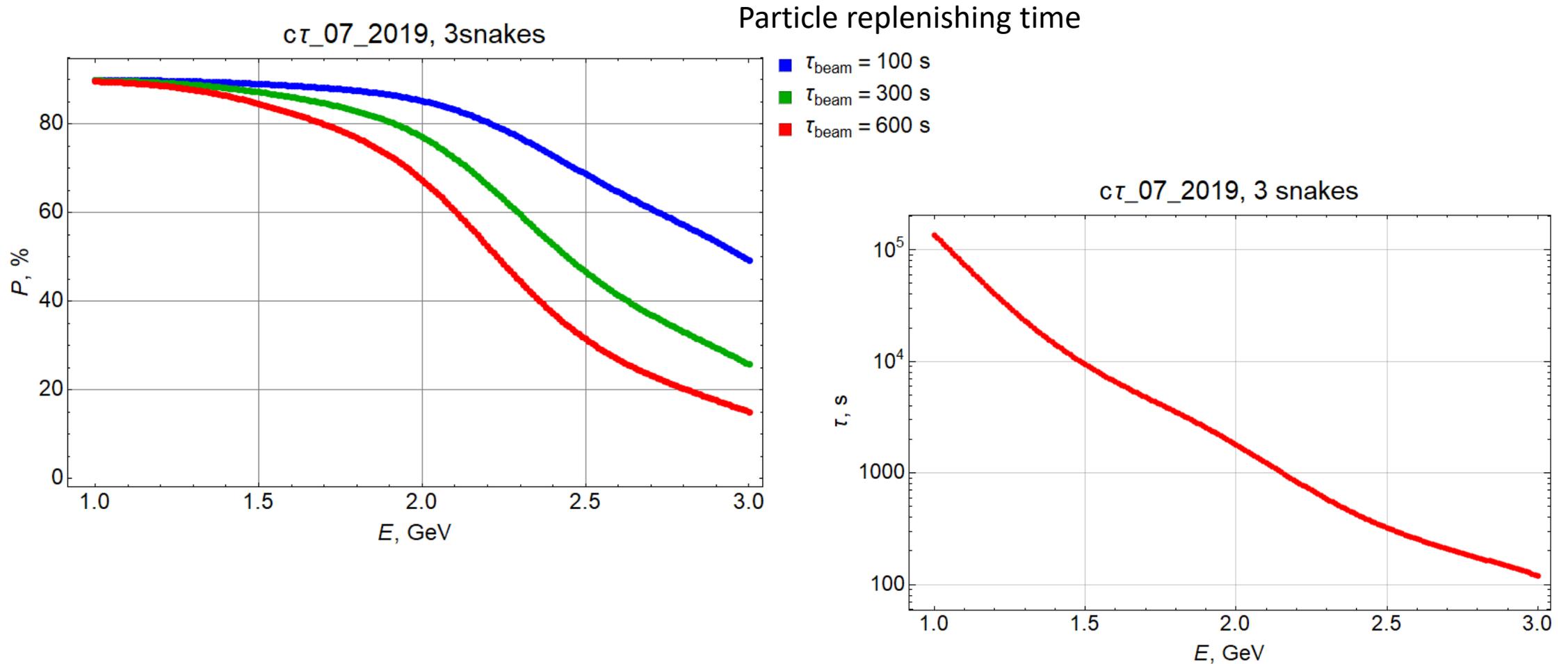
The goal is to provide longitudinal polarization at IP

Siberian Snake



To decouple $R_x = -R_y$, 7 quadrupoles needed
 Solenoid spin rotation angle is $\pi/2$ $B_{sol} = 7$ T at $E_{beam} = 3.5$ GeV, $L = 2.6$ m

Longitudinal Polarization (number of snakes)



Charm decay rates

Time-dependent

Incoherent

$$D^{*\pm} \rightarrow D\pi^\pm, \quad B \rightarrow DX, \quad e^+e^- \rightarrow c\bar{c} \rightarrow D\bar{D}X, \quad pp \rightarrow c\bar{c}X$$

$$|\langle f|\mathcal{H}|D^0(t)\rangle|^2 = e^{-\Gamma t} |\mathcal{A}_f|^2 [1 - (y \operatorname{Re}\lambda_f + x \operatorname{Im}\lambda_f)\Gamma t] + \mathcal{O}(x^2, y^2)$$

$$|\langle f|\mathcal{H}|D^0\rangle|^2 \propto |\mathcal{A}_f|^2 (1 - y \operatorname{Re}\lambda_f - x \operatorname{Im}\lambda_f) + \mathcal{O}(x^2, y^2)$$

Boost

$$\text{LHCb: } (\gamma\beta)_D \gg 1$$

$$\text{B factory: } (\gamma\beta)_D \sim 1$$

$$\text{c-}\tau \text{ factory: } (\gamma\beta)_D \ll 1$$

Time-integrated

Coherent (at rest)

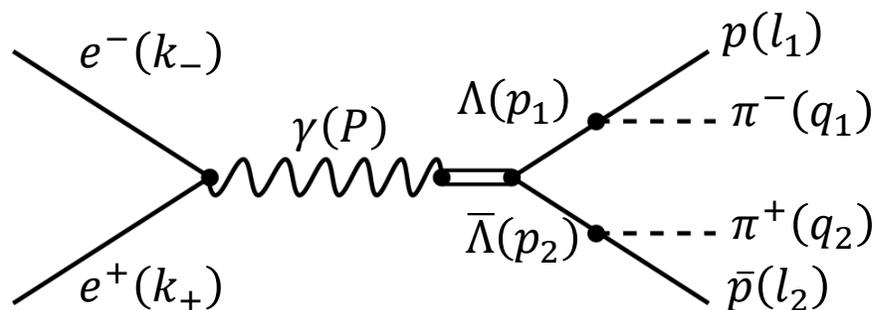
$$e^+e^- \rightarrow D^{(*)0}\bar{D}^{(*)0}, \quad \mathcal{C}+: D^0\bar{D}^0\gamma, \quad \mathcal{C}-: D^0\bar{D}^0(\pi^0)$$

$$\langle ij|\mathcal{H}|D^0\bar{D}^0\rangle \propto \langle i|\mathcal{H}|D^0\rangle\langle j|\mathcal{H}|\bar{D}^0\rangle + \mathcal{C}\langle i|\mathcal{H}|\bar{D}^0\rangle\langle j|\mathcal{H}|D^0\rangle$$

$$|\langle ij|\mathcal{H}|D^0\bar{D}^0\rangle|^2 \propto |\mathcal{A}_i|^2 |\mathcal{A}_j|^2 [|\zeta_c|^2 + (1 + \mathcal{C})(x \operatorname{Im}(\xi_c^* \zeta_c) - y \operatorname{Re}(\xi_c^* \zeta_c))] + \mathcal{O}(x^2, y^2)$$

$$\xi_c \equiv \frac{p}{q}(1 + \mathcal{C}\lambda_i\lambda_j), \quad \zeta_c \equiv \frac{p}{q}(\lambda_j + \mathcal{C}\lambda_i)$$

Λ: Формфакторы и CPV



$$e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow [\Lambda \rightarrow p\pi^-][\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+]$$

$$\alpha \equiv \frac{s |G_M^\psi|^2 - 4m_\Lambda^2 |G_E^\psi|^2}{s |G_M^\psi|^2 + 4m_\Lambda^2 |G_E^\psi|^2}, \quad \Delta\Phi \equiv \arg\left(\frac{G_E^\psi}{G_M^\psi}\right), \quad \alpha_1, \alpha_2$$

➤ CP асимметрия в распадах $\Lambda \rightarrow p\pi^-$:

$$A_\Lambda \equiv \left| \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \right| \lesssim 5 \times 10^{-5}$$

○ Ограничение в рамках СМ:

$$A_\Lambda \lesssim 5 \times 10^{-5}$$

○ Ожидаемая точность:

$$\sigma(A_\Lambda) = 1.2 \times 10^{-4}$$

Setup	SCT one-year σ (10^{-4})			
	P_e	α	$\Delta\Phi$ (rad)	α_i
5D $P_e = 0$	Fixed	1.5	3.1	2.8
5D $P_e = 0.8$	1.3	1.2	1.6	0.9
3D $P_e = 0.8$	4.3	1.2	2.4	3.4