

Системы идентификации

Барняков А.Ю.

Летняя научная школа НЦФМ, «Супер Ц-Тау фабрика»,
25-29 июля 2022г., г. Саров

1. Основные положения
2. Методы идентификации в экспериментах на встречных пучках
 - 1) dE/dx
 - 2) ToF
 - 3) Черенковские счетчики
 - a) Черенковское излучение
 - b) Пороговые счетчики
 - c) Детекторы черенковских колец
 - 4) Детекторы переходного излучения
3. Опции систем идентификации для проекта «Супер Ц-Тау фабрика»

Алексей Павлович Онучин (1934 – 2021)

Работал в ИЯФ СО РАН практически с основания (1959 – 2021)

- А.П. Онучин был одним из пионеров экспериментов на встречных пучках. Множество экспериментальных методик было им предложено и развито для экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками:
 - Первый черенковский счетчик в эксперименте на встречных пучках
 - Первая система регистрации частиц со сбором данных на ЭВМ
 - Развитие производства МППК для детектора МД-1 в ИЯФ СО РАН
 - и др.
- Благодаря его энтузиазму, активности и оптимизму началось и продолжается развитие технологии производства черенковских счетчиков на основе аэрогеля



Основные положения

- Идентификация частиц = Разделение частиц по массам
- Полезные соотношения:

$$\gamma = \frac{E}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} \leq 1; \quad \beta\gamma = \frac{p}{mc^2} = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2;$$

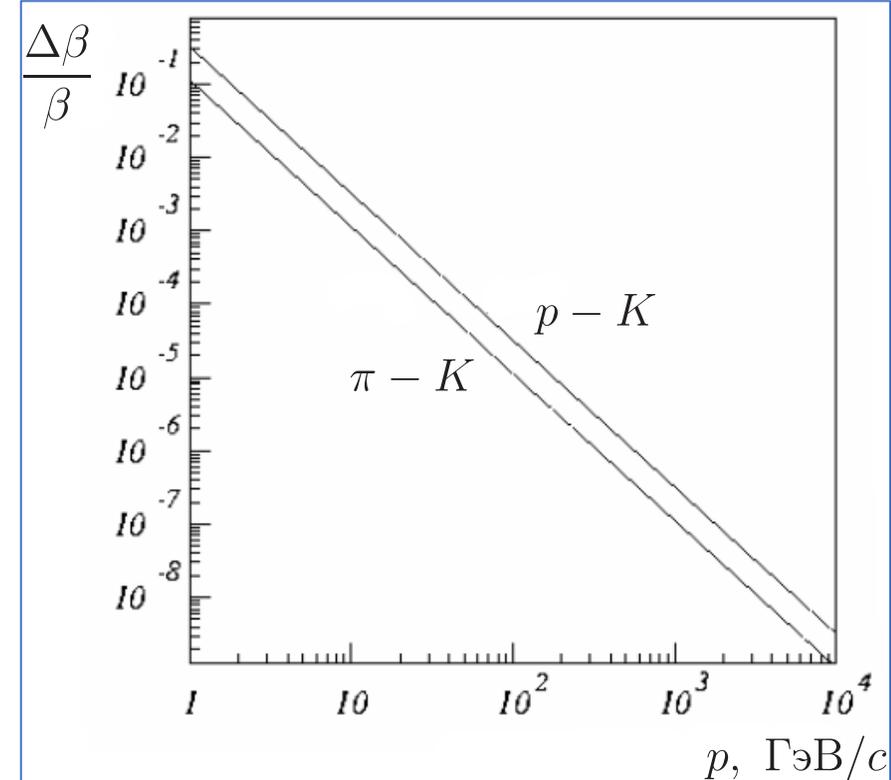
- Для определения массы частицы необходимо определить одну из комбинаций:
 - импульс (p) и энергию (E)
 - энергию (E) и скорость (β)
 - Чаще всего измеряют импульс (p) и скорость (β)

$$m = \frac{p}{c\beta\gamma}$$

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\gamma^2 \frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2$$

$$m_2^2 - m_1^2 = p^2 \frac{\Delta\beta(\beta_1 + \beta_2)}{c^2(\beta_1\beta_2)^2}$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} \cong \frac{(m_2^2 - m_1^2)c^2}{2p^2}$$



Основные положения (2)

Методы идентификации		Примечания
По пробегу	$R_i = \frac{M}{z^2} F(v, z_0)$	$R_i \leq L_{я}$, применяется для выделения μ
по ионизационным потерям	$-\frac{dE}{dx} \sim \frac{z^2}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$	Применяется на встречных пучках
по времени пролета	$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{m_2 c^2}{pc}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{m_1 c^2}{pc}\right)^2} \right)$	Применяется на встречных пучках
по черенковскому излучению	$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$	Применяется на встречных пучках
с помощью калориметров	$L \approx (10 \div 30) X_0; L \approx (5 \div 10) \lambda_{яд}$	Позволяет хорошо делить $e/hadr$
по переходному излучению	$I \sim \ln \gamma$	Применяется при $E \geq 10$ ГэВ
по СИ	$\Delta E = 8.64 \cdot 10^{-11} \frac{\gamma^4 H^2}{(pc)^2}$	Не применяется на встречных пучках

Основные положения (3)

- Основные характеристики:

- «эффективность регистрации» ($\varepsilon_{A \rightarrow A}$) – отношение числа зарегистрированных частиц A ($N_A^{\text{рег}}$) к общему числу частиц A ($N_A^{\text{общ}}$)
- «вероятность ложной идентификации» ($\varepsilon_{B \rightarrow A}$) – отношение числа частиц B , зарегистрированных как A ($N_{B \rightarrow A}^{\text{рег}}$), к $N_A^{\text{общ}}$
- достоверность разделения в системе – $n_\sigma = \frac{S_A - S_B}{\sigma_{AB}}$

S_A и S_B – средние значения распределений параметра измеренного для частиц A и B , σ_{AB} – средняя величина STDEV этих распределений.

Если S_A и S_B распределены по Гауссу, то $\varepsilon_{B \rightarrow A} \leq 1\% \rightarrow n_\sigma = 4$

- В системах идентификации работают с долгоживущими заряженными частицами:

e^\pm	μ^\pm	π^\pm	K^\pm	p
0.511 МэВ/с	105.6 МэВ/с	139.6 МэВ/с	493.7 МэВ/с	938.3 МэВ/с
∞	$2.2 \cdot 10^{-6}$ с	$2.6 \cdot 10^{-8}$ с	$1.24 \cdot 10^{-8}$ с	$> 2.9 \cdot 10^{29}$ лет

- γ, π^0, K^0, n идентифицируются (реконструируются) по вторичным частицам.
- Системы идентификации в универсальных детекторах должны обладать минимально-возможной толщиной.
Характерные современные величина – это $0.1 \div 0.3 X_0$

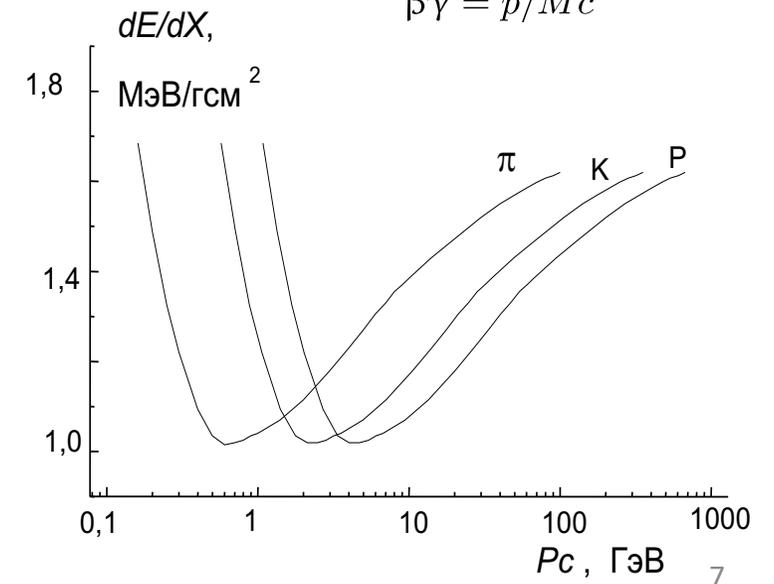
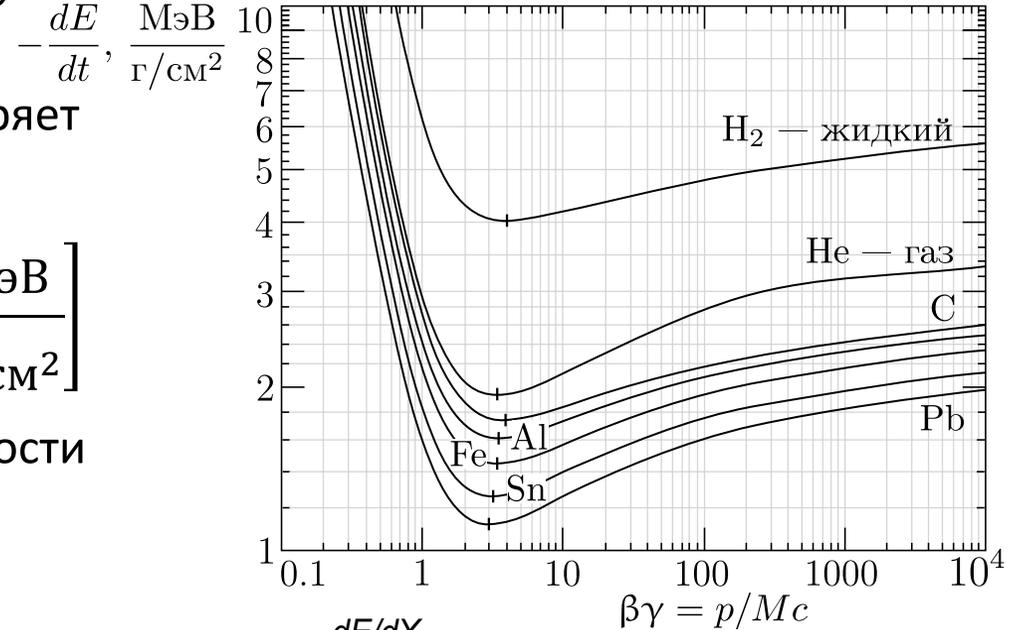
Идентификация по ионизационным потерям

Идентификация по $\frac{dE}{dx}$

- При прохождении через вещество заряженная частица теряет энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды.

$$-\frac{dE}{dx} = 0.31 \frac{z_0 z^2}{A \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I(z_0)} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 - \delta(\beta^2, z_0) \right] \left[\frac{\text{МэВ}}{\text{г/см}^2} \right]$$

- Ионизационные потери (при $z=1$) зависят только от скорости частицы: $\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln \beta^2 \gamma^2$
- Для частиц с разной массой, но одинаковым импульсом ионизационные потери будут различаться
- Потери энергии на ионизацию можно измерять в **газах**, **жидкостях** и **полупроводниках**
- Существует два метода измерения ионизационных потерь:
 - Q – измерение полного заряда ионизации
 - N – подсчет количества кластеров ионизации

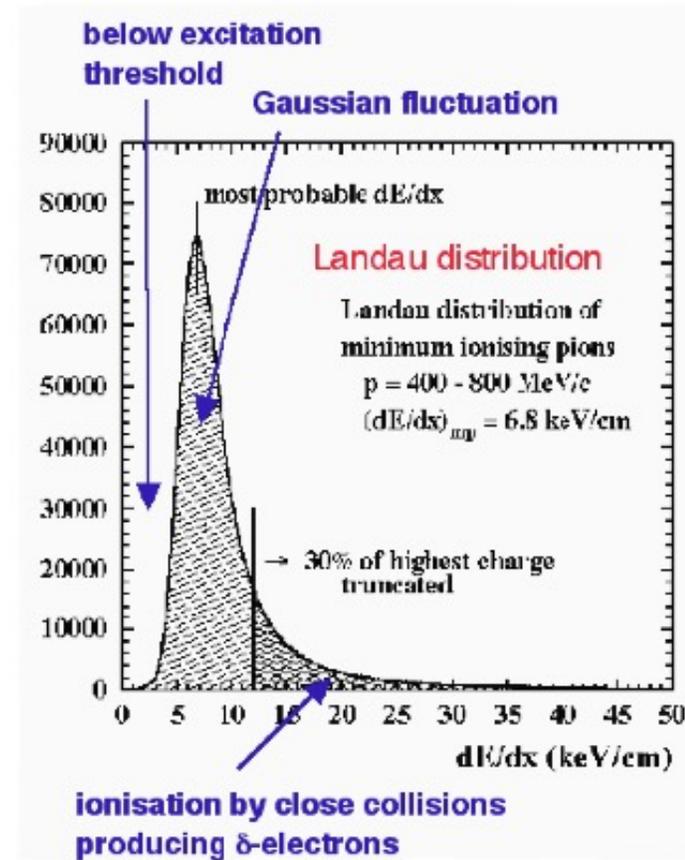


Идентификация по $\frac{dE}{dx}$ (2)

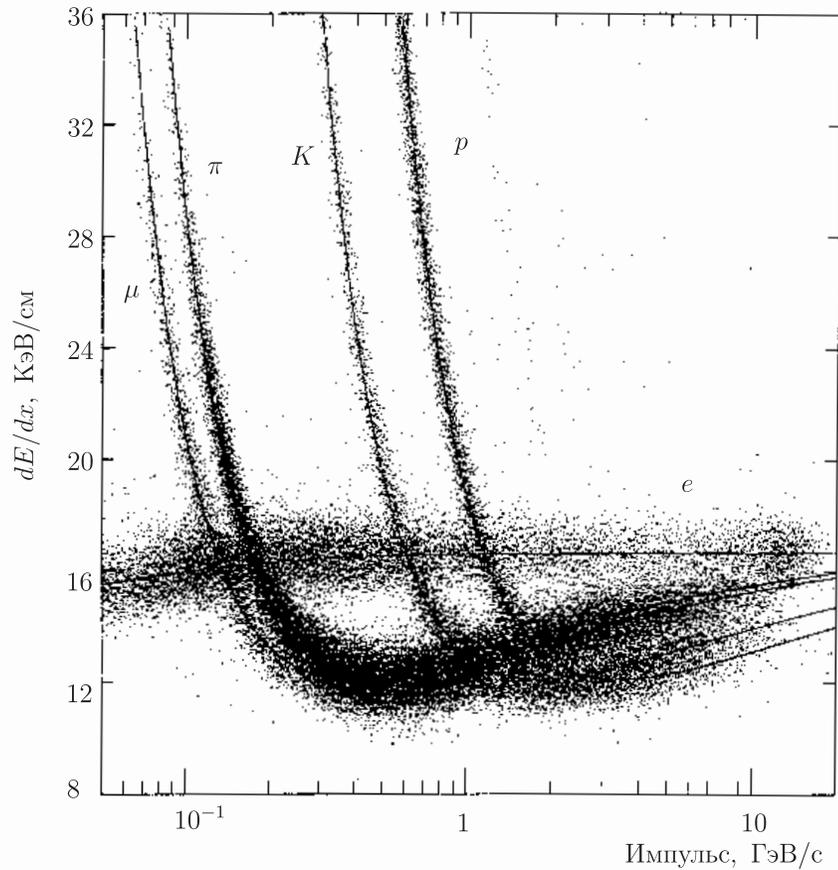
- Совокупность измеренной зависимости $\frac{dE}{dx}$ и p позволяет разделять частицы по массам:

$$n_\sigma = \frac{dE/dx(m1) - dE/dx(m2)}{\sigma_{dE/dx}(m1,m2)}$$

- Основная сложность заключается в точности измерения ионизационных потерь. Ионизационные потери в газах имеют ярко выраженный хвост (**распределение Ландау**)
- Хорошо подавить флуктуации удастся за счет многократных измерений. Например, для π, K и p с импульсом 50 ГэВ/с при 100 измерениях можно достичь $\frac{\sigma(dE/dx)}{dE/dx} = 2$
- Так же разрешение в газах должно улучшаться с ростом давления как $1/\sqrt{p}$, но это приводит к ограничению логарифмического роста ионизационных потерь из-за эффекта плотности.

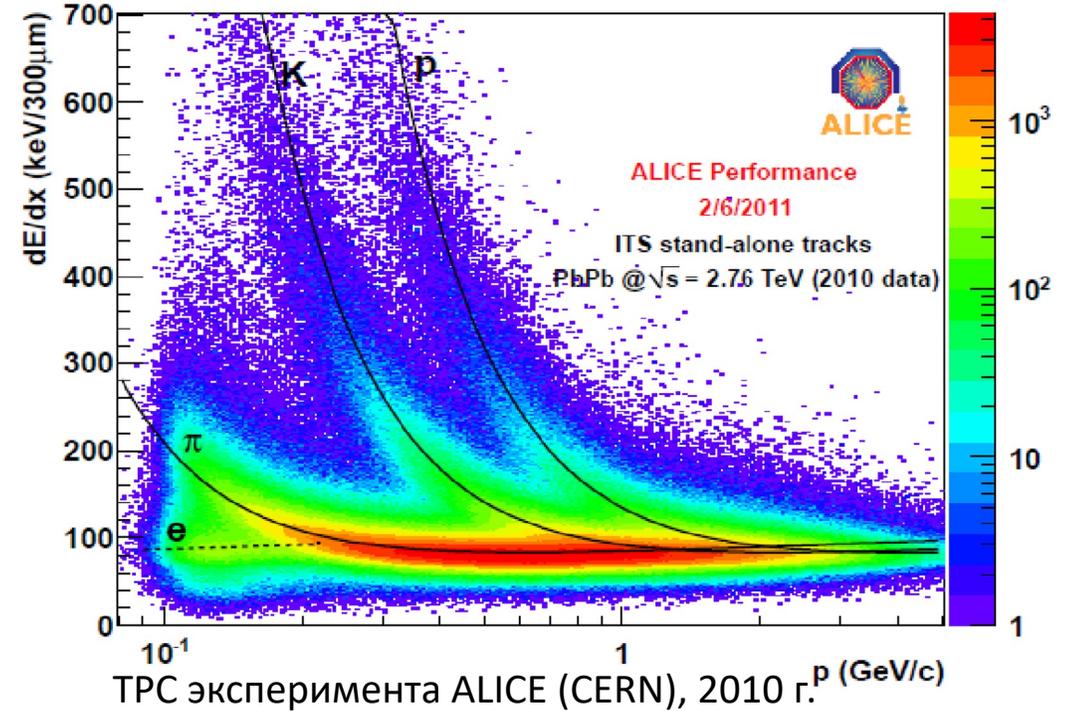


Идентификация по $\frac{dE}{dx}$ (3)



LBL TPC - 80%Ar+20%CH₄, 8.5 bars, 0.4 cm sample

LBL TPC для экспериментов на PEP (SLAC), 1990-ые гг.



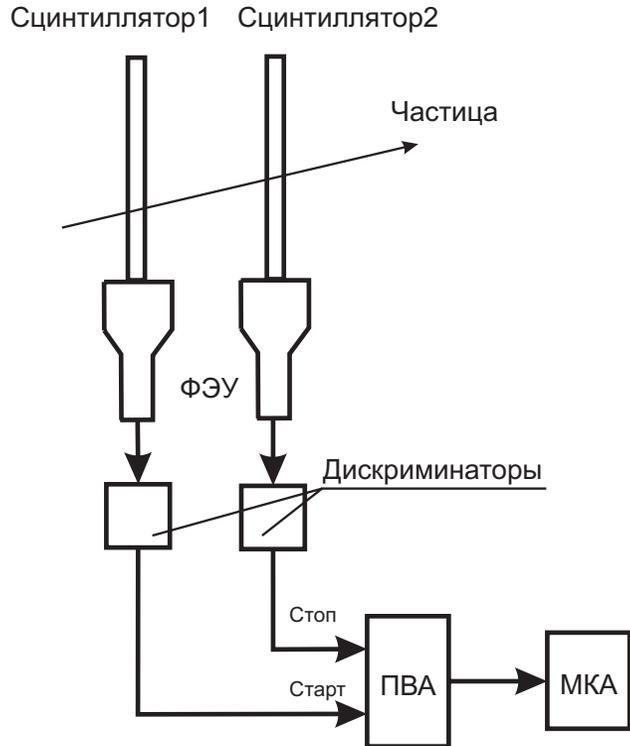
Характерное разрешение $\delta\left(\sigma_{dE/dx}\right) \sim 5 \div 7\%$

Частицы разделяются на уровне $\geq 3\sigma$ при $E \leq \left(\frac{dE}{dx}\right)_{min}$
 (примерно 600 МэВ/с для π/K и 900÷1000 МэВ/с для K/p)

N – метод статистически точнее $\delta\left(\frac{N_{clusters}}{dx}\right) \sim 2 \div 3\%$, но требует более «быстрой» электроники

Идентификация по времени пролета

Идентификация по ToF



$$m = p \sqrt{\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1}$$

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{m_2 c^2}{pc}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{m_1 c^2}{pc}\right)^2} \right)$$

$$\frac{dm}{m} = \sqrt{\gamma^4 \left(\frac{dt}{t} + \frac{dL}{L}\right)^2 + \left(\frac{dp}{p}\right)^2}$$

Принцип методики
Time of Flight (ToF)

Например:

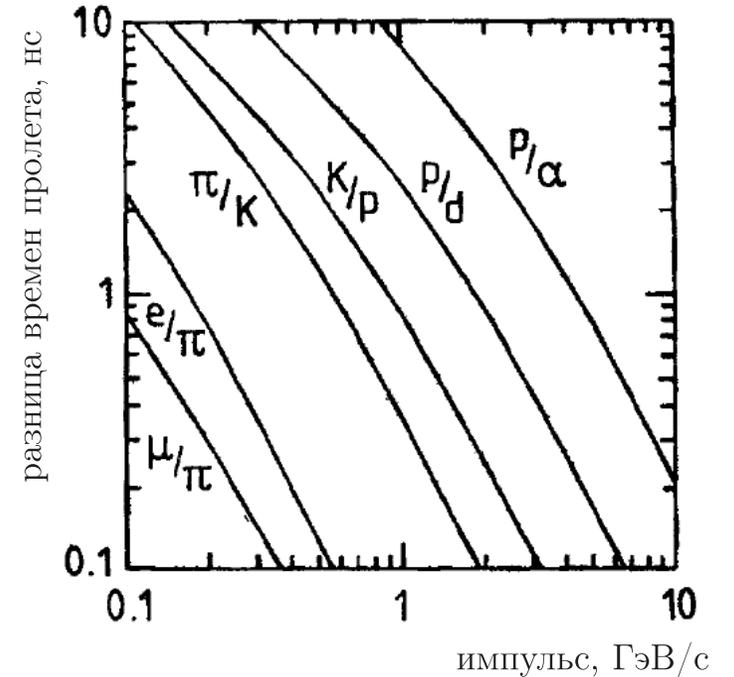
$$n_\sigma(\pi/K) \geq 3$$

при

$$\sigma_t = 100 \text{ пс}$$

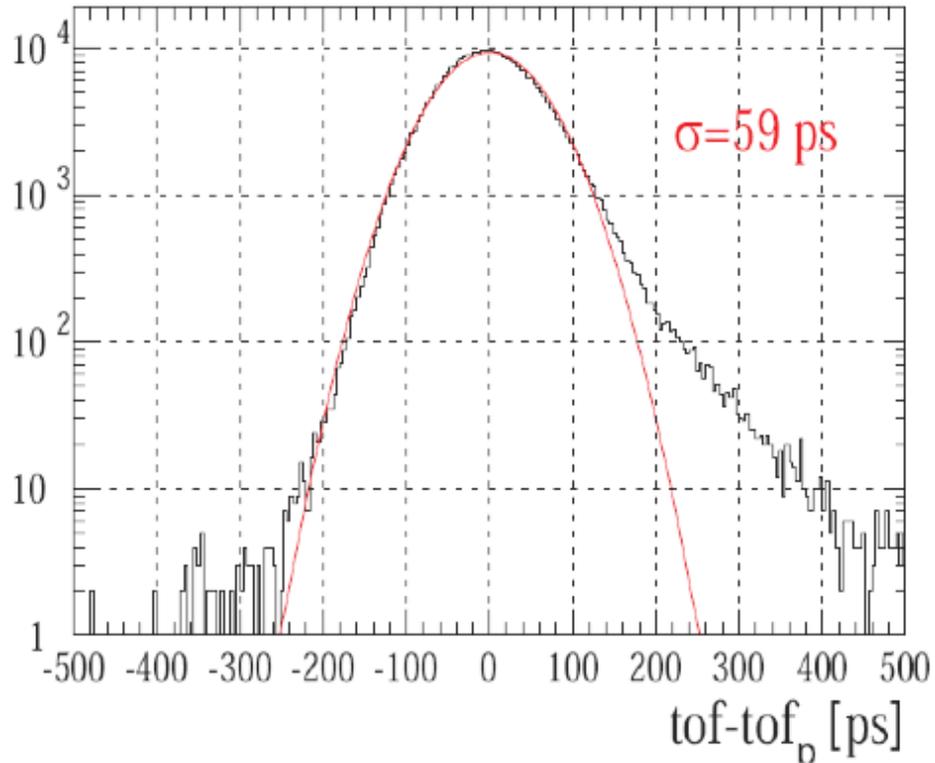
$$L = 3.5 \text{ м}$$

До $p = 2.1 \text{ ГэВ/с}$

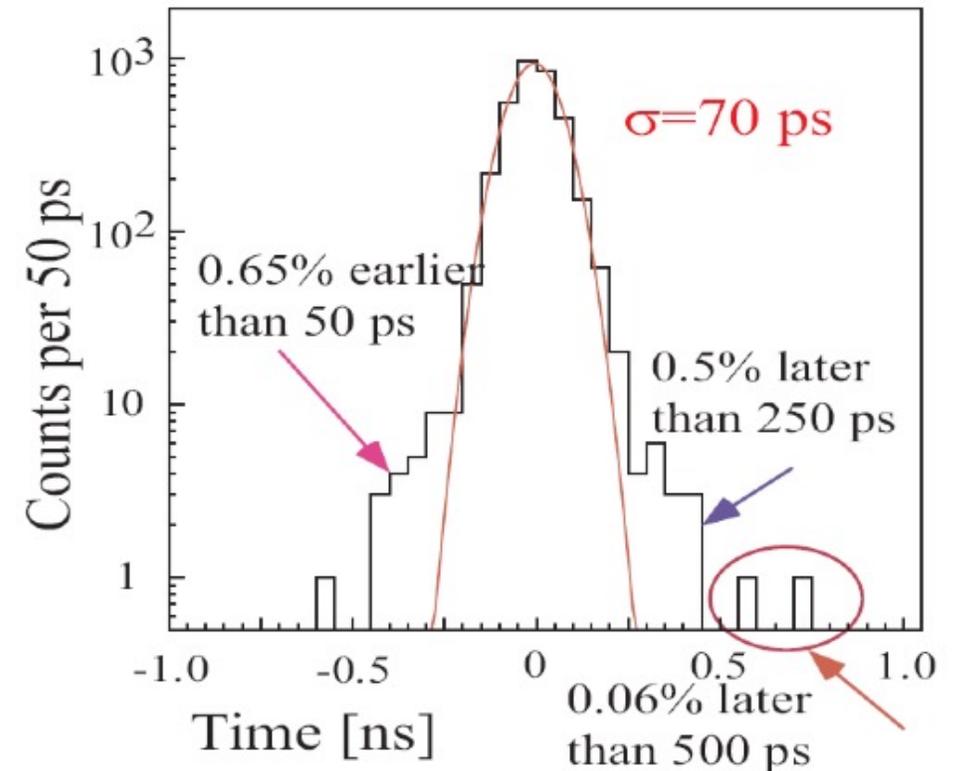


Разница времени пролета частиц
на длине в 1 м

Идентификация по ToF (2)



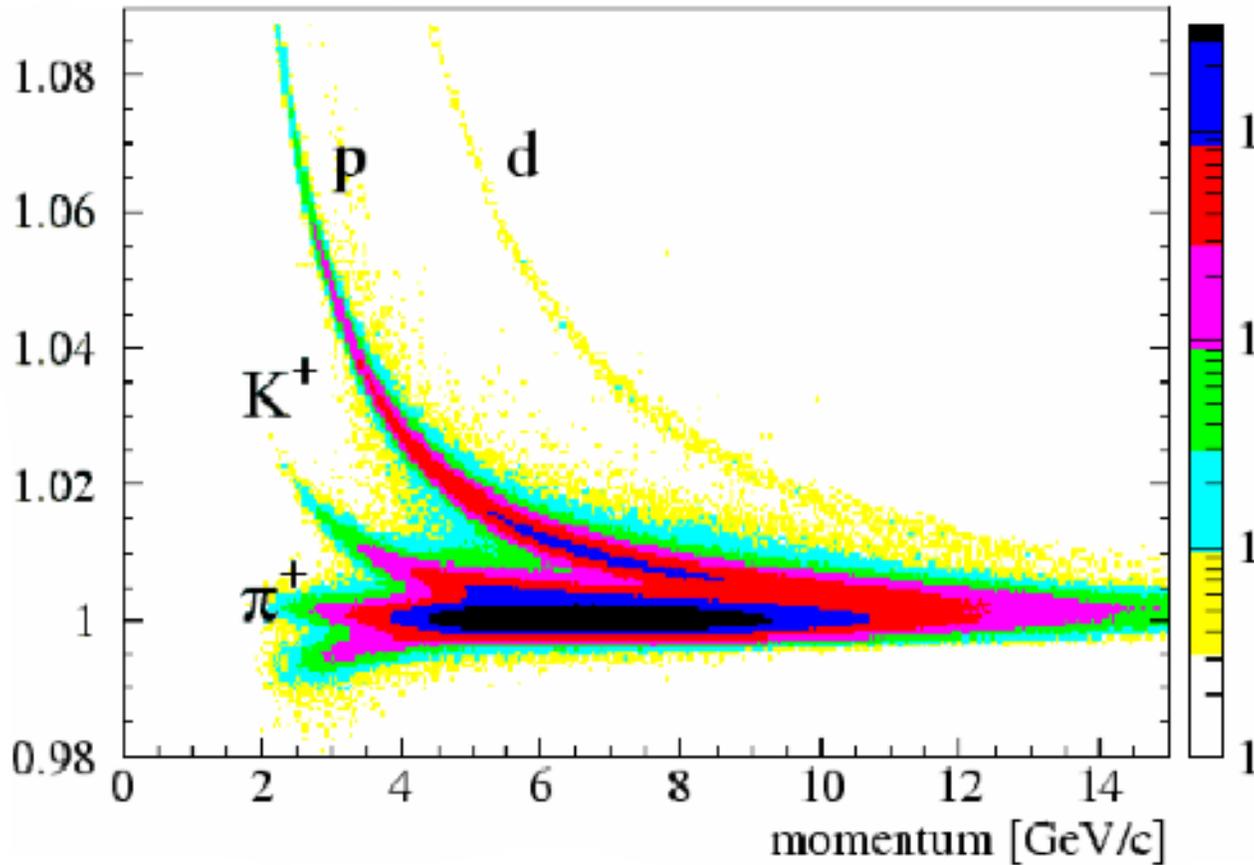
ToF на скнтилляторах в эксперименте NA49 (CERN)



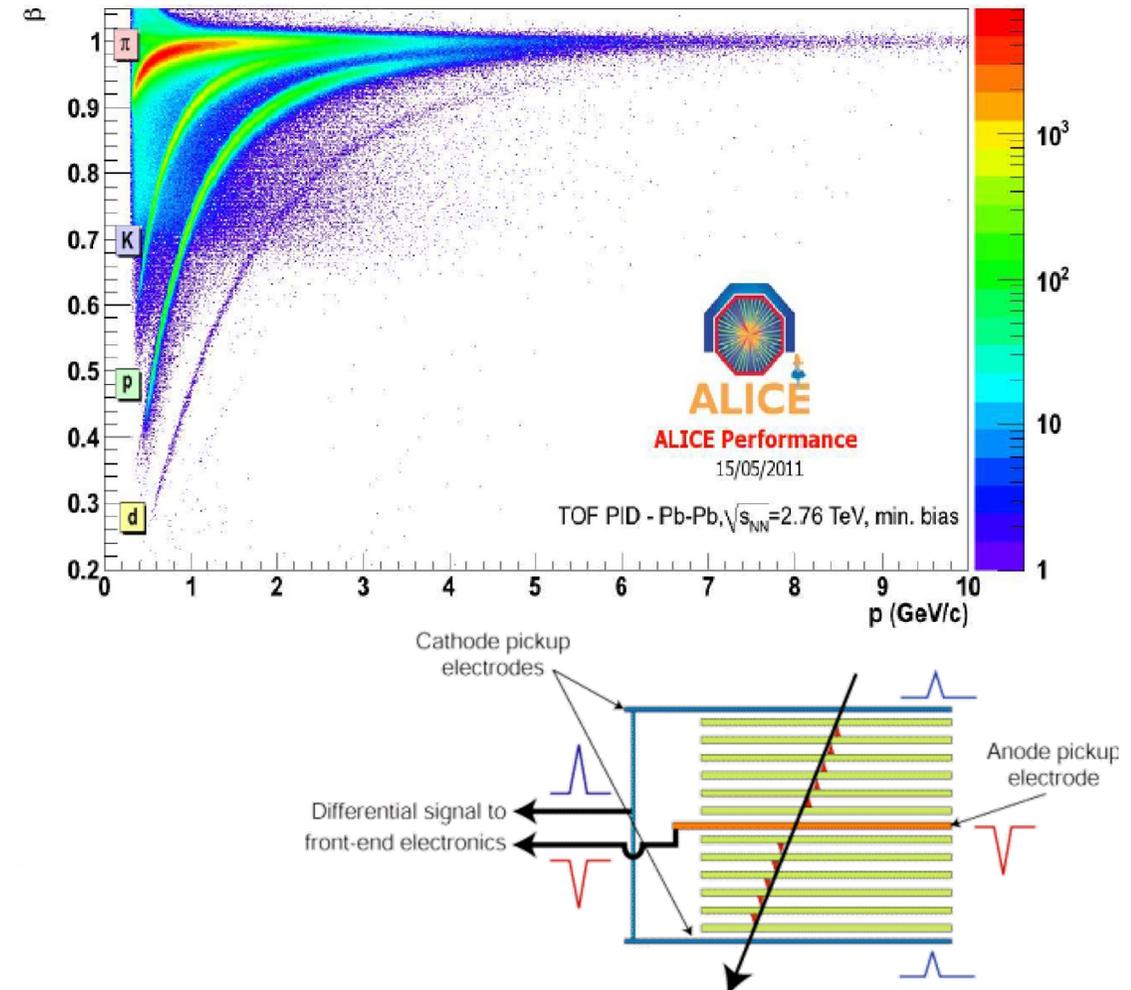
Временной спектр плоской искровой камеры L=1.2 м

Рекордное временное разрешение $\sigma_t = 5 \text{ пс}$ получено на черенковском кварцевом радиаторе с ФЭУ на основе МКП

Идентификация по ToF (3)



ToF-PID на сцинтилляторах в эксперименте NA49 (SPS-CERN)



ToF-PID на MRPC в эксперименте ALICE (LHC-CERN)

Идентификация по ToF (4)

- В экспериментах на встречных пучках существует ряд ограничений:
 - Существенно ограничена база $L = 1 \div 2$ м
 - Точность t_0 (время взаимодействия частиц) определяется параметрами пучка $l_{bunch} = 5 \div 10$ мм $\rightarrow \sigma_{t_0} = 15 \div 30$ пс
 - Калибровка и стабилизация временных сдвигов и задержек в цепи электроники с точностью ~ 10 пс в течение эксперимента.
- В экспериментах с длинными пучками и большой множественностью взаимодействия техника ToF применяется для, так называемой «4D реконструкции».

Например, для фазы HL-LHC ожидается 200 вершин взаимодействий на каждое столкновение при длине пучка ~ 10 см.

Требуется измерение времени пролета частиц с точностью ~ 30 пс, чтобы обеспечить эффективность реконструкции событий в детекторах ATLAS и CMS на уровне 80÷90%. Сегодня активно разрабатываются такие системы ToF с суммарной площадью ~ 40 м².

Идентификация по Черенковскому излучению

Черенковское излучение: основные свойства

1934 г.



- Возникает в среде с $n > 1$, при условии, что $v > \frac{c}{n}$
- Направленность и интенсивность ЧИ зависит от скорости частицы
- Интенсивность ЧИ квадратично зависит от заряда частицы (z^2)
- Практически отсутствует время высвечивания
- **Относительно низкая интенсивность**
- **100% линейная поляризация**

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$
$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right)$$

В оптическом диапазоне $\lambda = 400 \div 700$ нм и $z = 1 \rightarrow \frac{dN}{dx} = 490 \cdot \sin^2 \theta_0$ [см⁻¹]

Радиаторы черенковского излучения

- π - и K - мезоны при импульсах $P \leq 0.6$ ГэВ/с можно надежно разделять (на уровне $\geq 3\sigma$) при помощи методик $\frac{dE}{dx}$ и ToF
- Для надежного π/K -разделения в области импульсов $0.6 \div 10$ ГэВ/с наиболее успешно применяются системы идентификации на основе черенковских счетчиков (детекторов).

	n	$P_\pi, \text{MeV}/c$	$P_K, \text{MeV}/c$
Fused silica	1.458	132	465
Water	1.33	159	563
Freon 114, 1 atm	1.0014	2640	9330
CO ₂ , 1 atm	1.00043	4760	16800
CO ₂ , 10 atm	1.0043	1500	5320
C ₂ H ₄ , 25 atm	1.02	600	2460
Aerogel (SiO₂)	1.006 ÷ 1.25	190 ÷ 1250	660 ÷ 4500

В экспериментах на встречных пучках используется два типа черенковских счетчиков: **пороговые** и **детекторы черенковских колец** (ДЧК или RICH в англ. литературе)

Пороговые черенковские счетчики

- Более легкая частица m_1 излучает ЧИ в радиаторе с показателем преломления n , а более тяжелая m_2 – нет.

$$\beta_2 = \frac{1}{n} \quad \text{или} \quad \gamma_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}$$

Необходимый показатель преломления:

$$n^2 = \frac{\gamma_2^2}{\gamma_2^2 - 1}$$

При этом более легкая частица излучает примерно $490 \cdot \sin^2 \theta_0$ [см⁻¹]

$$\sin^2 \theta_0 = 1 - \cos^2 \theta_0 = 1 - \frac{1}{n\beta_1} = \frac{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}{(\gamma_1^2 - 1)\gamma_2^2} = \left| \text{при } \gamma_1^2 \gg 1 \right| = \frac{1}{\gamma_2^2} - \frac{1}{\gamma_1^2}$$

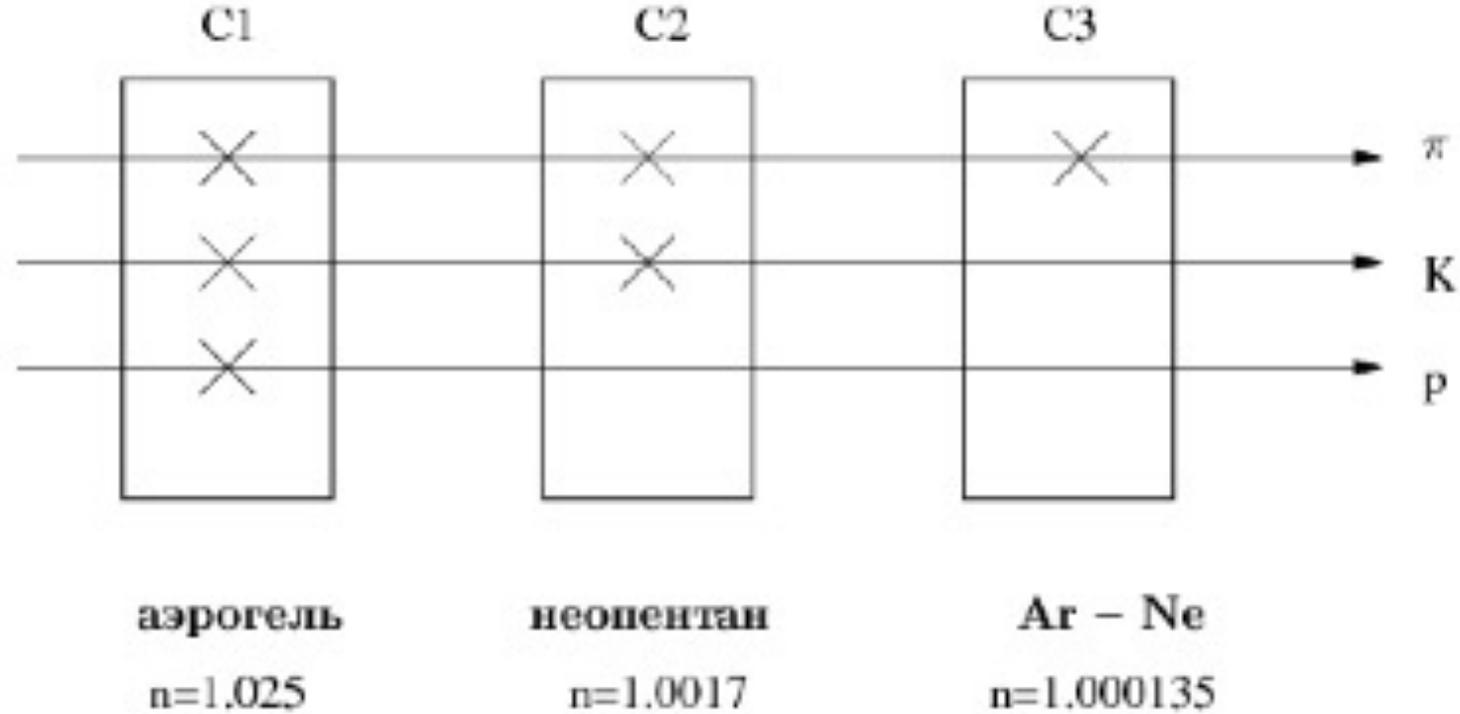
Если учесть, что $p_1 = p_2 = p$, а $E \approx pc$, то

$$\frac{dN}{dx} = 490 \cdot \frac{c^2}{p^2} (m_2^2 - m_1^2) [\text{см}^{-1}]$$

При толщине радиатора t , квантовой эффективности q и эффективности светосбора ε

$$N_{\text{фэ}} = 490 \cdot \frac{c^2}{p^2} (m_2^2 - m_1^2) \cdot t \cdot q \cdot \varepsilon \quad \text{или} \quad t = \frac{N_{\text{фэ}}^0 p^2}{490 \cdot c^2 (m_2^2 - m_1^2) \cdot q \cdot \varepsilon} [\text{см}]$$

Иллюстрация принципа использования пороговых счетчиков



При $p = 10$ ГэВ/с

- Пион ($m_{\pi} = 140 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$) выше порога (излучает ЧИ) во всех счетчиках
- Каон ($m_K = 494 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$) дает сигнал в аэрогелевом и неопентановом счетчике
- Протон ($m_p = 938 \frac{\text{МэВ}}{c^2}$) дает сигнал только в аэрогелевом счетчике

Первый черенковский счетчик на встречных пучках (ВЭПП-2)

- 1970 год — эксперимент на ВЭПП-2, были обнаружены многоадронные события — одно из первых наблюдений легких кварков.

- Эксперимент ставился для такой задачи:

$$e^+e^- \rightarrow \begin{matrix} \pi^+\pi^- \\ K^+K^- \end{matrix}$$

- Максимальная энергия в пучке 700 МэВ.

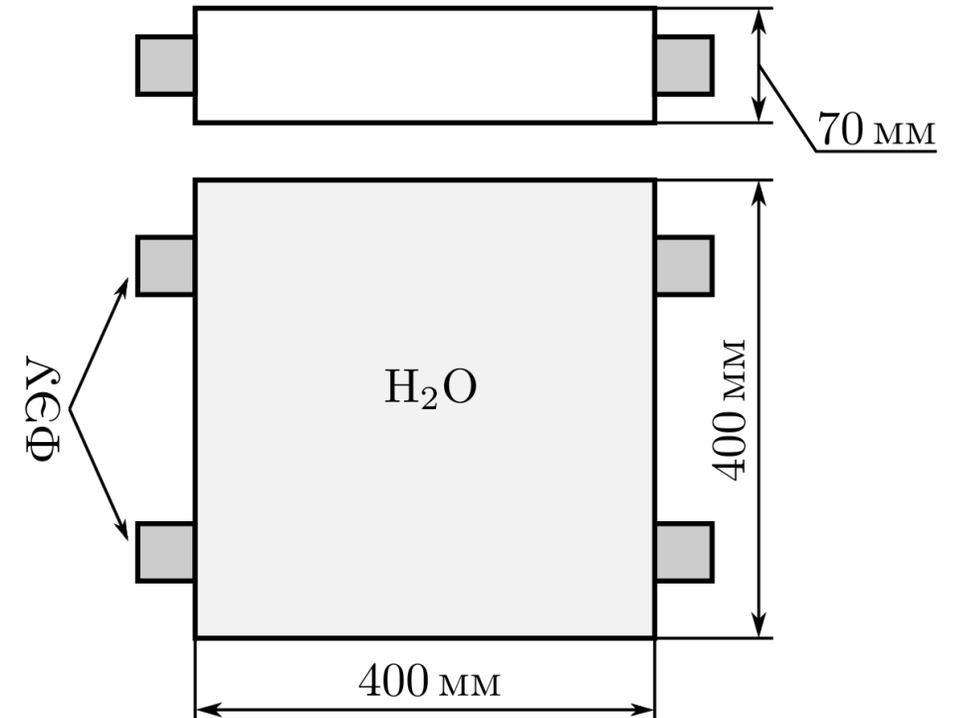
- В качестве радиатора была выбрана вода:

$$n = 1.33, \beta_{кр} = 0.75.$$

$$E_{пор}(\pi) = 210 \text{ МэВ}, E_{пор}(K) = 760 \text{ МэВ}.$$

$$\varepsilon_{\pi} = 99.3 \pm 0.4\%$$

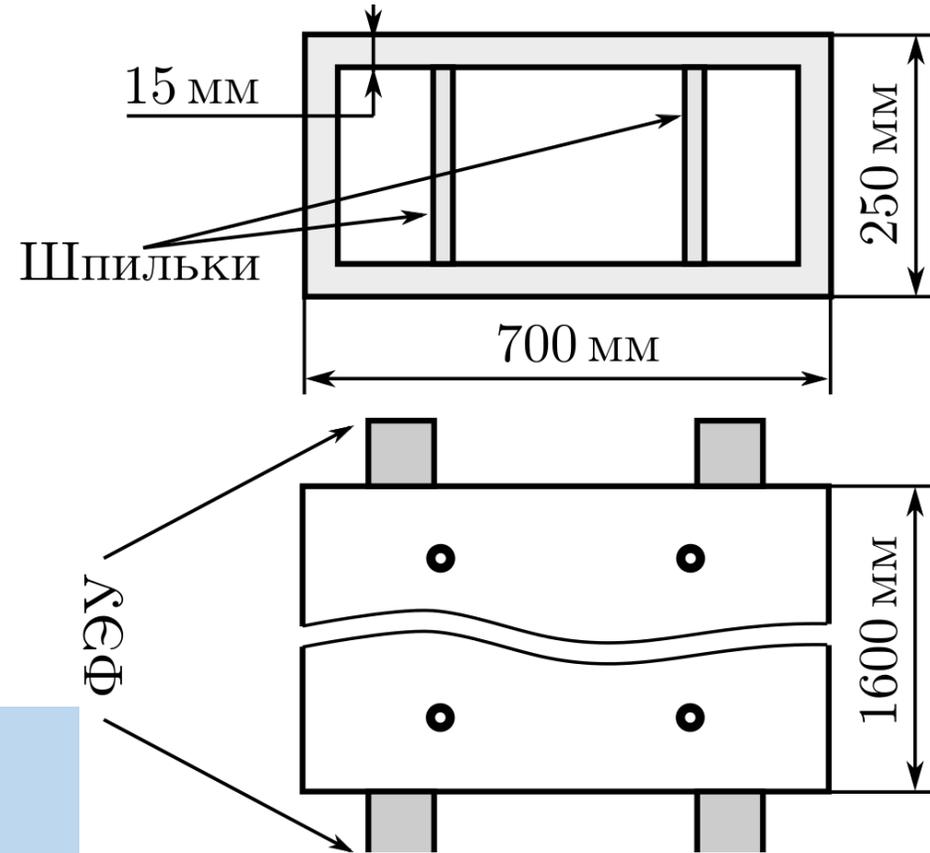
$$\varepsilon_{K \rightarrow \pi} \leq 1\% \quad \text{при } E = 590 \div 630 \text{ МэВ}.$$



Два счетчика 400 × 400 × 70 мм.
Стенки покрашены белой краской.
ЧИ собирается четырьмя ФЭУ-30

Газовый пороговый черенковский счетчик детектора МД-1 (ВЭПП-4)

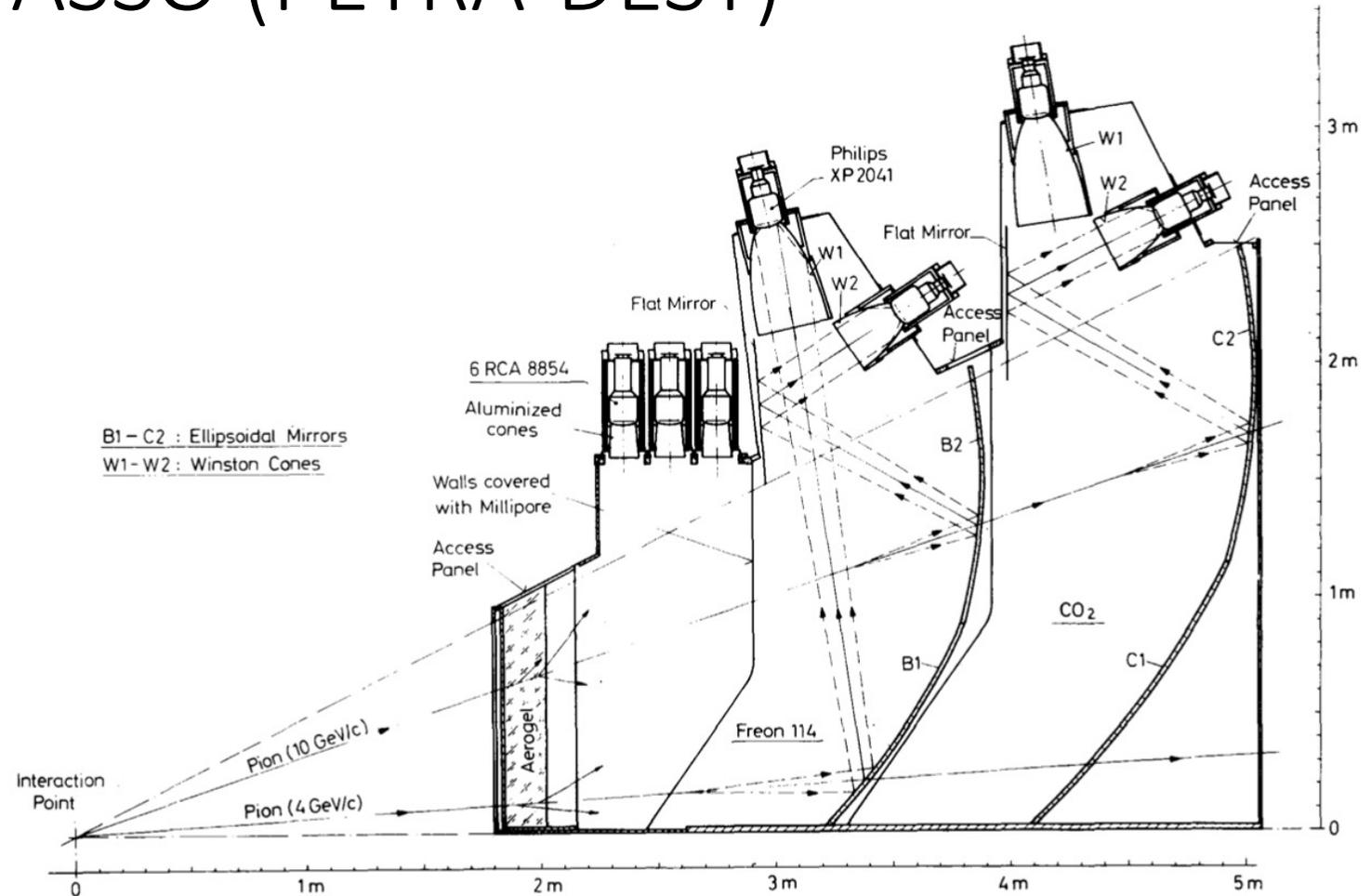
- Эксперимент МД-1 (1980-1985гг.) в области Υ -мезонов
- π/K -разделение при $E = 0.7 \div 2.5$ ГэВ
- $n = 1.02$ (C_2H_4 – 25 атм.)
 $\varepsilon_\pi = 95\%$
 $\varepsilon_{K \rightarrow \pi} = 7\%$ при $P = 2$ ГэВ/с.



- Восемь счетчиков 1600 × 700 × 250 мм.
- 60% телесного угла
- ЧИ собирается четырьмя ФЭУ 58DVP ($\varnothing_{\text{ФК}}=150$ мм)

Первый аэрогелевый черенковский счетчик на встречных пучках: TASSO (PETRA-DESY)

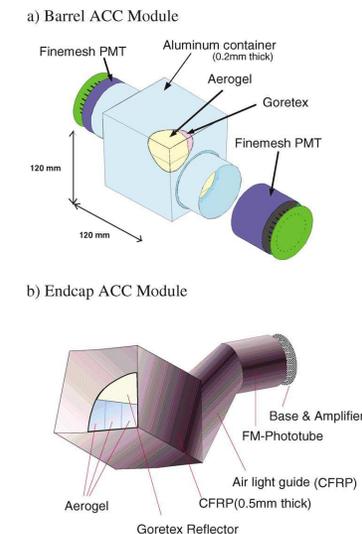
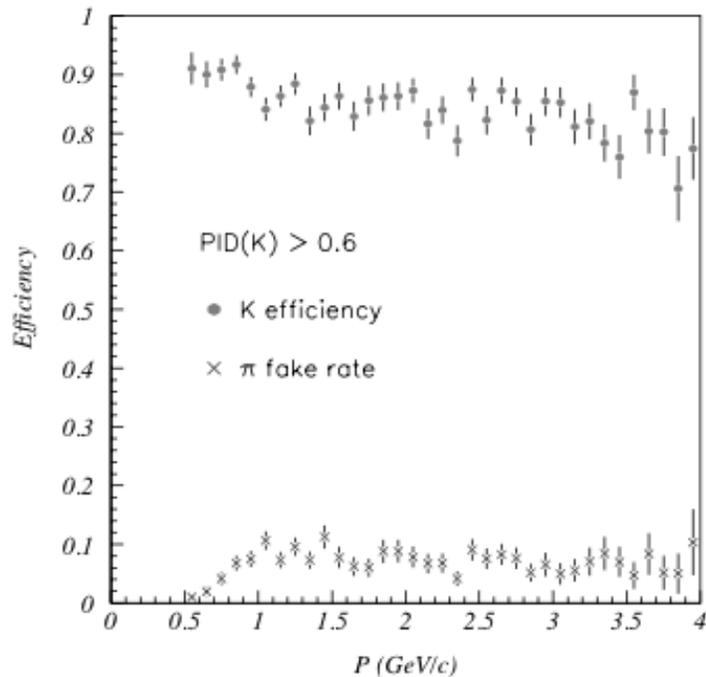
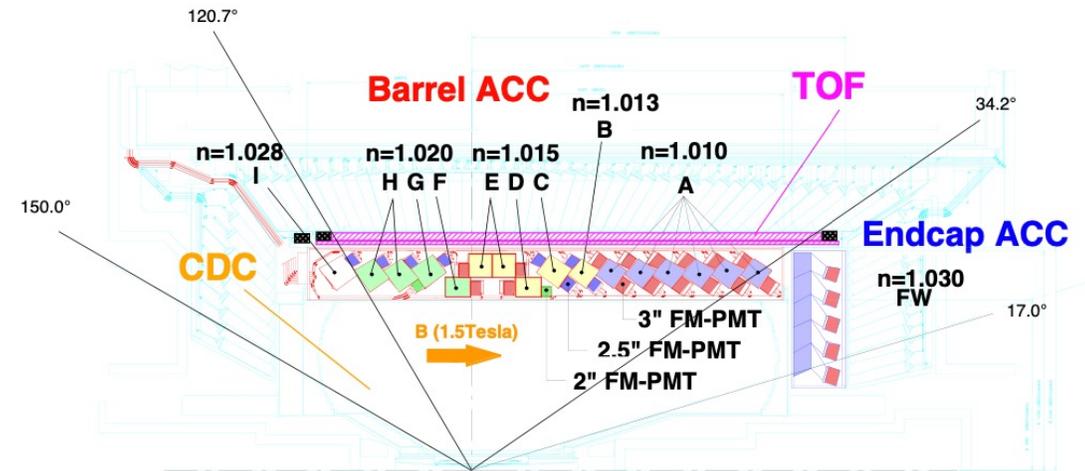
- π/K – разделение $P = 0.6 \div 16.9$ ГэВ/с
- **1976** – начало разработки
- Три радиатора:
 - Фреон-114 ($n=1.0014$)
 - CO_2 ($n=1.00043$)
 - Аэрогель SiO_2 ($n=1.025$)
- 32 счетчика с объемом аэрогеля $0.35 \times 1.0 \times 1.5$ м ($V_\Sigma = 2000$ л; $S_\Sigma = 12$ м²)
- 6 ФЭУ (RCA Quantacom) $\varnothing \Phi K = 15$ см
- $L_{SC}(436 \text{ нм}) = 2.4$ см; $t_{a\text{эп}} = 13.5$ см
 - $N_{\text{фэ}}(\text{аэрогель}) = 3.9 - \varepsilon_\pi = 98\%$
 - $N_{\text{фэ}}(\text{фреон}) = 20$
 - $N_{\text{фэ}}(\text{CO}_2) = 8 - \varepsilon_\pi = 99 \pm 1\%$



Экспериментальное открытие глюона

Аэрогелевые черенковские счетчики эксперимента Belle (КЕКб)

- 1994 – система Аэрогелевых черенковских счетчиков утверждена как базовая PID опция эксперимента Belle
- 1124 счетчиков с 2024 ФЭУ Fine Mesh (2, 2.5, 3 inch)
- $n=1.01-1.03$, $V_{\Sigma}=2000$ л, высоко-прозрачный аэрогель
- $N_{\text{ФЭ}} = 20-26(!)$
- Проработала 1998-2010



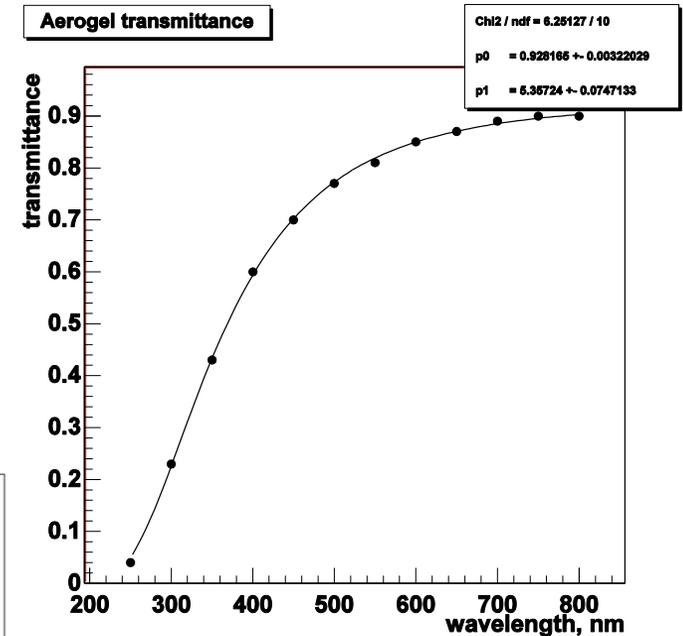
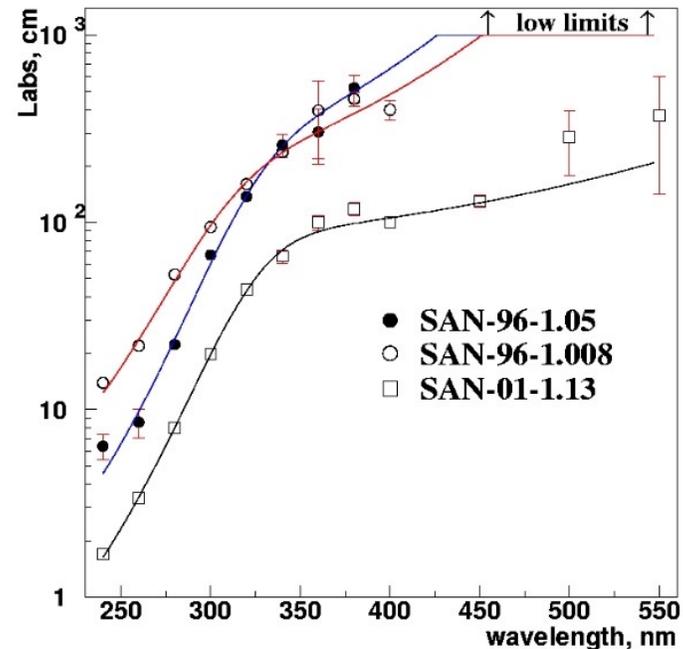
Аэрогелевые счетчики с переизлучателями (WLS=Wave Length Shifter)

- $\lambda=400$ нм
 $L_{sc} \sim 40$ мм, $L_{abs} \sim 4-5$ м
- $\lambda=300$ нм
 $L_{sc} \sim 12$ мм, $L_{abs} \sim 0.5-1$ м

НО Т.К. !!!

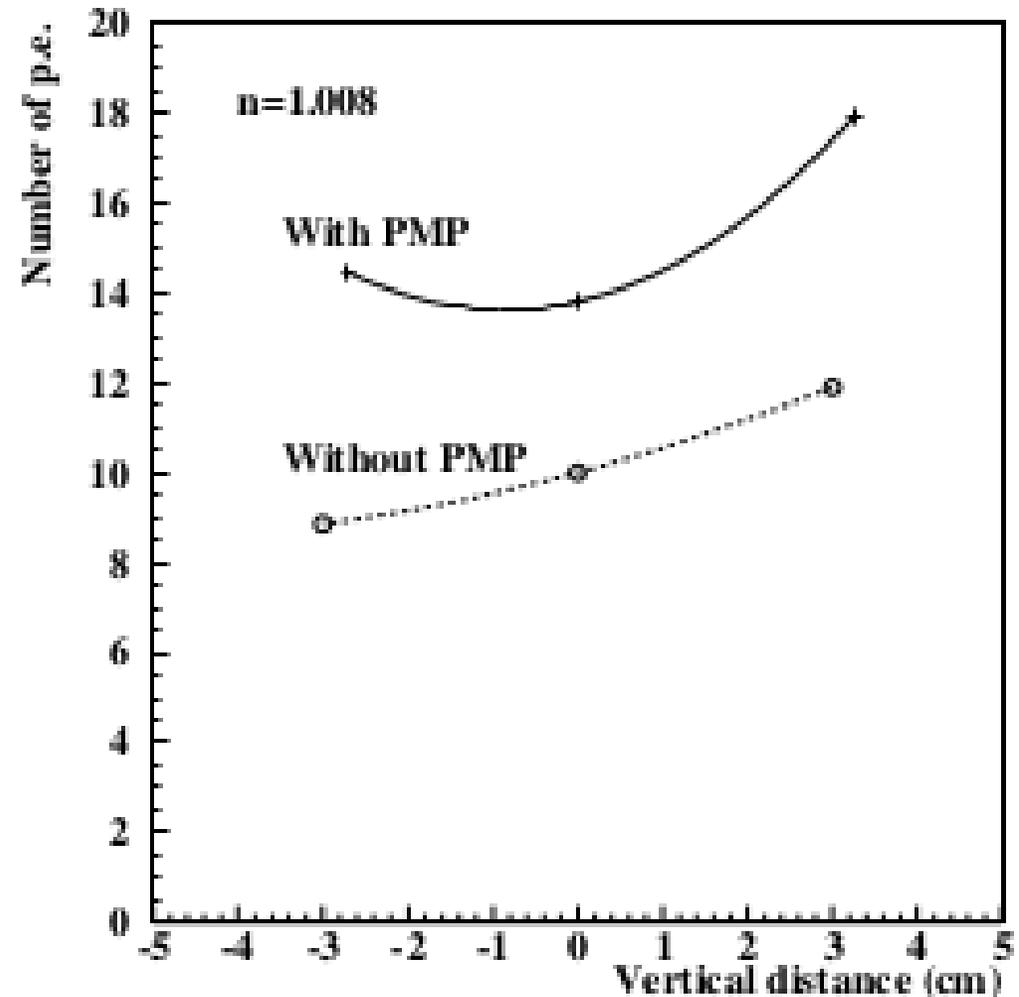
$$\frac{dN}{d\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^2} \rightarrow \frac{N_{\phi}(300 \text{ нм})}{N_{\phi}(400 \text{ нм})} \approx 3$$

- Выгодно фотоны переизлучать в длиноволновую область, где прозрачность выше!

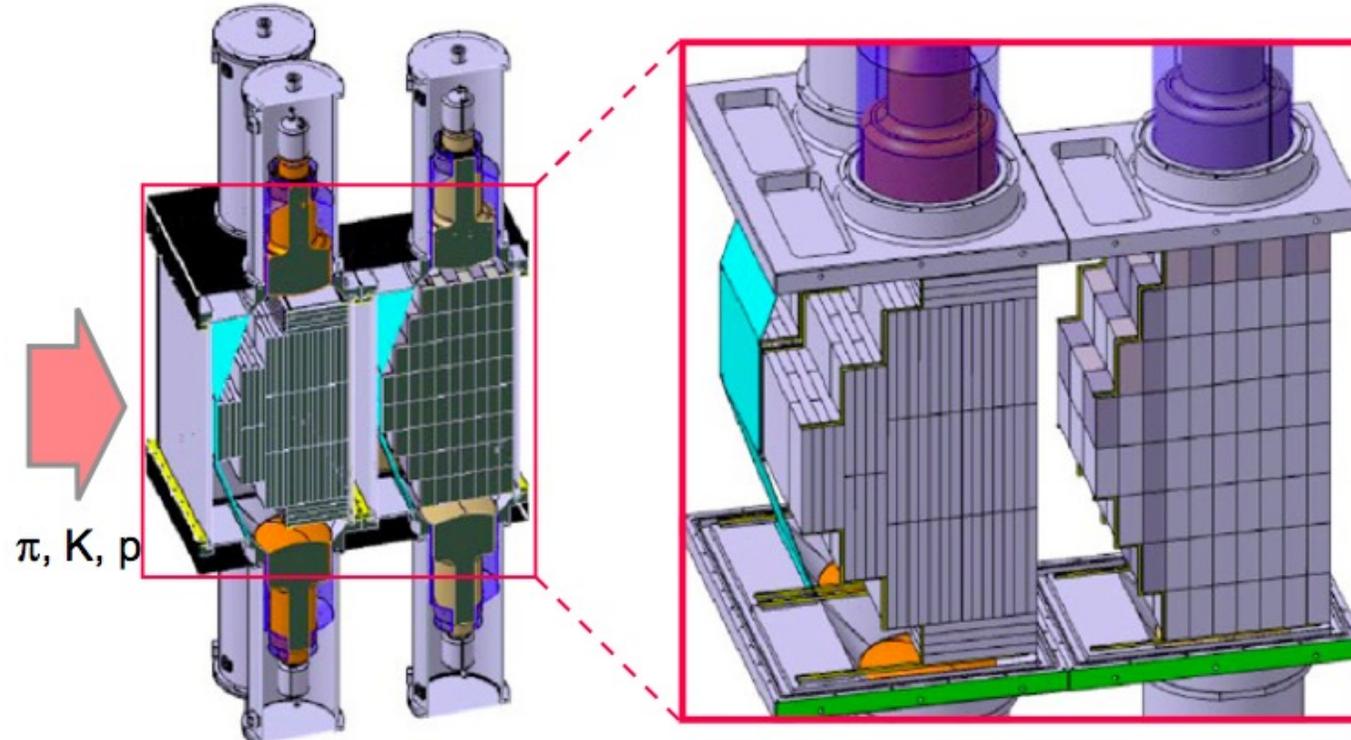


Аэрогелевые счетчики с переизлучателями (2)

- Примеры аэрогелевых счетчиков с переизлучателями:
 - Прототип аэрогелевого счетчика для детектора ВаBar – применялся ПТФЭ отражатель, насыщенный PMP (Фенил-Метил-Пирозолин)
 - AMS-01 – применялся отражатель Tedlar (25 μm), вымоченный в PMP \rightarrow Очень быстрая деградация $N_{\text{фэ}} = 5 \rightarrow 1.5$ ($n=1.035$)
 - DIRAC – использует тефлоновые пленки покрытые p-терфенилом. Дало повышение на 50% светосбора, но так же на 40% выросла допороговая эффективность. $N_{\text{фэ}} = 4$ ($n=1.008$)
- Во всех этих детекторах переизлученный свет возвращается в аэрогель!



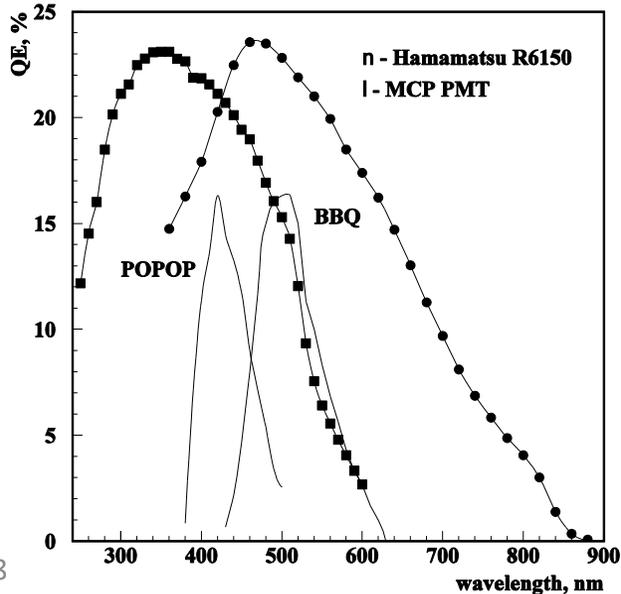
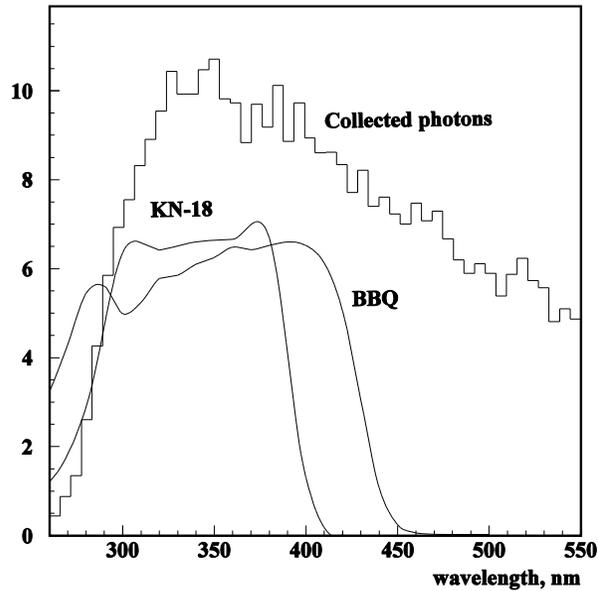
Experiment DIRAC-II (PS-CERN)



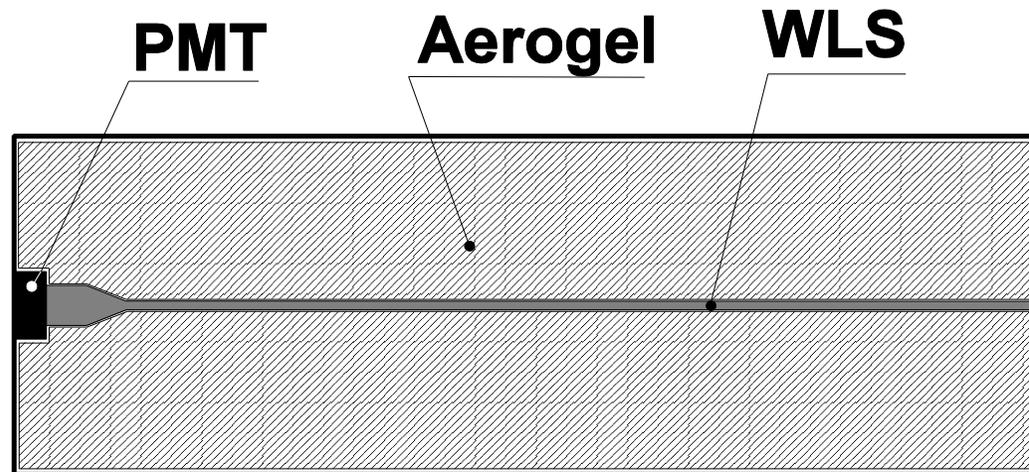
- $\pi/K/p$ – separation in momenta range from 4 to 8 GeV/c
 - Aerogel $n=1.015$ – K/p – separation 4-5.5 GeV/c – 2 modules (2x12 liters) - (Matsushita)
 - Aerogel $n=1.008$ – K/p – separation 5.5-8 GeV/c – 1 modules (1x12 liters) - (Novosibirsk)
- WLS based on Teflon foils coated with p-terphenyl → Светосбор вырос на 50%, но и допороговая эффективность стала 40%

Y.Alkofer et al., "A new aerogel Cherenkov detector for DIRAC-II", NIM A595 (2008) 84

АШИФ счетчики



Аэрогель ШИФтер и Фотоприемник

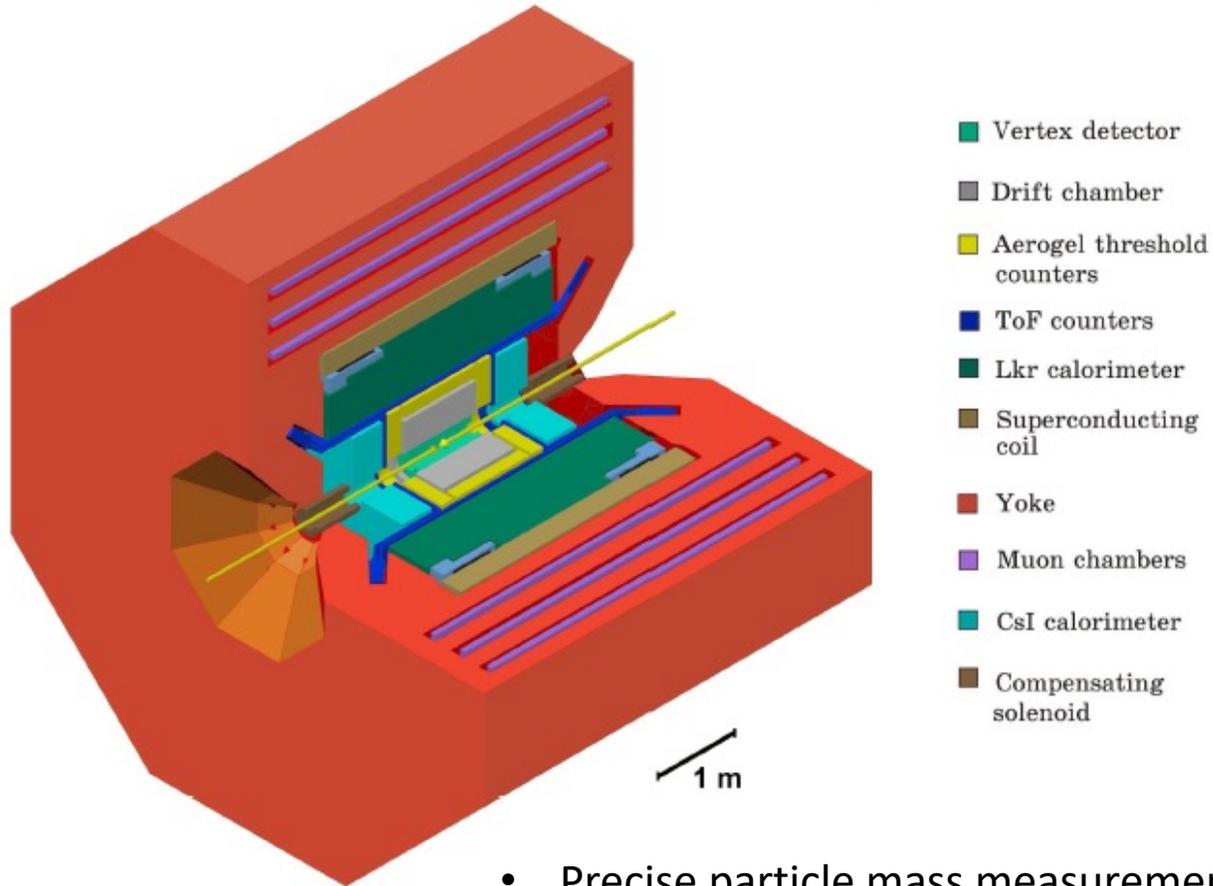


ПММА пластина с добавкой BBQ работает, как световод со спектрсмещением.

Предложено в ИЯФ СО РАН. А.Онухин et.al. NIM A315(1992)517



КЕДР эксперимент – ВЭПП-4М



- Vertex detector
- Drift chamber
- Aerogel threshold counters
- ToF counters
- Lkr calorimeter
- Superconducting coil
- Yoke
- Muon chambers
- CsI calorimeter
- Compensating solenoid

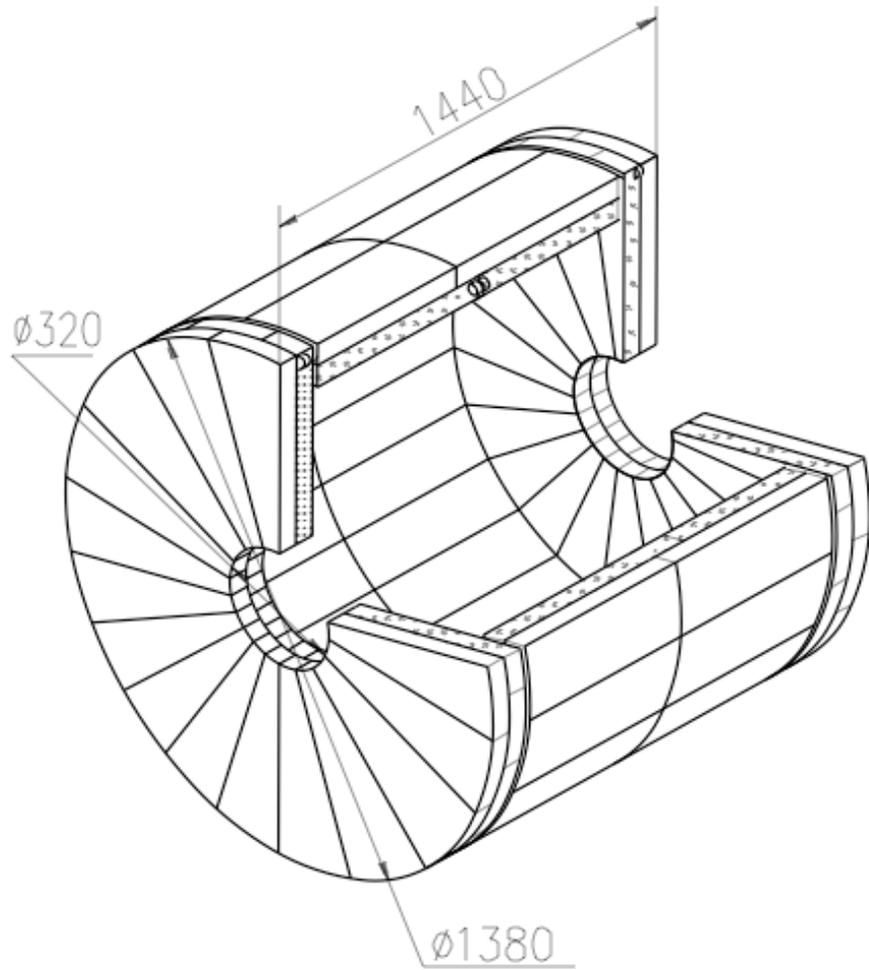
VEPP-4M

- Symmetric e^+e^- collider
- $E_{c.m.} = 2-10$ GeV
- $L = (1\div 80) \times 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Precise energy calibration:
RD: $(5\div 15) \times 10^{-6}$
CBS: 3×10^{-5}

Physics program

- Precise particle mass measurements: J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$, τ -lepton, D -mesons, Y -mesons
- Measurements of ψ - and Y - mesons lepton width
- R measurement in 2-10 GeV c.m. energy range
- $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ and other 2γ processes
- Branching fractions measurements in charm and bottom quark systems (above 10^{-4})

АШИФ система эксперимента КЕДР (ВЭПП-4М)



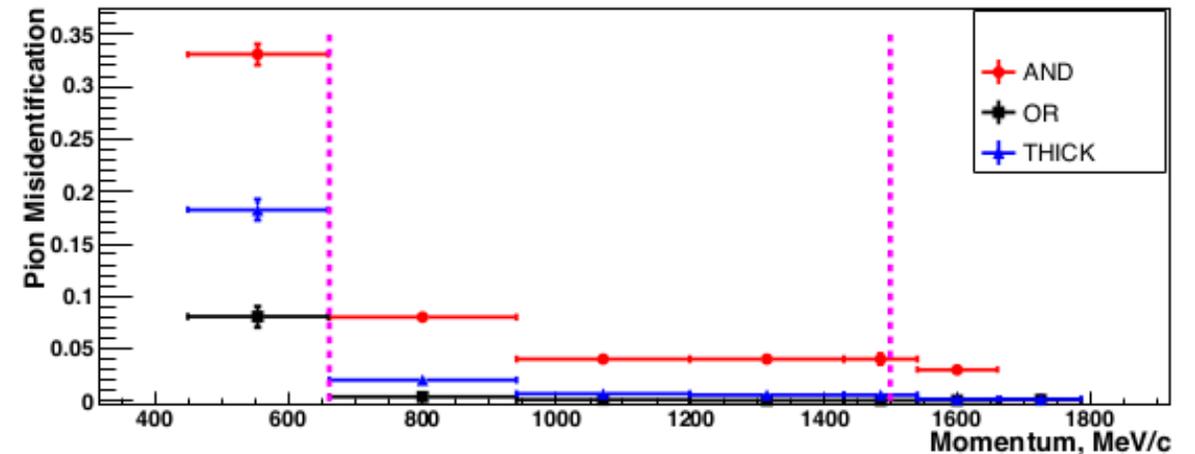
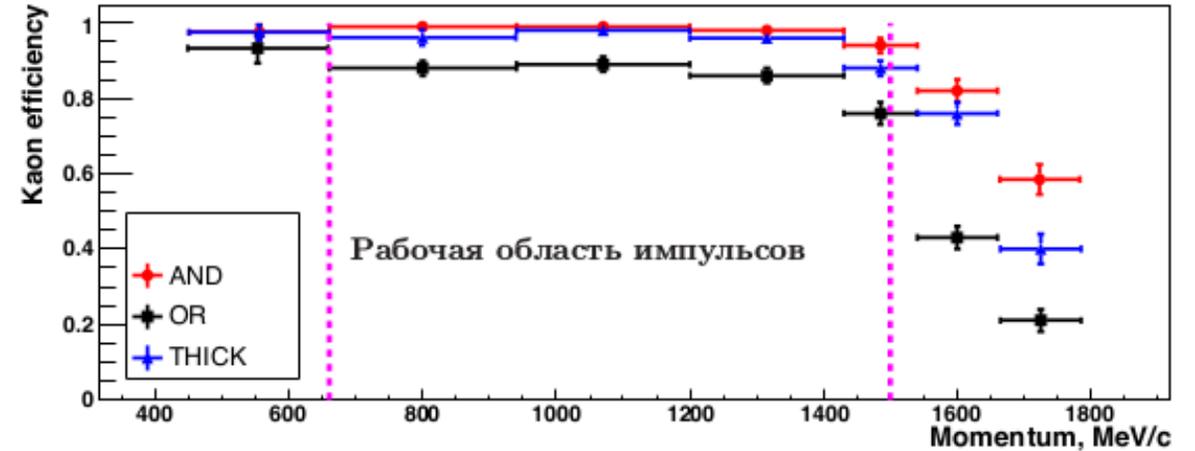
- 160 counters in 2 layers
- Solid angle 96% of 4π
- $n=1.05$, $V_{\Sigma}=1000$ l, high transparency SAN-96 aerogel
- π/K - separation in the momentum range $0.6 \div 1.5$ GeV/c
- 160 MCP PMTs, photocathode diameter $\varnothing 18$ mm, able to work in the magnetic field up to 2 T
- Fully installed in the detector in 2013. Now in operation.



АШИФ система – КЕДР (2)

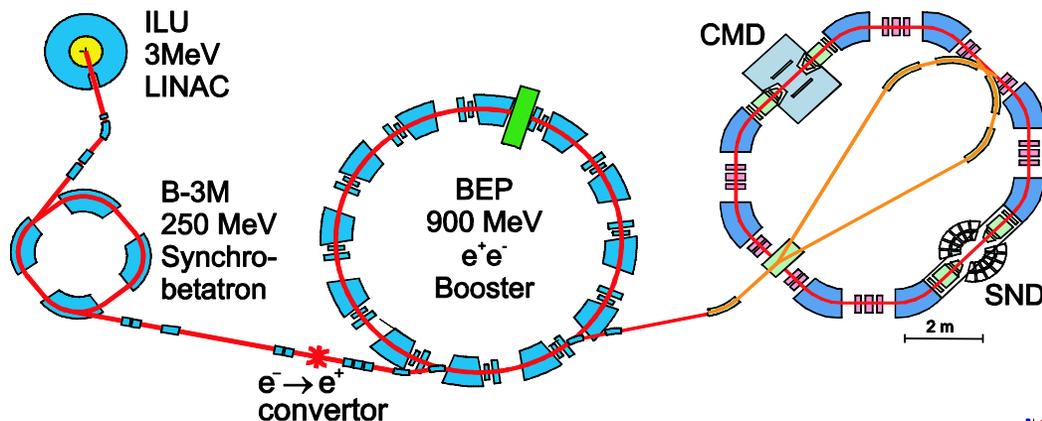
- $N_{\phi\pi} = 6.4 \pm 0.2$ – «первый» слой
- $N_{\phi\pi} = 5.0 \pm 0.2$ – «второй» слой
- $N_{\phi\pi} = 10.9 \pm 0.2$ – сумма сигналов (80% телесного угла)
- π/K -separation at 1.2 GeV/c is 4.3σ

A.Yu.Barnyakov et al., NIM A824 (2016) 79





СНД эксперимент – ВЭПП-2000



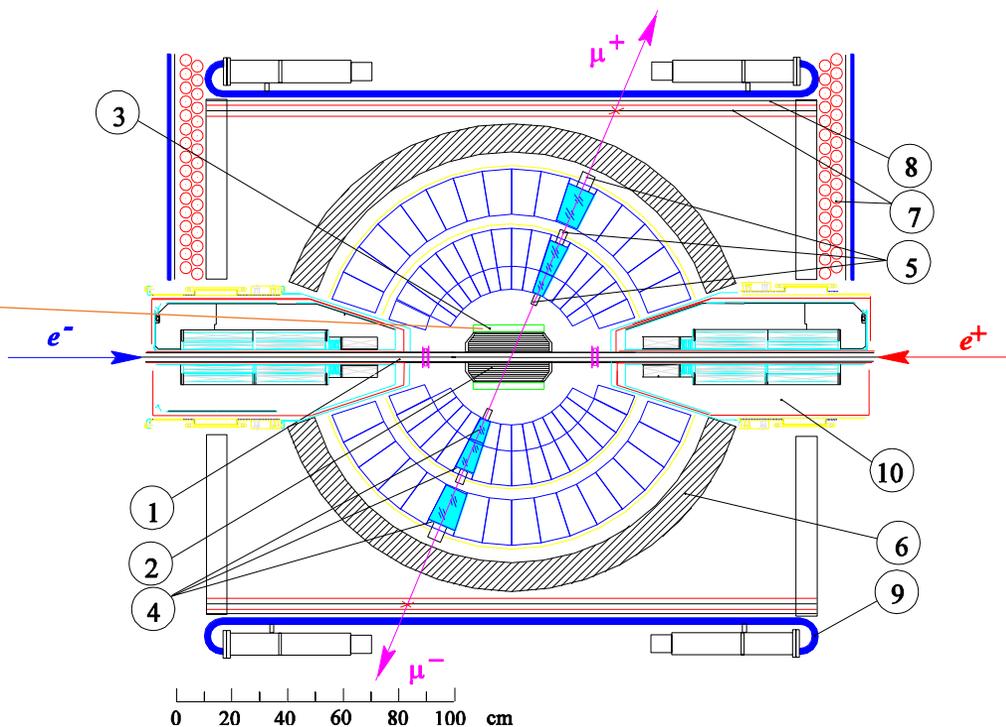
Symmetric e^+e^- collider with round beams

$$2E_{max}=2000 \text{ MeV}$$

$$L=10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ at } E=510 \text{ MeV}$$

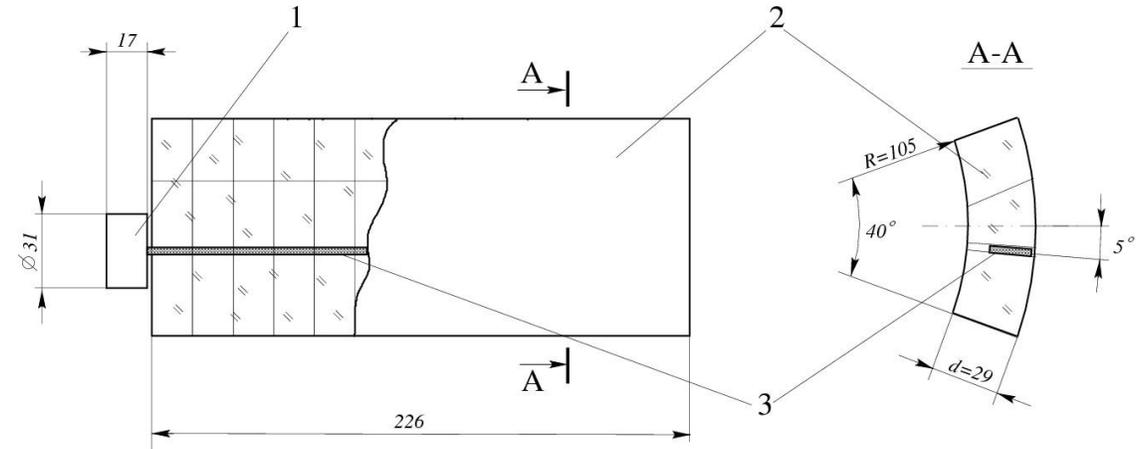
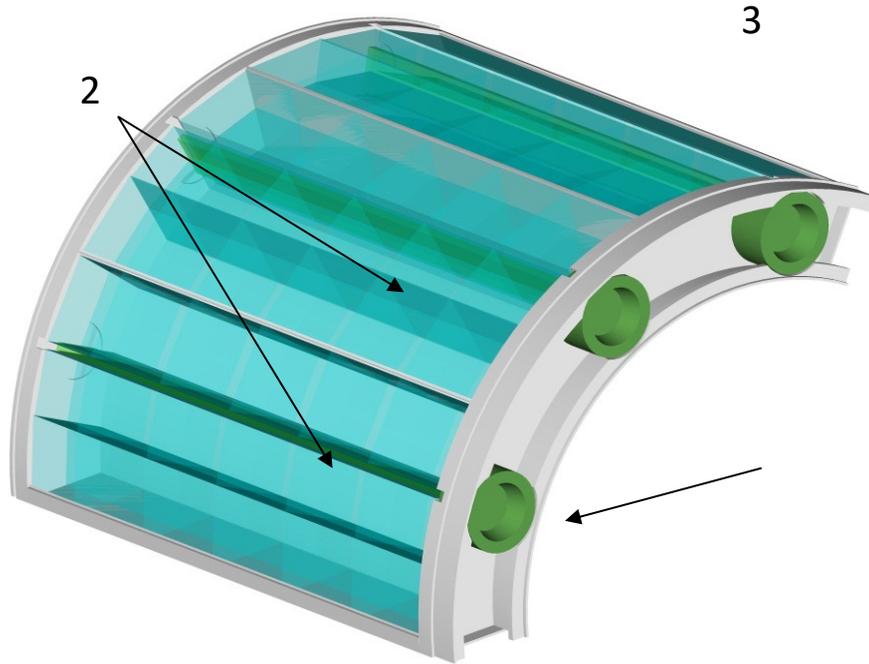
$$L=10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ at } E=1000 \text{ MeV}$$

1. VEPP-2000 beam pipe
 2. Tracking system
 3. Aerogel Cherenkov counters
 4. NaI(Tl) crystals
 5. Vacuum phototriodes
 6. Fe absorber
 7. Muon system
 8. Muon system
 9. Muon system
 10. VEPP-2000 s.c. focusing solenoids
- EMC





АШИФ система – СНД



Counter Design

- π/K separation from 300 to 870 MeV/c
- Cylindrical shape: $R=105\div 141$ mm
- Case material: 1mm of Al
- 3 segments of 3 counters in each
- Solid angle: $\sim 60\%$ of 4π
- Thickness: $0.09 X_0$

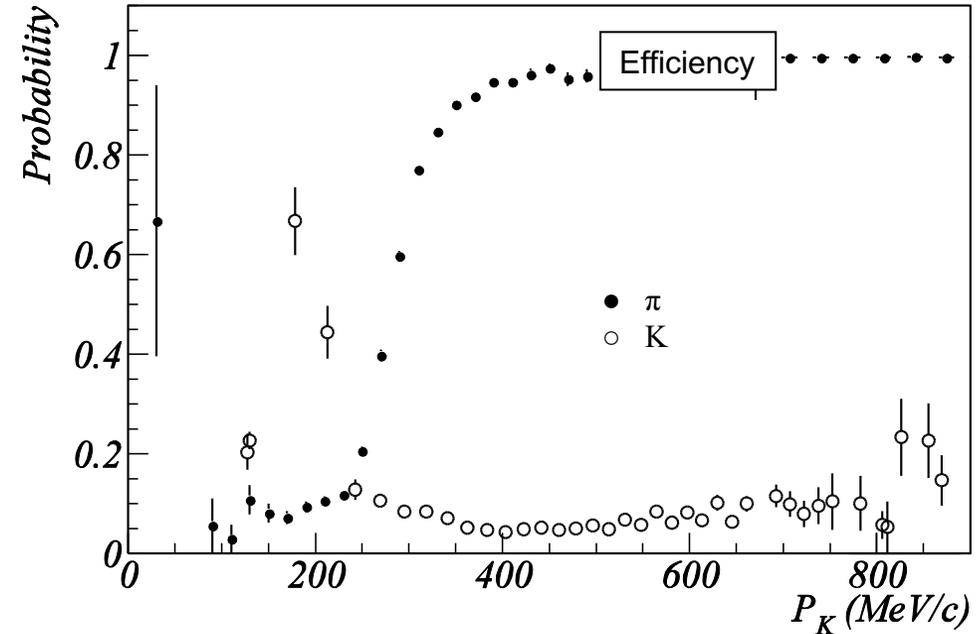
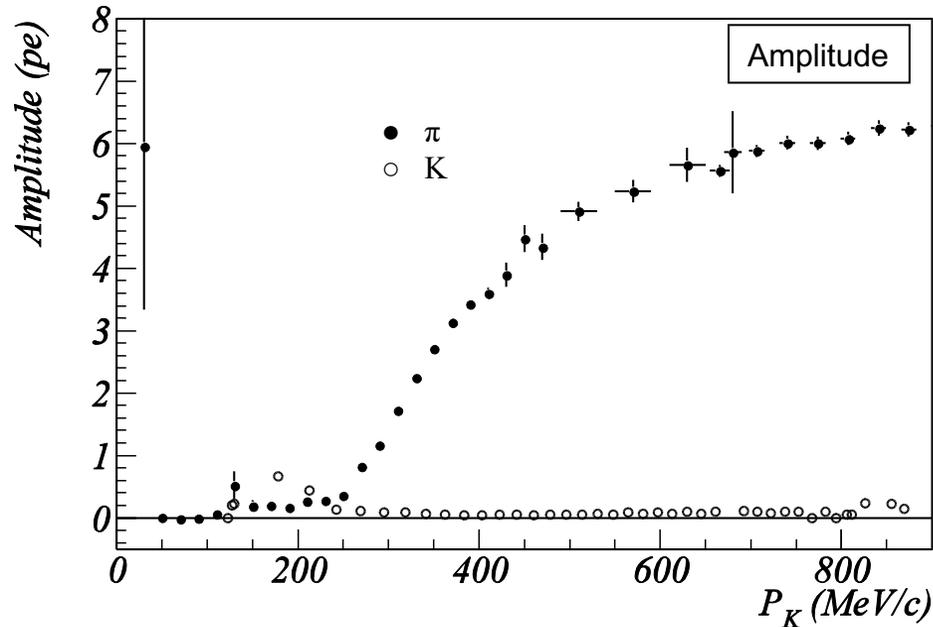
- Scheme: ASHIPH
- WLS position: displaced by $\sim 5^\circ$ from counter center
- Aerogel thickness: ~ 30 mm

Aerogel parameters

- Refraction index: $n=1.13\pm 0.01$
- Density: $\rho=0.65$ g/cm³
- $L_{sc}=19$ mm at $\lambda=400$ nm
- $L_{abs}=100$ cm at $\lambda=400$ nm



АШИФ система СВД: π/K - разделение



P, MeV/c	$\epsilon_K, \%$	$\epsilon_\pi, \%$	Sep, σ
300	~10	68	1,7
350	~7	90	2,8
400	~5	96	3,4
600-800	~9	>99	3,7

1. For momenta above 350 MeV/c separation level is sufficient
2. Below 350 MeV/c separation will be supplemented by other subsystems (DC)

A Yu Barnyakov *et al* 2014 JINST 9 C09023

Детекторы черенковских колец (RICH)

ДЧК (RICH) – принцип

В идеальном случае

$$R_D = f = \frac{R_S}{2}$$

$$r = \frac{R_S}{2} \theta_C \quad \text{и} \quad \beta = \frac{1}{n \cdot \cos \frac{2r}{R_S}}$$

Зная p и β , можно определить массу

$$m = \frac{p/c \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta}$$

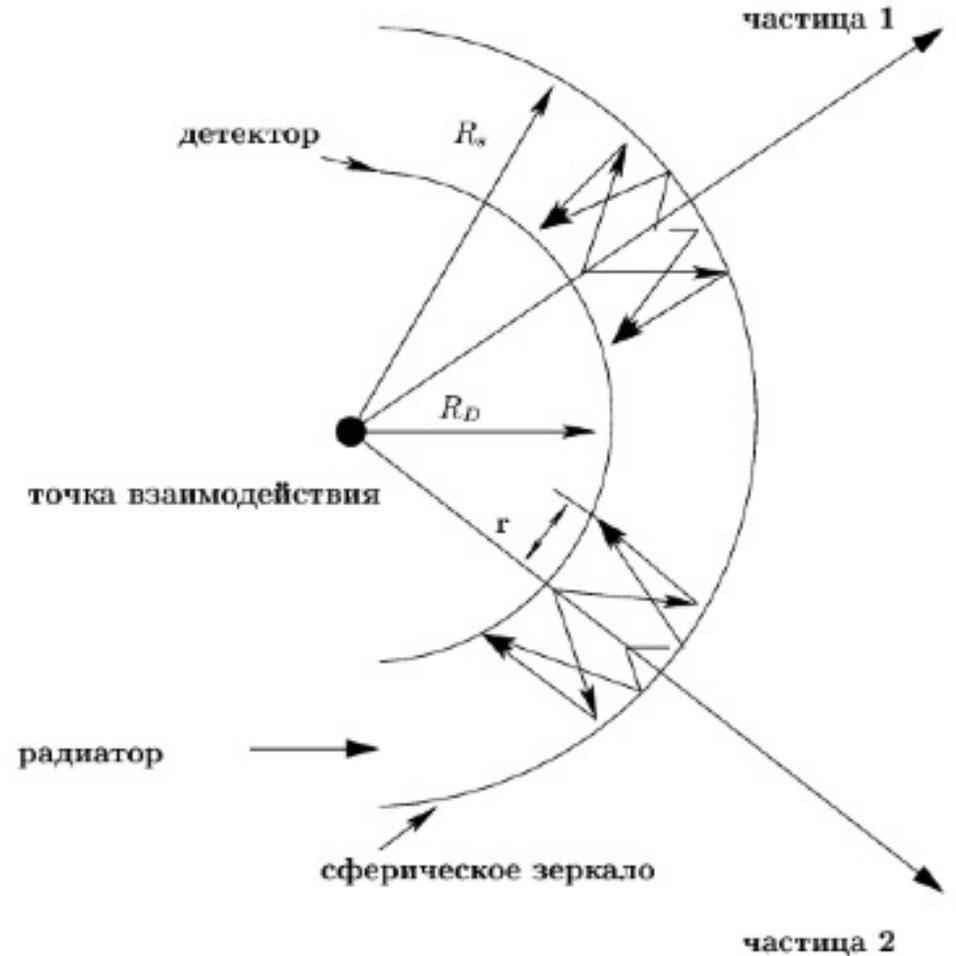
Имея предположения о массе, можно восстановить импульс.

$$\frac{\Delta p}{p} = \gamma^2 \frac{\Delta \beta}{\beta}$$

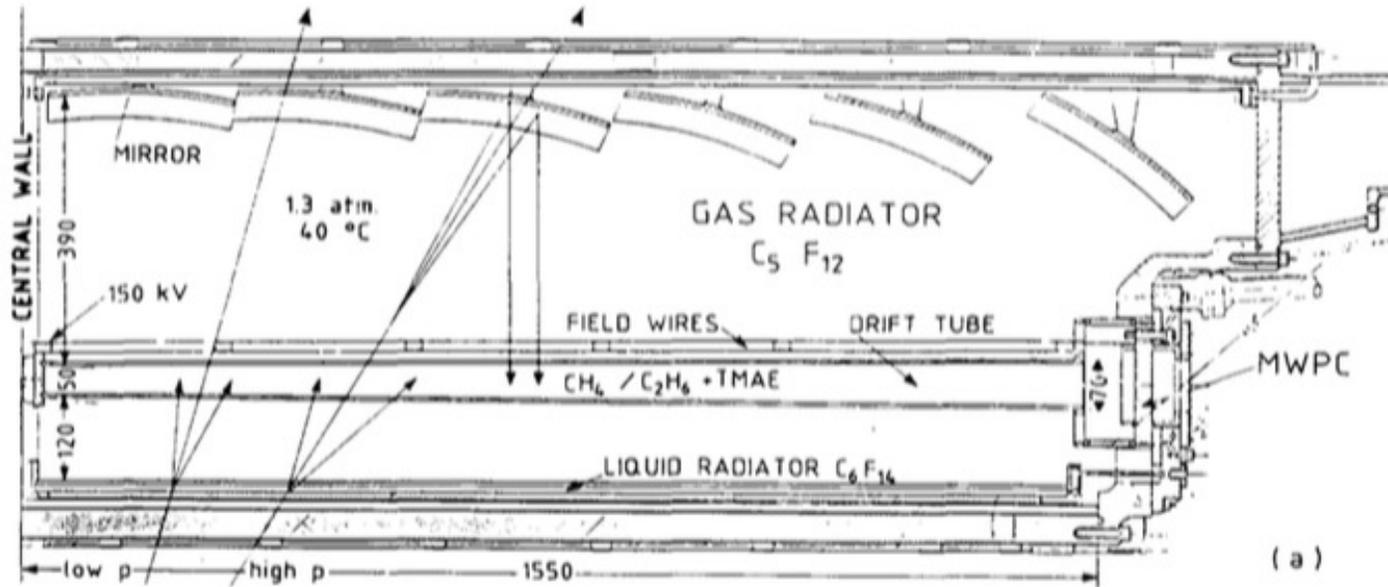
- ДЧК измеряет скорость частиц от порога до c
- Фотодетекторы должны определять координаты фотонов

- $\frac{\Delta \beta}{\beta} = \Delta \theta_C \cdot \tan \theta_C$, где $\Delta \theta_C \sim \frac{\Delta \theta_C^{1\Phi\Delta}}{\sqrt{N_{\Phi\Delta}}}$

- $n_\sigma = \frac{\overline{\theta_C^2} - \overline{\theta_C^1}}{\Delta \theta_C^{1,2}}$



Первый ДЧК: RICH – DELPHI (LEP-CERN)

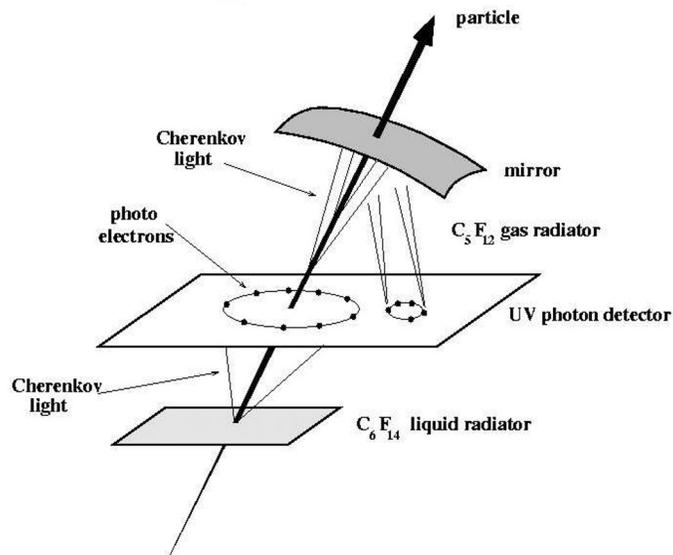


1990 г.

- Жидкий радиатор (C_6F_{14}) $t=10$ мм – «прямая фокусировка» $L=120$ мм
- Газовый радиатор (C_5F_{12}) $t=390$ мм – фокусировка параболическим зеркалом
- Фотонный детектор – дрейфовые трубки с ТМАЕ в режиме ТРС с торцов считывались МППК

Для событий $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

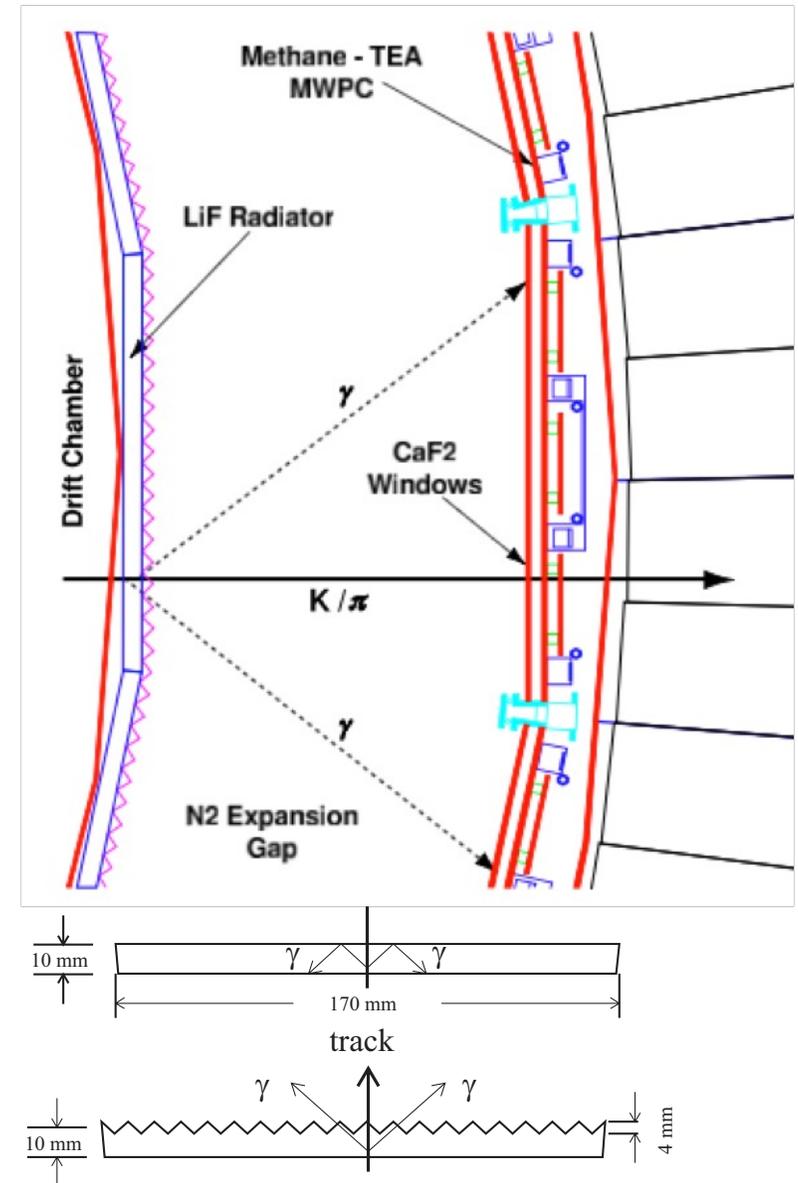
- $\Delta\theta_C^{\text{жид}} = 5.2$ мрад при $N_{\text{фэ}}^{\text{жид}} = 14$
- $\Delta\theta_C^{\text{газ}} = 1.5$ мрад при $N_{\text{фэ}}^{\text{газ}} = 8$



RICH – CLEO-III (CESR)

RICH был добавлен в CLEO в 2000г.

- π/K -разделение лучше 3σ до $P \leq 2.65$ ГэВ/ c
- Прямая фокусировка $L=20$ см
- Фотодетектор — МППК на $\text{CH}_4 + \text{TEA}$ ($\lambda = 135..165$ нм)
- Радиатор — LiF $n(150 \text{ нм}) = 1.5 \rightarrow$ зубчатая структура
- $\Delta\theta_C = 13 \div 19$ мрад при $N_{\text{фэ}} = 10$
- $\varepsilon_\pi = 94.5\%$ при $\varepsilon_{K \rightarrow \pi} = 1.1\%$
- $\varepsilon_K = 88.4\%$ при $\varepsilon_{\pi \rightarrow K} = 2.5\%$

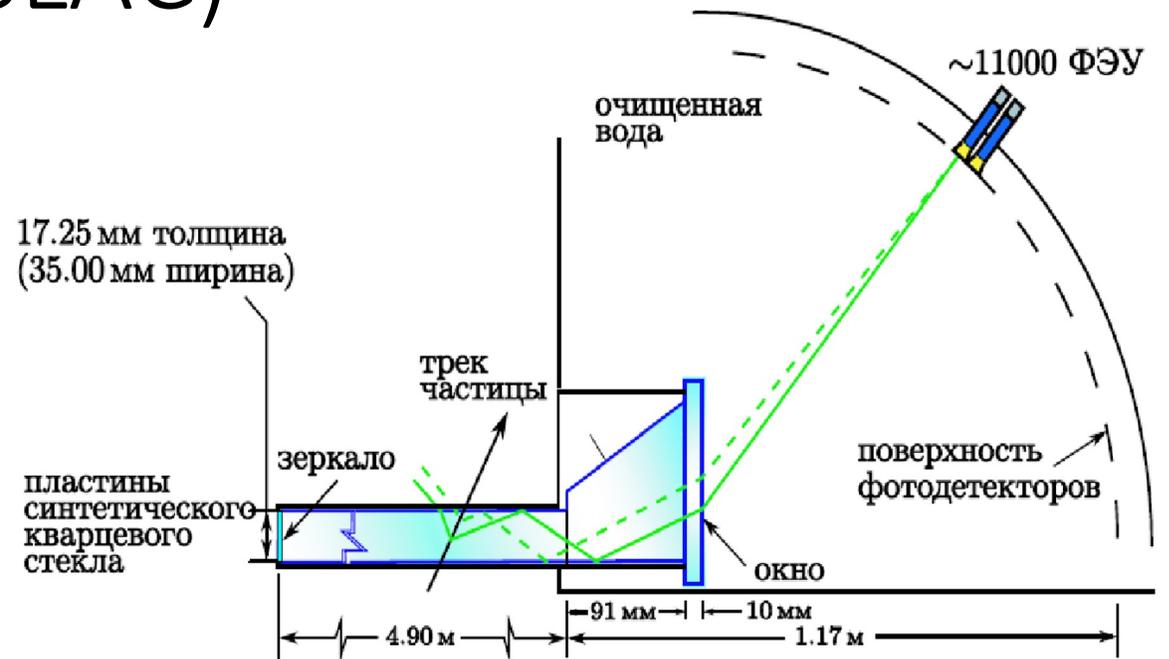


DIRC – BaBar (PEP-II – SLAC)

1999 – 2008 г.

Detection of Internally Reflected Cherenkov light

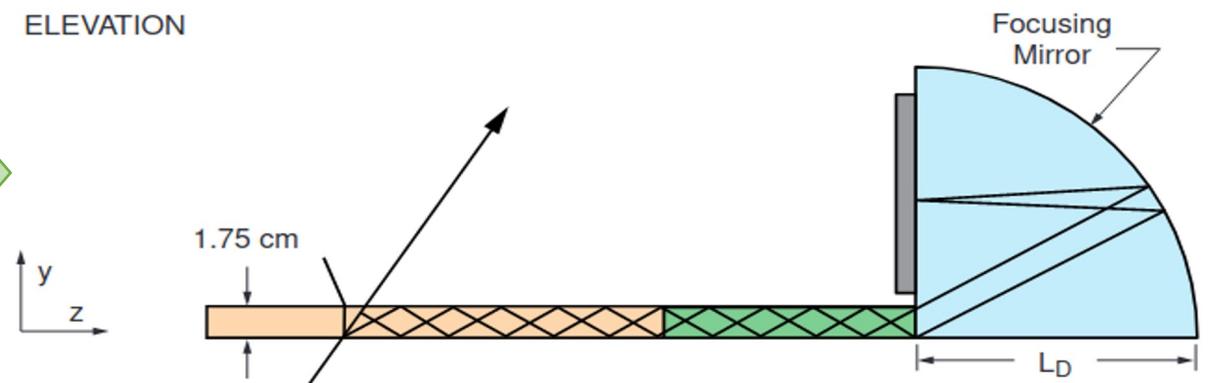
- Радиатор – синтетический кварц $n = 1.5$
- 10752 ФЭУ (9125FLB17) с $\phi_{\text{ФК}}=29$ мм
- $N_{\text{ФЭ}} = 20 \div 60$
- π/K -разделение
 - 4σ при $P = 1.2$ ГэВ/с
 - 2.6σ при $P = 3$ ГэВ/с



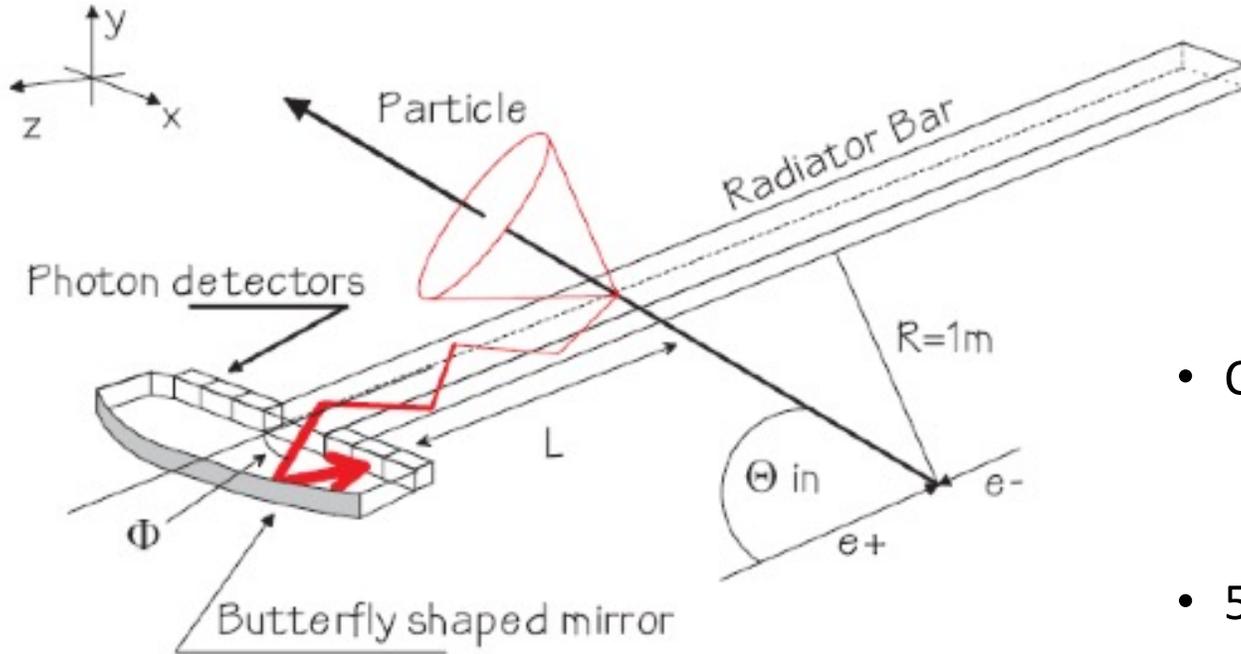
Focusing DIRC

Быстрые фотодетекторы (КФЭУ, ФЭУ с МКП ...) для коррекции $n(\lambda)$ по времени прихода фотона
 π/K -разделение на прототипе 4σ при $P = 4$ ГэВ/с
 SuperB, PANDA, EIC и др.

ELEVATION



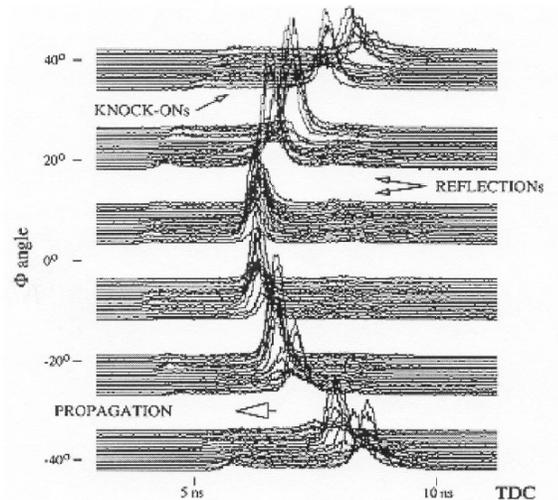
TOP – Belle-II (SuperKEKb)



$$t_p = \left(\frac{L}{c/n(\lambda)} \right) \cdot \left(\frac{1}{q_z} \right) = 4.9[\text{нс}] \cdot \frac{L[\text{м}]}{q_z}$$

2018 г.

- Синтетический кварц
 $n(405 \text{ нм}) = 1.44$,
 $260 \times 45 \times 2 \text{ см} - 16 \text{ шт.}$
- 512 ФЭУ с МКП (Hamamatsu),
 $TTS \leq 50 \text{ пс}$,
 $16 \text{ пикселей } 5.5 \times 5.5 \text{ мм}$
- $\varepsilon_K = 90\%$ при $\varepsilon_{\pi \rightarrow K} \leq 5\%$ для $P = 0.5 \div 2 \text{ ГэВ/с}$

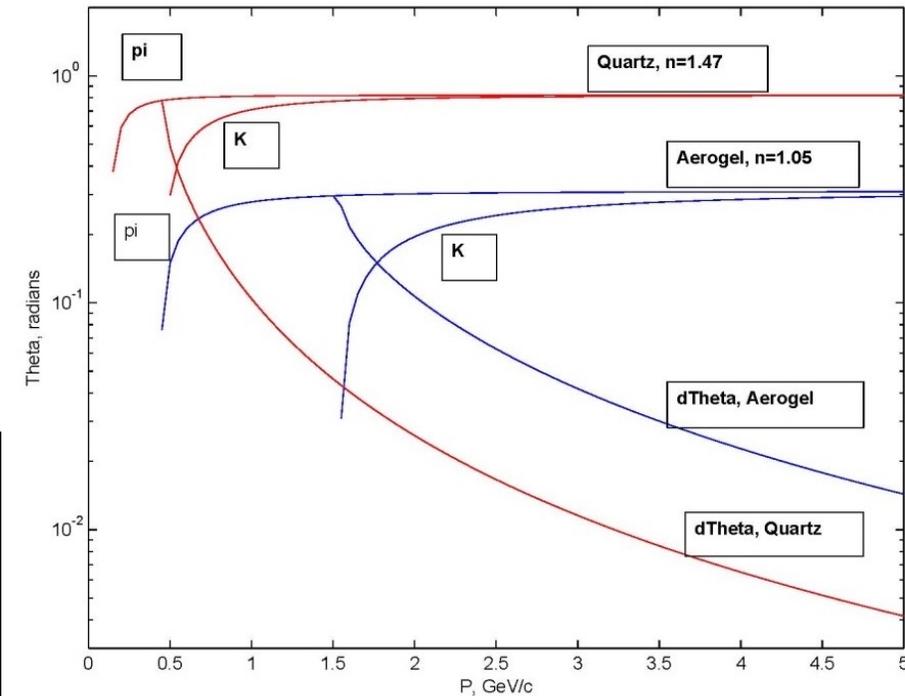
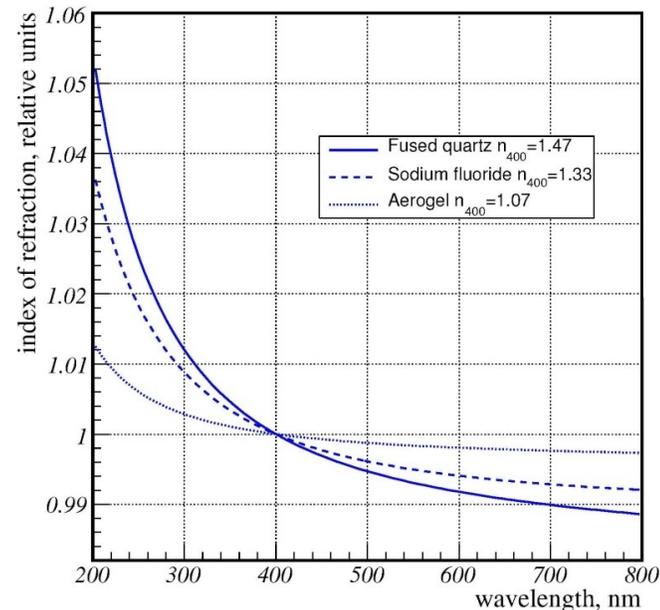


ДЧК на основе аэрогеля

- π/K -разделение при $P = 4 \div 10 \text{ ГэВ}/c \rightarrow n = 1.03 \div 1.05$
- Больше разница черенковских углов
- Меньше дисперсия показателя преломления

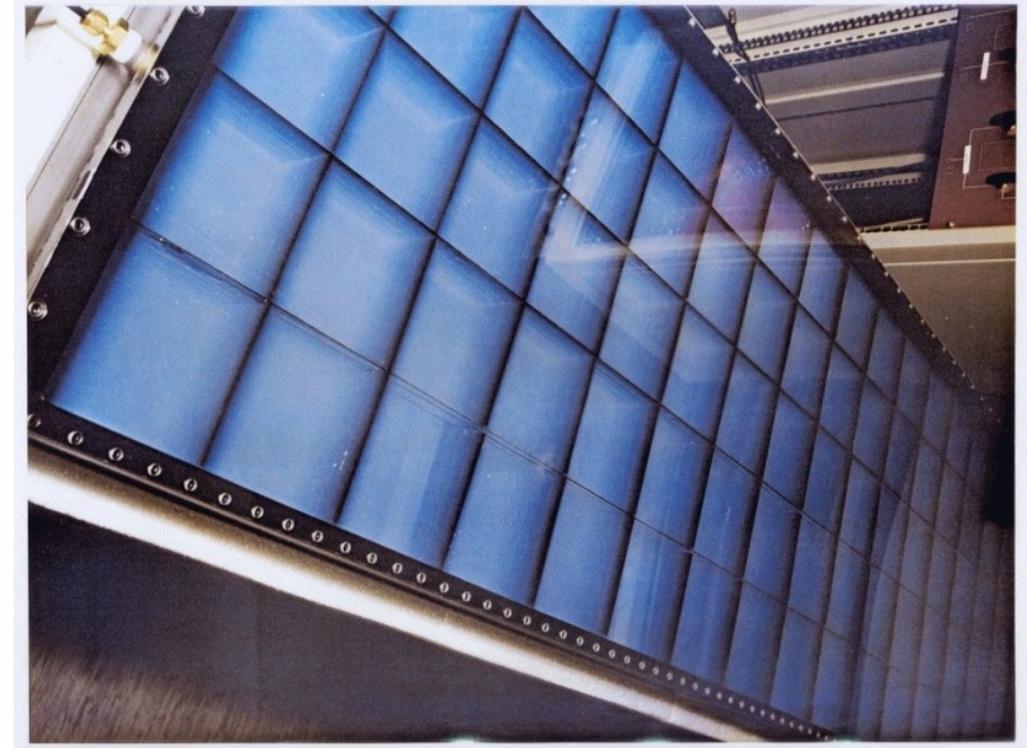
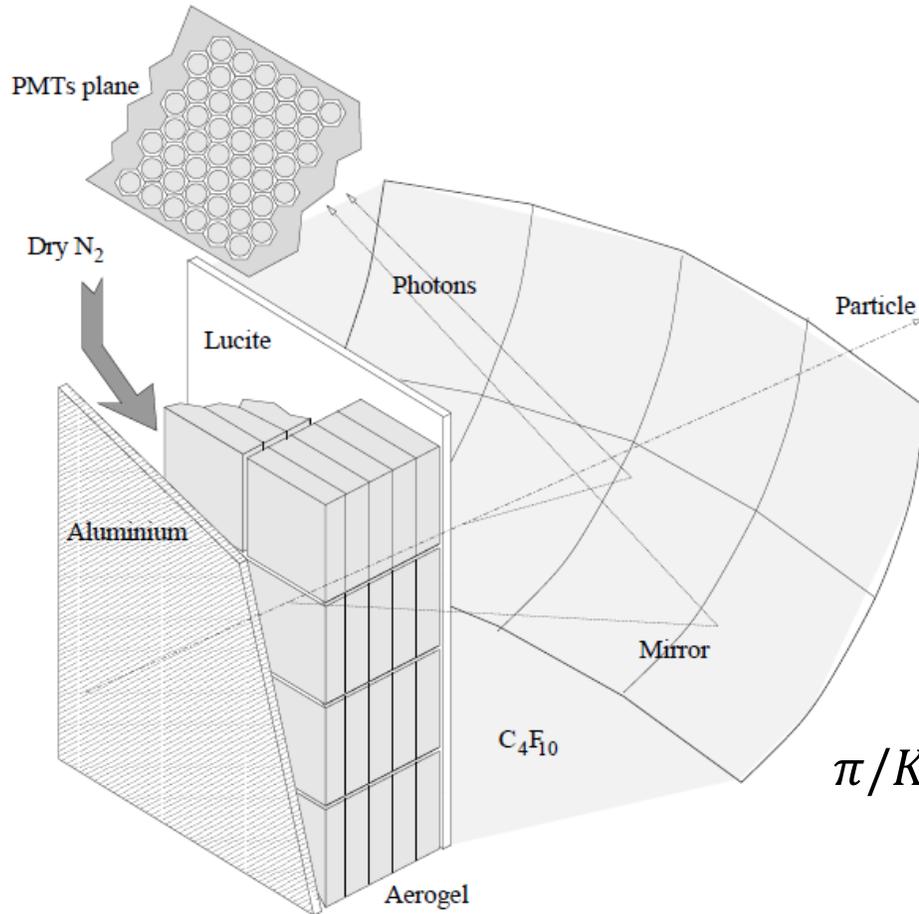
– Применение аэрогеля в ДЧК ограничено Рэлеевским рассеянием:

$$N_{out} \sim N_0 \frac{L_{sc}}{h} \left(1 - e^{-\frac{h}{L_{sc}}} \right), \quad L_{sc} \sim \lambda^4$$



Hermes RICH (HERA – DESY)

Первый ДЧК на аэрогеле 1998 г.



$\pi/K/p$ – разделение при $P = 2 \div 15$ ГэВ/с

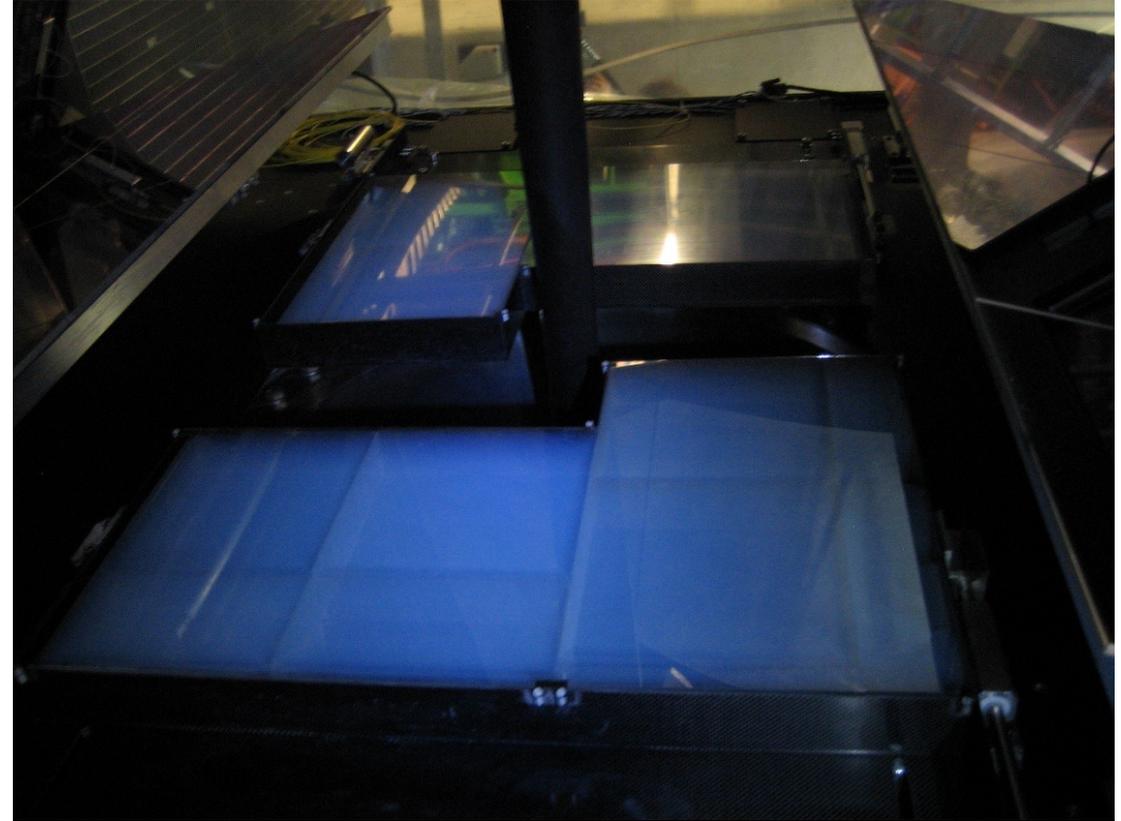
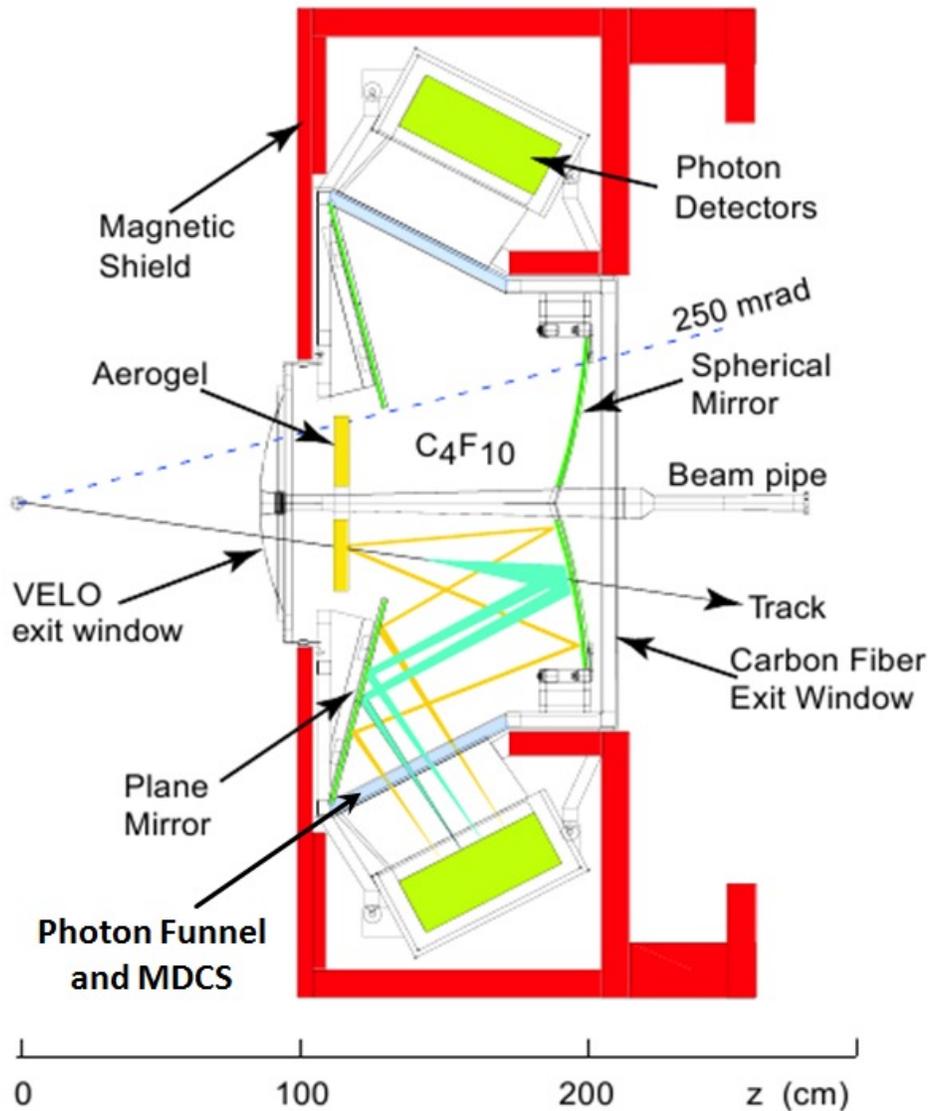
аэрогель $n = 1.03 \rightarrow \pi/K$ – разделение $2 \div 7$ ГэВ/с

газ C_4F_{10} $n = 1.0014 \rightarrow \pi/K$ – разделение $7 \div 15$ ГэВ/с

1020 аэрогелевых блоков $114 \times 114 \times 11 \text{mm}^3$

Y.Miyachi, NIM A502(2003)202

RICH1 LHCb (LHC – CERN)



π/K – разделение $1 \div 150$ ГэВ/с

Аэрогель $n = 1.03$,

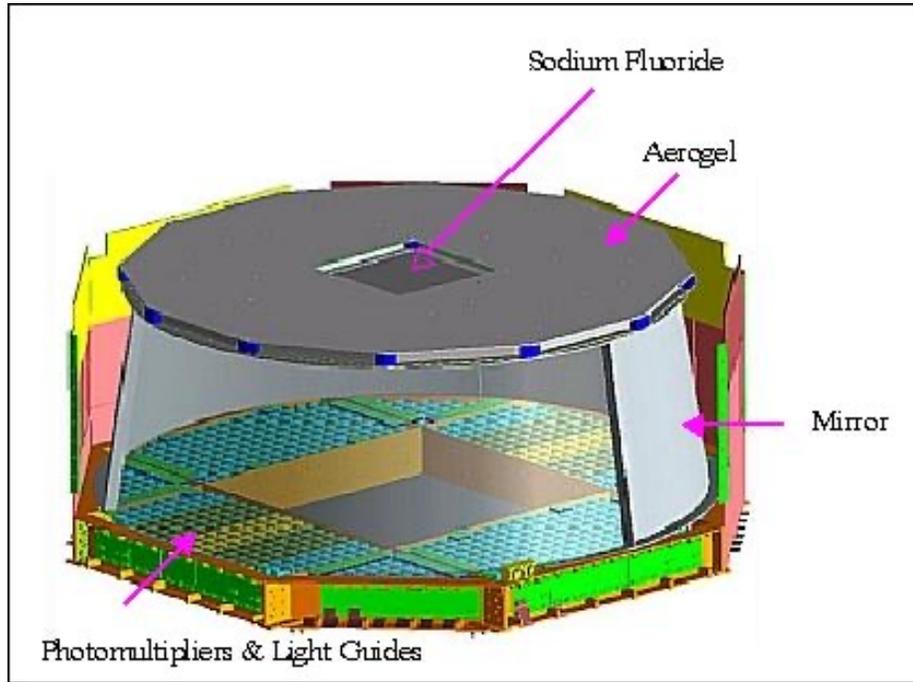
блоки $20 \times 20 \times 5$ см³ ← (рекордные размеры)

C_4F_{10} $n = 1.0014$

CF_4 $n = 1.0005$

RICH в AMS-02 (МКС)

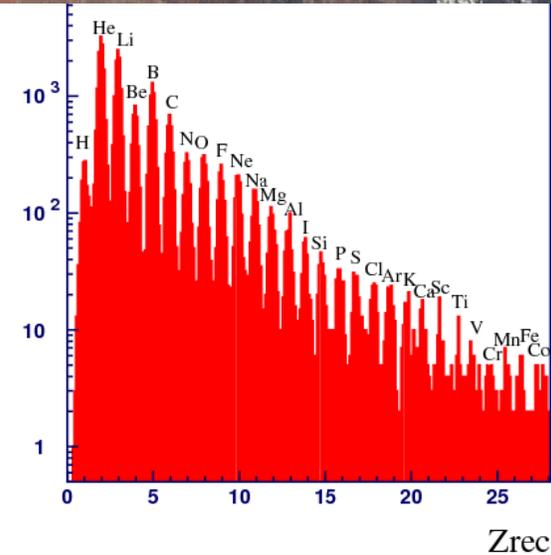
2010 г.



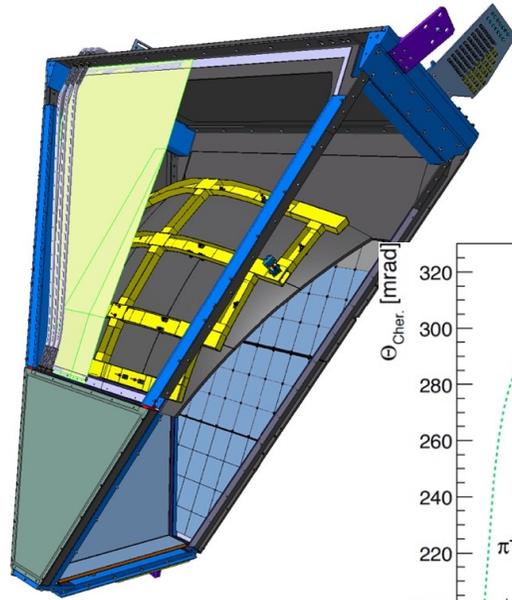
Измерение Z по $N_{\text{фэ}} \sim Z^2$

- Аэрогел $n = 1.05, 115 \times 115 \times 30 \text{ мм}^3, S_{\text{общ}} \sim 1 \text{ м}^2$
- Хорошее совпадение измеренных параметров и расчетов

F.Giovacchini et al., NIM A970 (2020) 163657



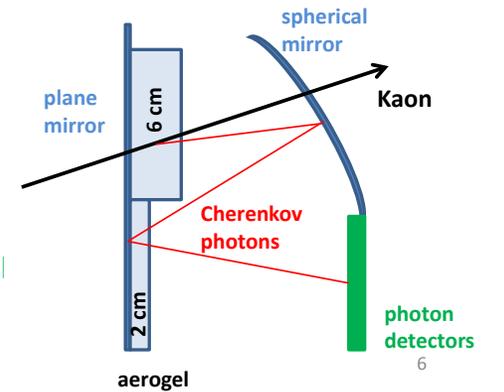
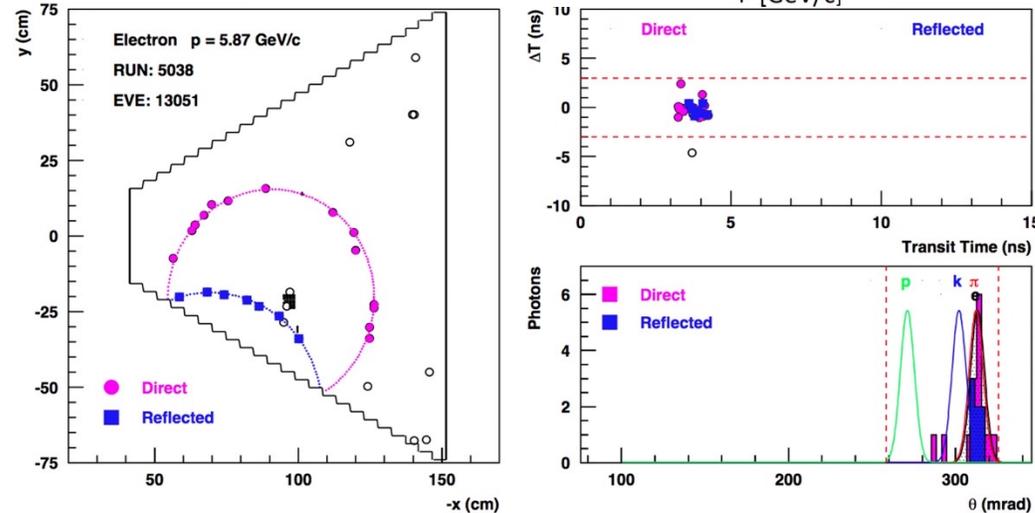
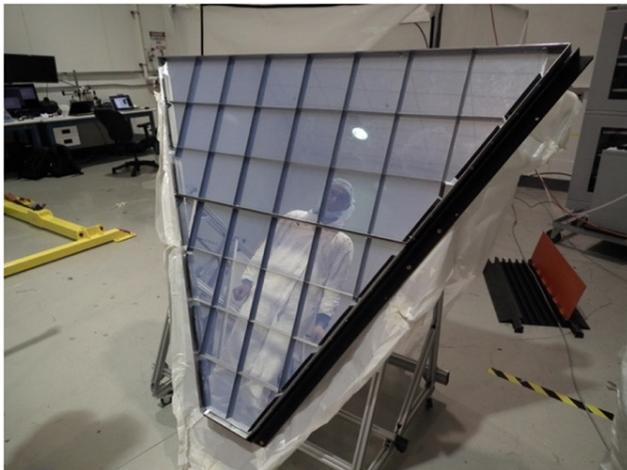
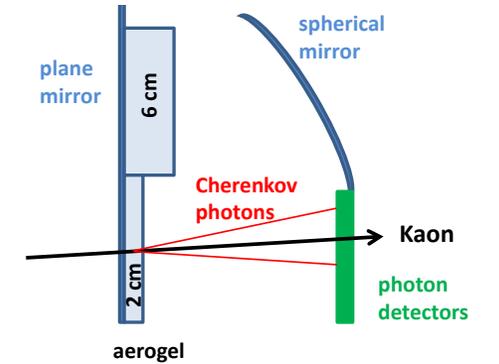
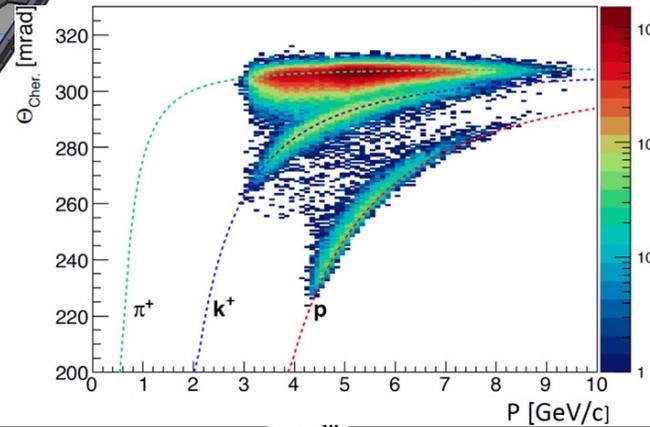
CLAS-12 RICH (J-Lab)



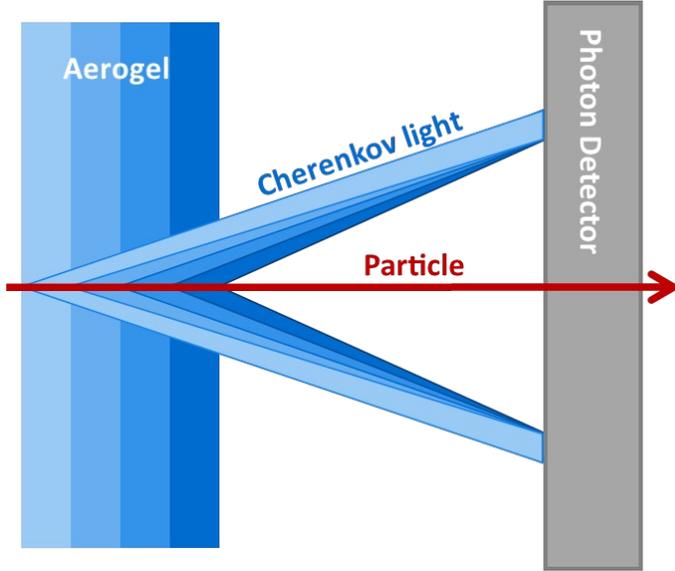
$\pi/K/p$ -разделение 3÷8 ГэВ/с

- Аэрогель $n=1.05$
- 2 сектора 102 блока $20 \times 20 \times 3(2) \text{ см}^3$

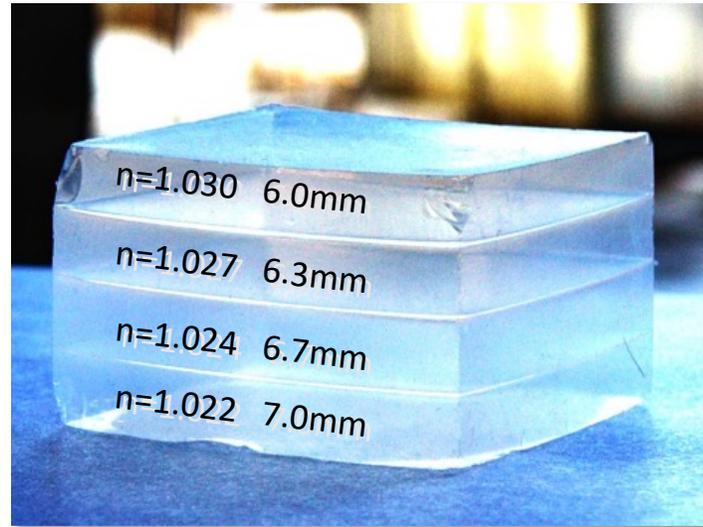
M. Contalbrigo et al., NIM A964 (2020) 163791



Фокусирующий Аэрогелевый РИЧ = ФАРИЧ



Первый 4-слойный аэрогель 2004 г.



ДЧК с прямой фокусировкой

- Показатель преломления в слоях подобран, так чтобы черенковские кольца перекрывались в области фотодетектора
- Позволяет увеличить $N_{фэ}$ за счет толщины блока без ухудшения $\Delta\theta_c$

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

π/K -разделение лучше 4σ до 4 ГэВ/с

- 248 аэрогелевых блока в 2 слоя 2+2 см
- $n_1 = 1.045$; $n_2 = 1.055$; $S_{сист} = 3.5 \text{ м}^2$
- 420 НАРД; 144 пикселя $5 \times 5 \text{ мм}^2$

	ϵ_K	$\epsilon_{\pi \rightarrow K}$	ϵ_π	$\epsilon_{K \rightarrow \pi}$
Данные	$93.5 \pm 0.6\%$	$10.9 \pm 0.9\%$	$87.5 \pm 0.9\%$	$5.6 \pm 0.3\%$
МК	$96.7 \pm 0.2\%$	$7.9 \pm 0.4\%$	$91.3 \pm 0.3\%$	$3.4 \pm 0.4\%$

Y.-T. Lai et al 2020 JINST 15 C07039

Идентификация по переходному излучению

Переходное излучение

- 1946 г. – В.Л. Гинзбург и И.М. Франк (теория)
- 1973 г. – Г.М. Гарибян показал, что в спектре ПИ присутствуют рентгеновские фотоны

- $E_{РПИ} \approx \gamma^n, n \geq 1$

- $-dE \sim \gamma$

- $\theta \approx \frac{1}{\gamma}$

- $n_{\phi} \approx \alpha \gamma, \alpha = \frac{1}{137}$

- Зона формирования ПИ :

- $b = \frac{2c}{\omega(\gamma^{-2} + \theta^2)}$ – переход в вакуум

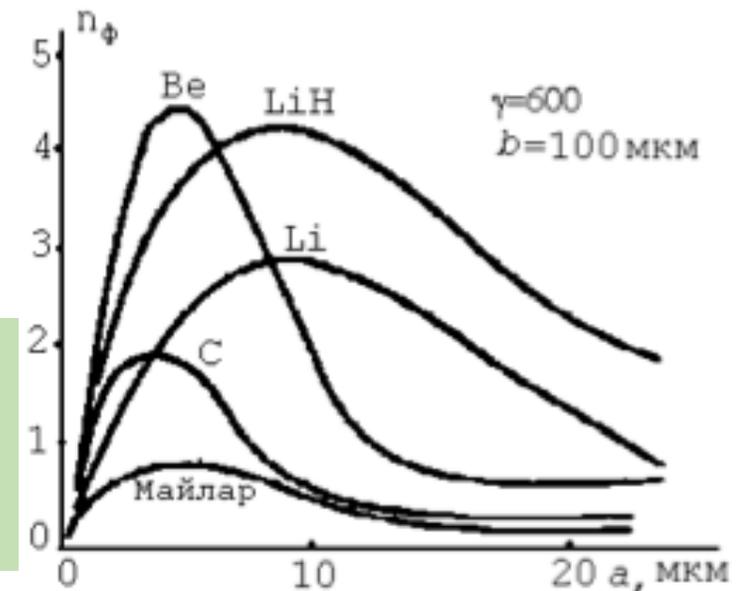
- $a = \frac{2c}{\omega\left(\gamma^{-2} + \theta^2 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)}$ – переход в материал,

ω_p – плазменная частота среды,

ω – частота фотона.

ВАЖНО:

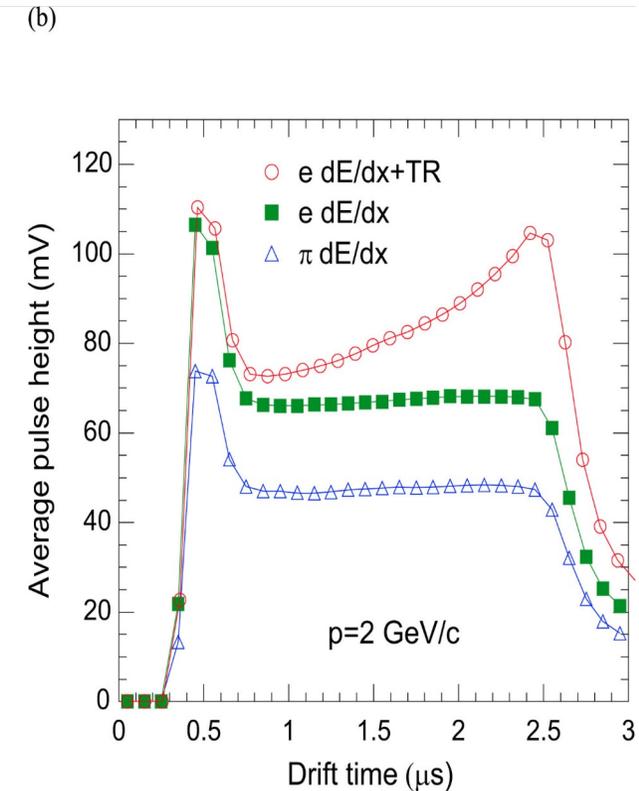
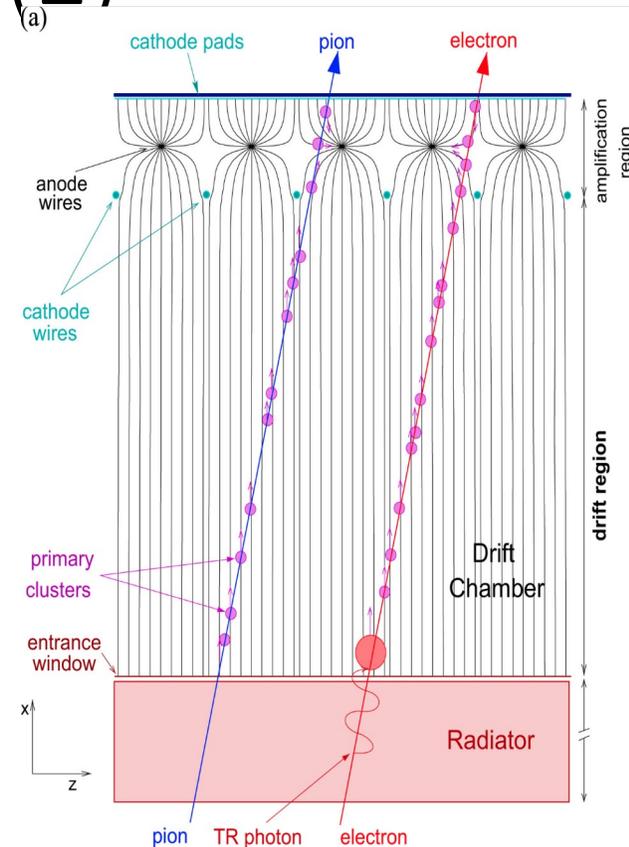
- Много слоев (10^4)
- $t \sim 10 \div 100 \mu\text{м}$
- Малое $Z_0 \rightarrow$ меньше Ф.Э. ($\sim Z_0^5$) и ТИ (фон)



Переходное излучение (2)

- Суммарная толщина радиатора из 10^4 слоев $\sim 0.05 \div 2$ м
- РПИ с энергией ~ 10 кэВ можно регистрировать газовыми детекторами
- ПИ регистрируются вместе с кластерами ионизации первичной частицы
 - Можно измерять Q или считать кластеры N_{cl}
 - Кластеры от РПИ задержаны по времени
- Качество разделения обычно приводится в терминах фактора подавления

$$R_{1/2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad \text{при } \varepsilon_2 = 90\%$$



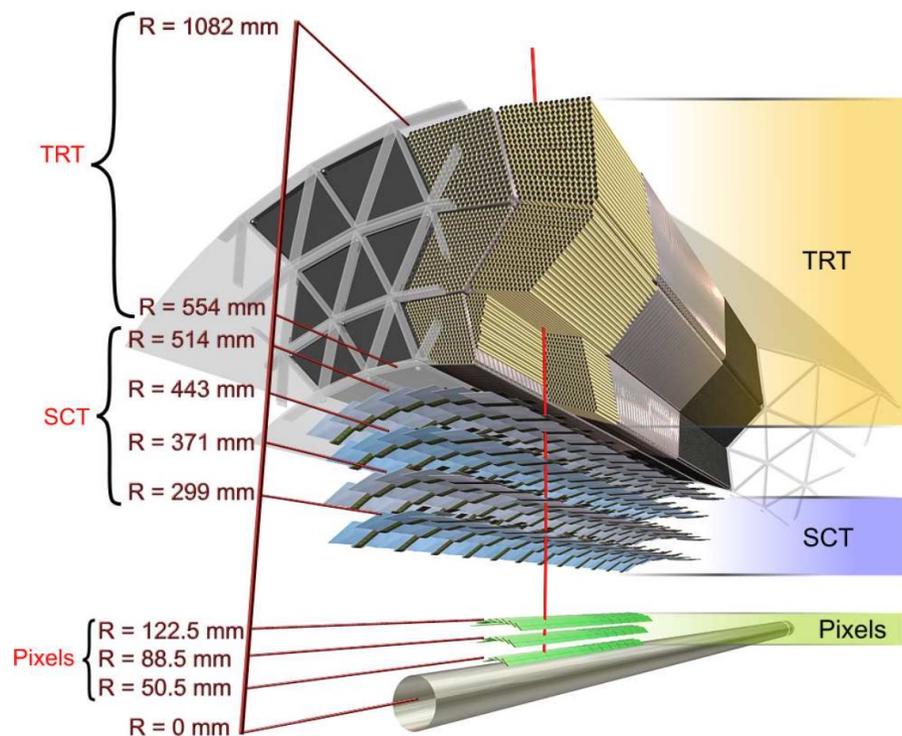
TRD-ALICE (LHC-CERN)

- 5 см многослойный сэндвич полипропиленового волокна
- Детектор 3 см – ДК:
 - Газ – Xe/CO₂ (85/15)
 - измеряется Q и форма сигнала
- 5 слоев (радиатор+ДК)

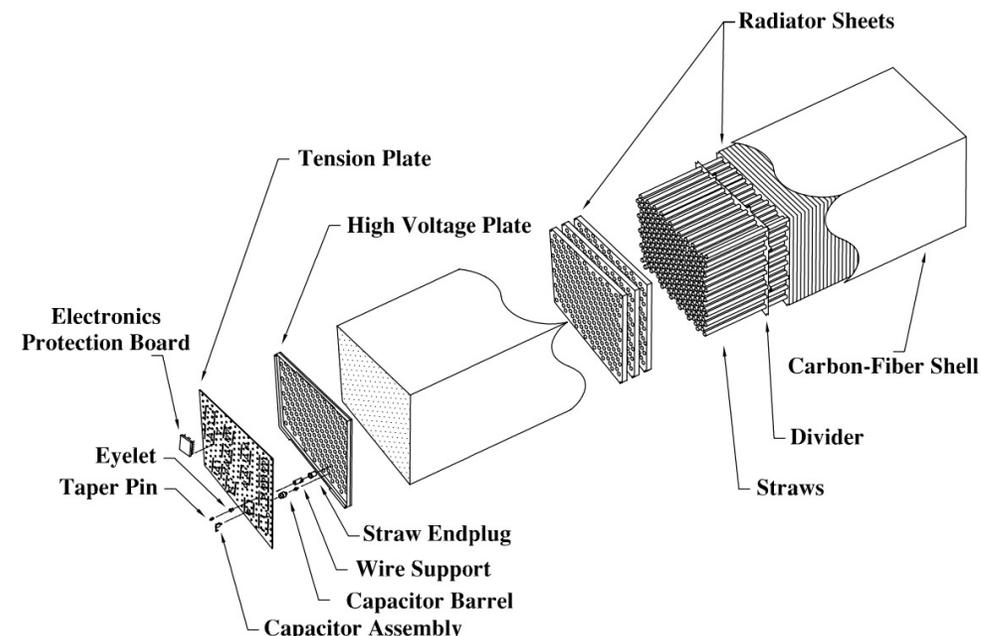
Переходное излучение (3)

TRT ATLAS (LHC-CERN)

Transition Radiation Tracker



Модуль TRT-ATLAS



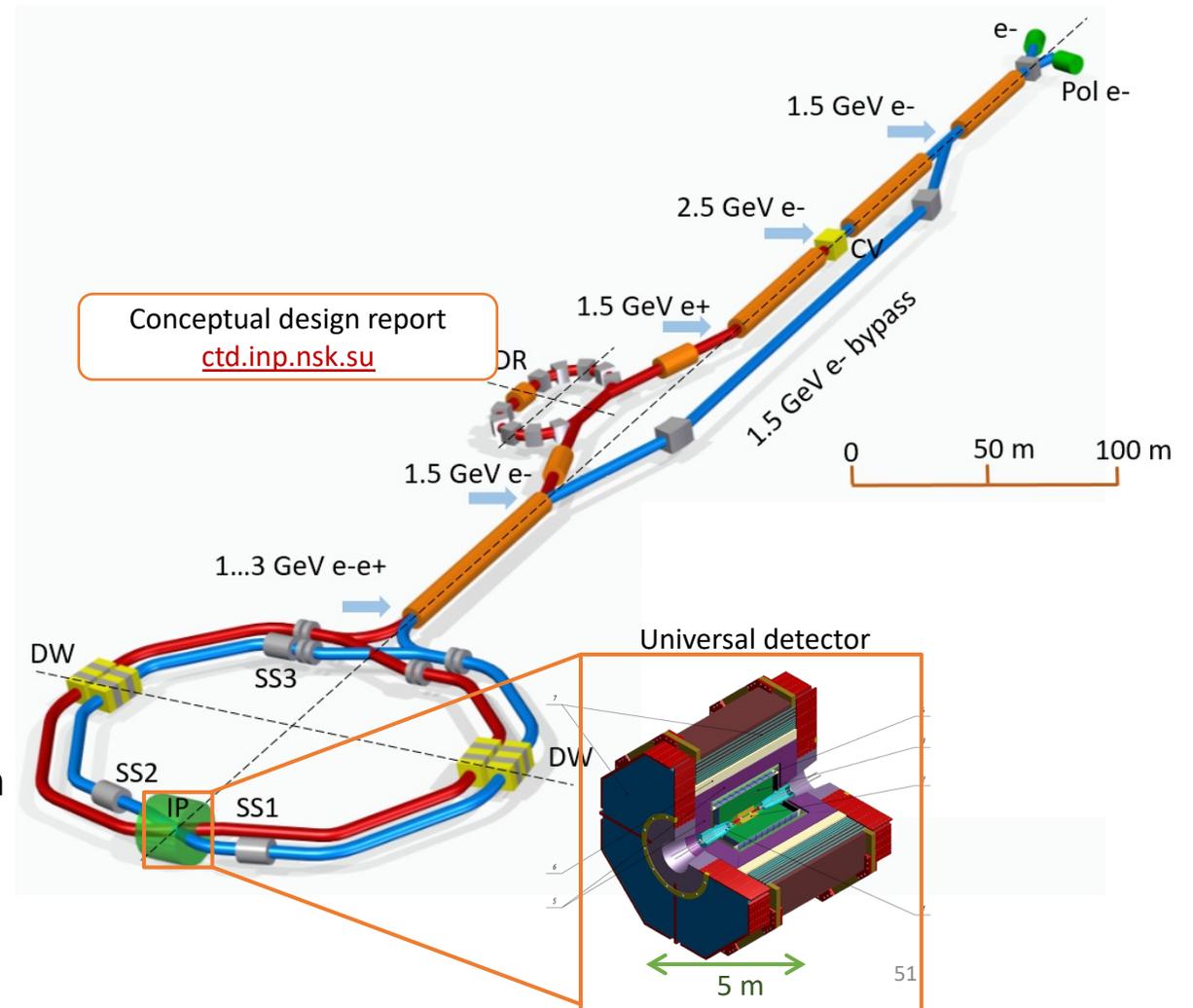
Подавление электронов с $P \geq 2$ ГэВ/с

- 73 слоя в баррели и 160 в торцах
 - Полипропилен-полиэтиленовые волокна $\phi 19$ мкм слоем с $t=3$ мм $\rho = 0.06$ г/см³
 - Детектор – полиамидные дрейфовые трубки
 - $\phi 4$ мм, анод $\phi 31$ мкм, 144 см
 - Газ – 70% Xe, 27% CO₂, 3% O₂; $K_V \sim 2.5 \times 10^4$

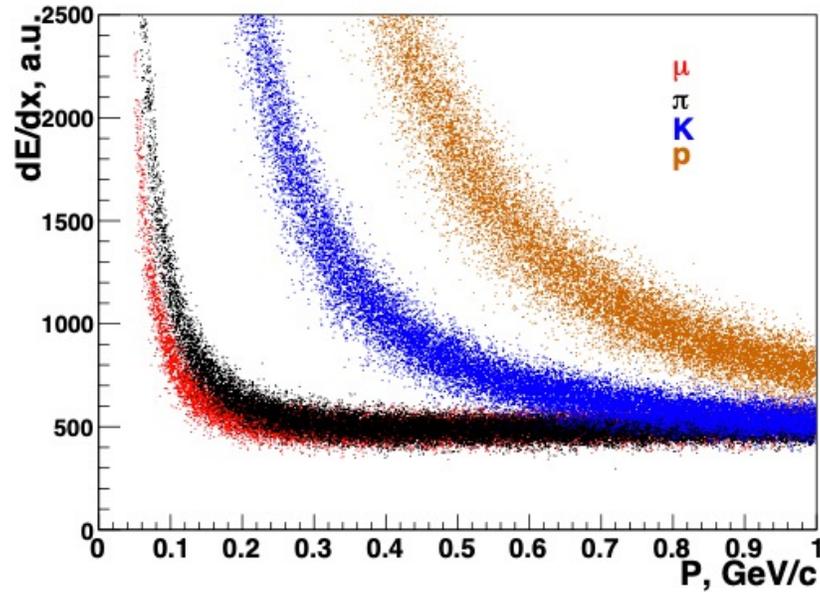
Опции систем идентификации для проекта «Супер Ц-Тау фабрика»

Супер С-Тау фабрика

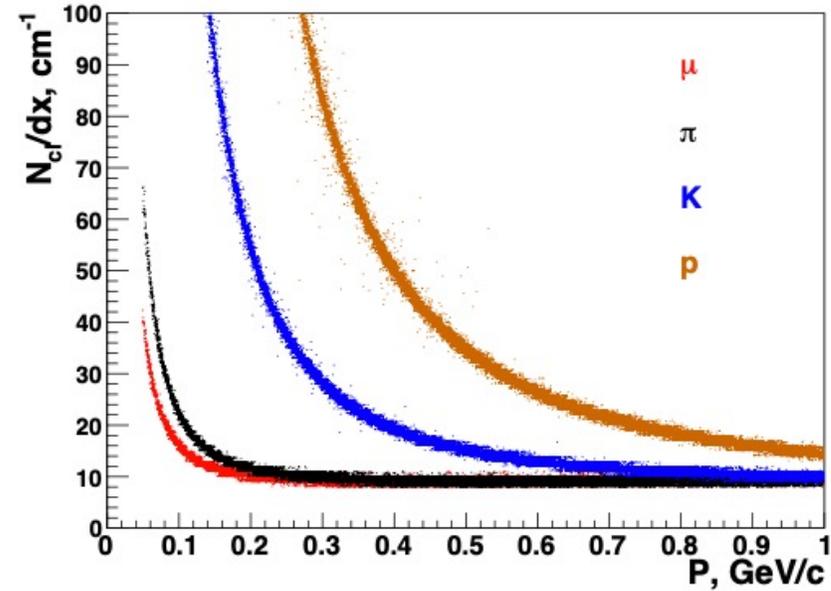
- e^+e^- collider for precise experiments with tau-lepton and charmed hadrons and search for “new physics”
 - Energy of beam $1.5 \div 3.5$ GeV
 - Luminosity $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 2 GeV
 - Longitudinal electron beam polarization
- Universal particle detector
 - Axial magnetic field up to 1.5 T
 - Track system with excellent spatial and momentum resolution
 - Calorimeter with excellent energy resolution and timing properties
 - Particle identification system
 - π/K – separation $0.6 \div 3$ GeV/c
 - μ/π – separation up to 1.5 GeV/c



Супер С-Тау фабрика: dE/dx



Parametric simulation of DC with $\sigma_{dE/dx}=7\%$.



Parametric simulation of DC with cluster counting mode He/iC₄H₁₀ (90%/10%) $\rightarrow 12 \frac{el}{cm}$.

IT+DC is able to detect the particles with momenta $P_t \geq 80$ MeV/c

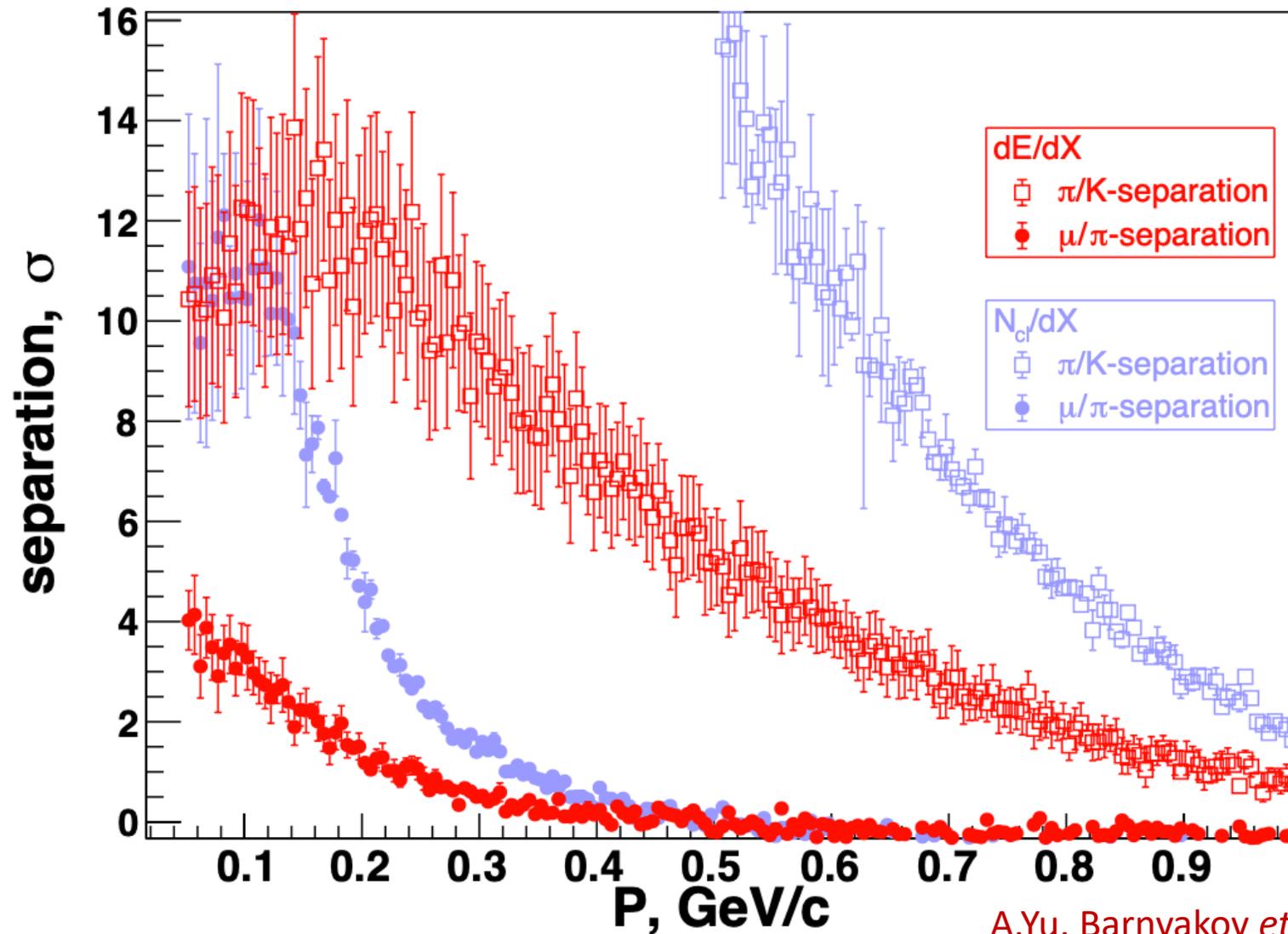
PID up to 200 MeV/c is possible only in tracking system due to magnetic field of the Detector

Clusters counting mode allows us to improve power of particle separation in DC by ≥ 2 times

Specialized readout electronics is needed:

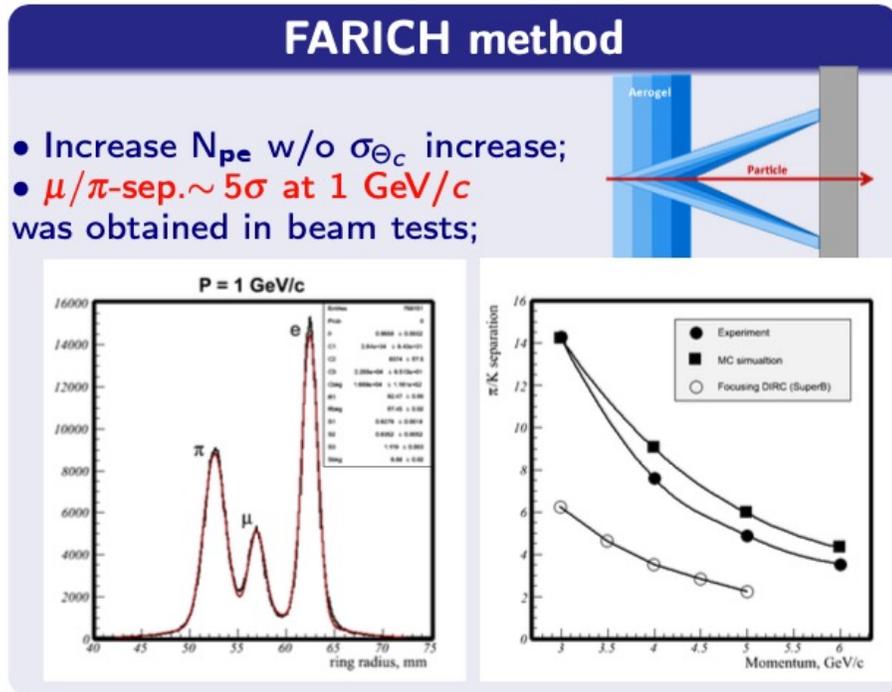
– Sampling-ADC to digitize 300÷500 ns time interval or fast-TDC with ToT approach?!

Супер С-Тау фабрика: dE/dx -разделение



A.Yu. Barnyakov et al 2020 JINST 15 C04032

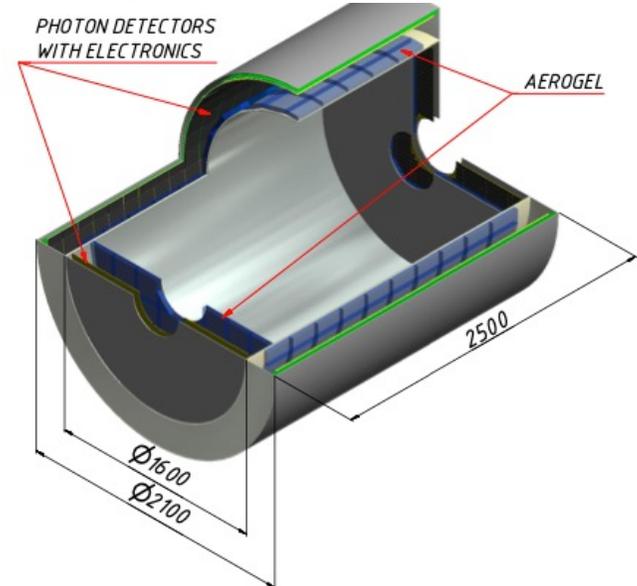
Супер С-Тау фабрика: ФАРИЧ



Status & perspectives:

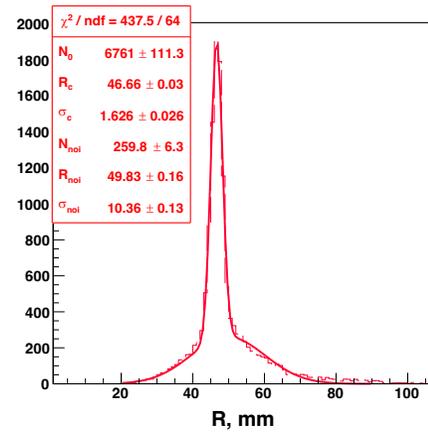
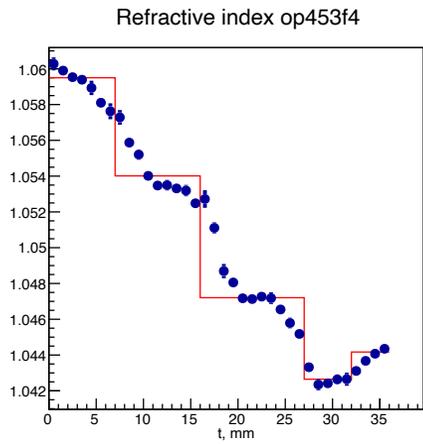
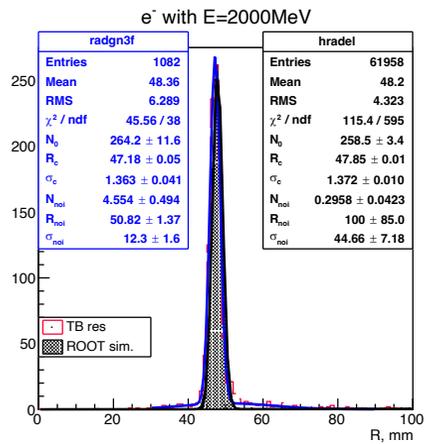
No any showstoppers have been found yet, but there are several challenges:

- ! Mass-production of the multilayer focusing aerogel.
- ! 1.5 million of SiPMs and their radiation hardness.
- ! Big data flow in DAQ system.

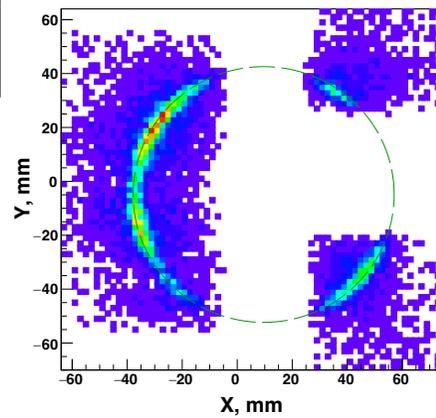
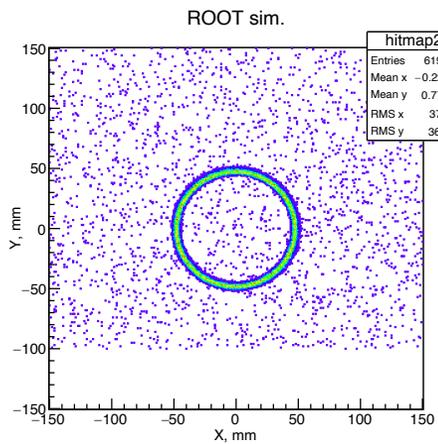
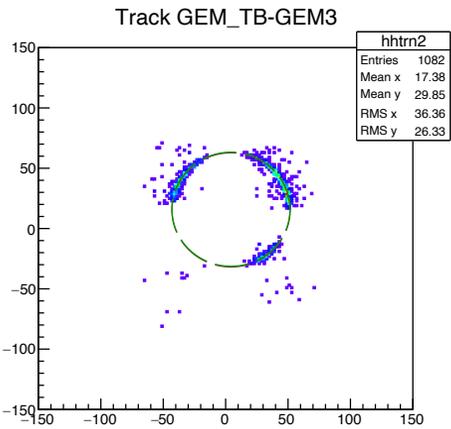
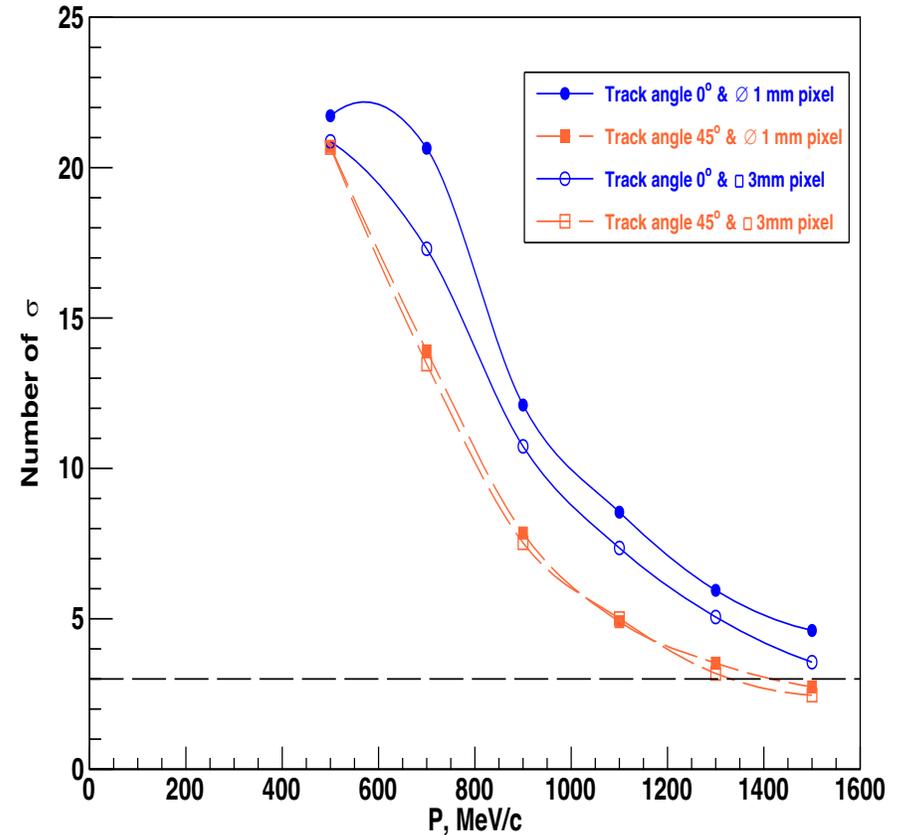


- ### FARICH system parameters:
- Focusing aerogel with $n_{max}=1.05(1.07?)$, 4 layers, total thickness 35 mm
 - Aerogel area: 14 m²
 - Photon detectors (3×3 mm²):
 - Barrel – SiPMs (16 m²)
 - Endcap – MCP PMT (5 m²) **LAPPD?**
 - 1÷2·10⁶ channels (it depends on pitch)
 - Load 0.5÷1.0 MHz/channel
 - Cooling system ($\leq -30^\circ\text{C}$) is needed
 - R&D for read out electronics is required.

FARICH: Beam test results & simulation (2021)



μ/π separation, σ



Pixel \varnothing 1 mm
 $\sigma_R = 1.36 \pm 0.04 \text{ mm}$

$\sigma_R(\blacksquare 3 \text{ mm}) = 1.4 \text{ mm}$ (from G4)

Pixel \blacksquare 3 mm
 $\sigma_R = 1.63 \pm 0.03 \text{ mm}$

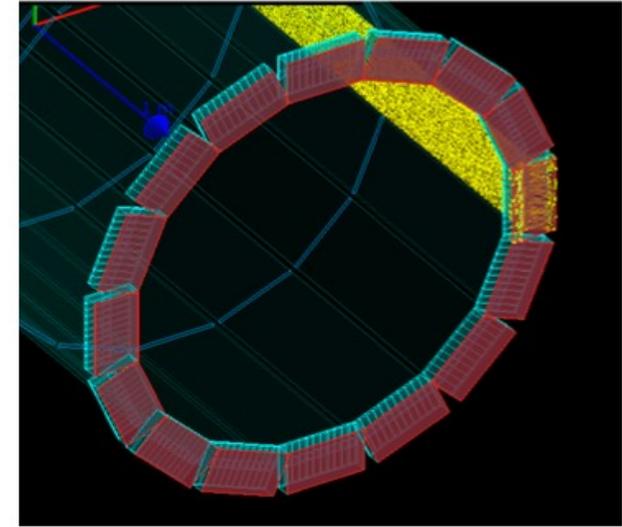
A.Yu.Barnyakov et al., NIMA 1039 (2022) 167044

Супер С-Тау фабрика: fDIRC

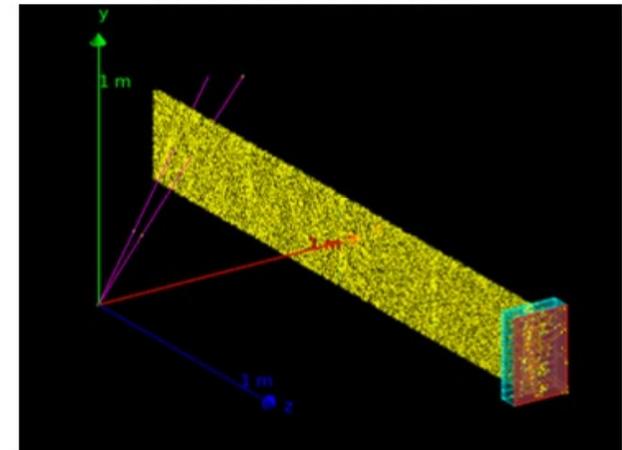
- Inspired by design from BaBar, SuperB, Belle II, and PANDA
- For PANDA $\sigma_{\theta_c} \approx 2.1$ mrad/track is achieved for π/K with $3\sigma@4$ GeV/c
- For SCTF $\sigma_{\theta_c} \approx 0.7$ mrad/track is required for μ/π with $3\sigma@1.5$ GeV/c

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



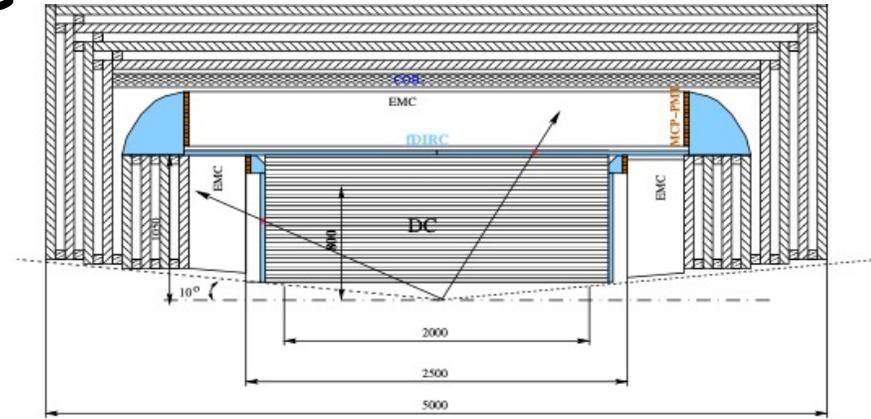
Супер С-Тау фабрика: fDIRC

Few comments to DIRC option

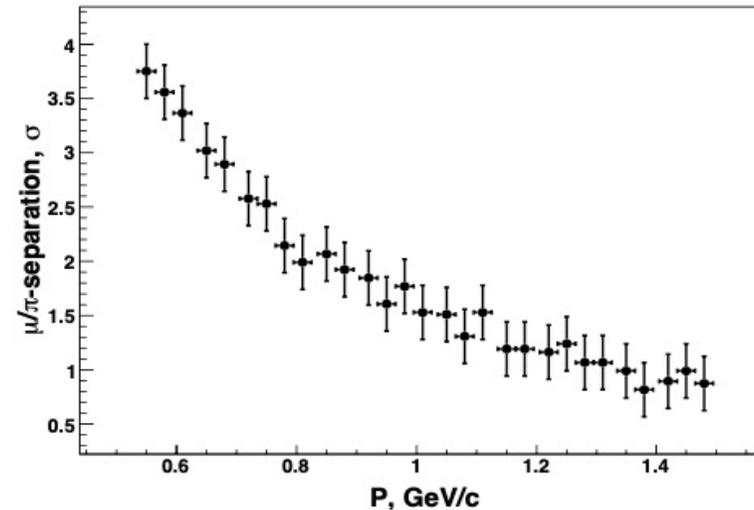
- Sufficient change of yoke geometry and calorimeter is needed.
- DIRC is very compact system in barrel part, therefore it is possible to increase DC or decrease the EMC volume.
- Good enough μ/π -separation is provided up to 700 MeV/c \rightarrow we need to use something else to separate μ and π up to 1.2 GeV/c.

Plans:

- Mitigate multi-scattering effects \rightarrow tracking system behind the PID system with $\sigma_x \sim 100\mu\text{m}?! .$
- Quartz chromaticity corrections with time measurements.



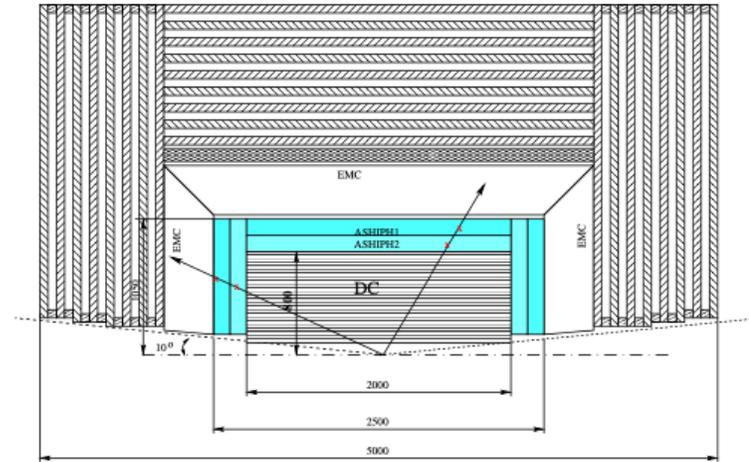
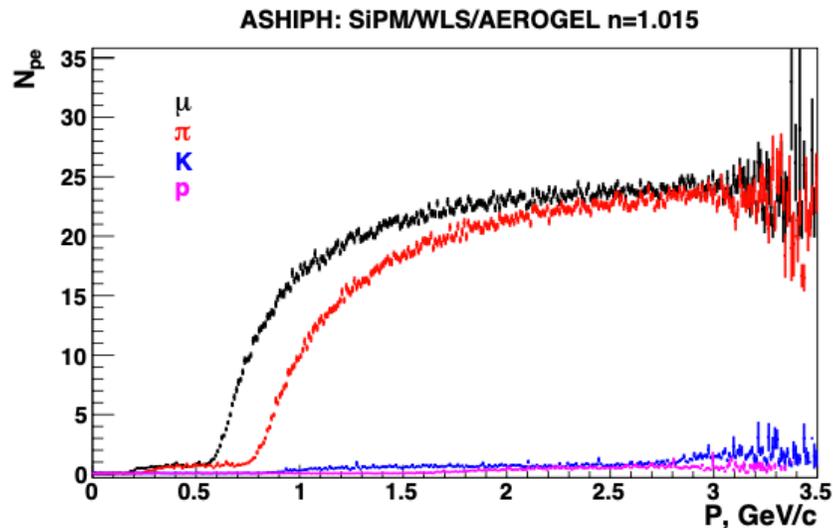
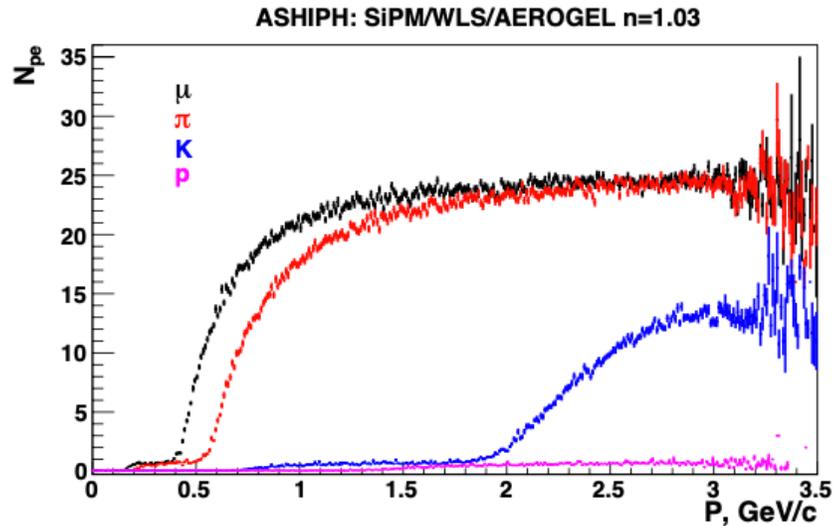
Schematic location of the DIRCs.



μ/π -разделение на основе моделирования результатов испытаний на пучке

M. Schmidt *et al* 2020 *JINST* **15** C02032

Супер С-Тау фабрика: АШИФ с КФЭУ



ASHIPH with SiPM

- π/K -separation from 500 to 2000 MeV/c
- μ/π -separation from 400 to 900 MeV/c
- Preliminary design:
 - 6000 l of aerogel in three layers: n=1.03 (8 cm) and n=1.015 (8+8 cm)
 - 1400 counter with sizes $\sim 18 \times 30 \times 8$ cm
 - Amount of material $\sim 15\% X_0$
 - Light collection – WLS(BBQ) and 28000 SiPMs $3 \times 3 \text{ mm}^2$

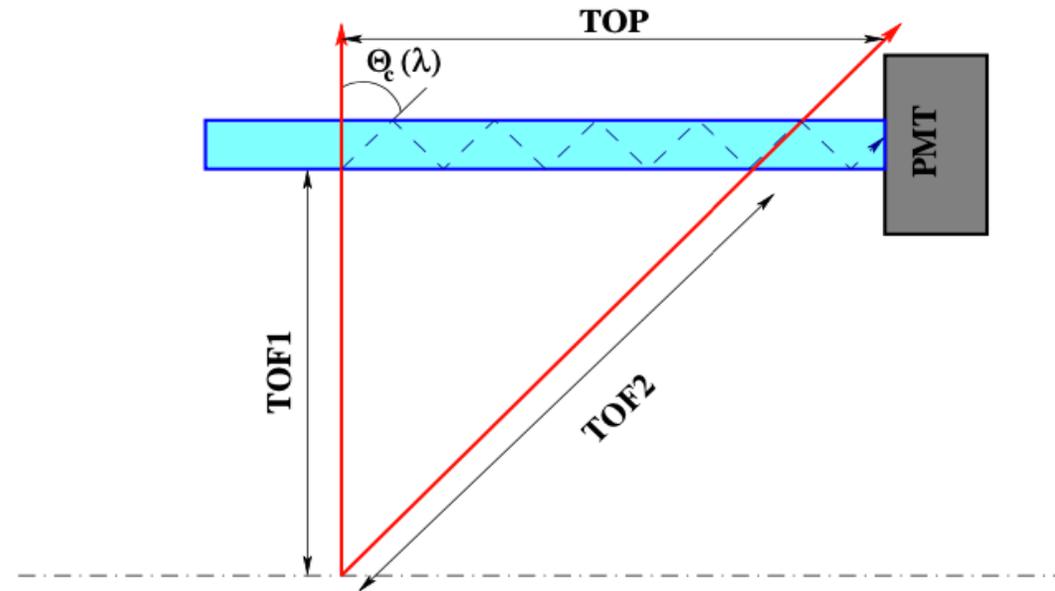
A.Yu. Barnyakov et al., *EPJ Web Conf.* **212** (2019) 01012.

Супер С-Тау фабрика: ТоF+ТоP

It is possible to use TOP information in addition to TOF.

- The record time resolution (~ 5 ps) was obtained with quartz radiator coupled to MCP PMT.
- The best accuracy of TOF measurement achieved in currently operating colliding beam experiment is about 80 ps (BESIII).
- The time resolution of about 30 ps is considered for future upgrade of the CMS detector.
- The time resolution of about 15 ps is the aim of TORCH project — a time-of-flight detector.
- Recent progress in time-of-flight technique allows us to consider the TOF system with intrinsic time resolution better than 30 ps. Time resolution mainly is determined by:

- refractive index dispersion
- time of light collection
- photon detector & electronics jitter



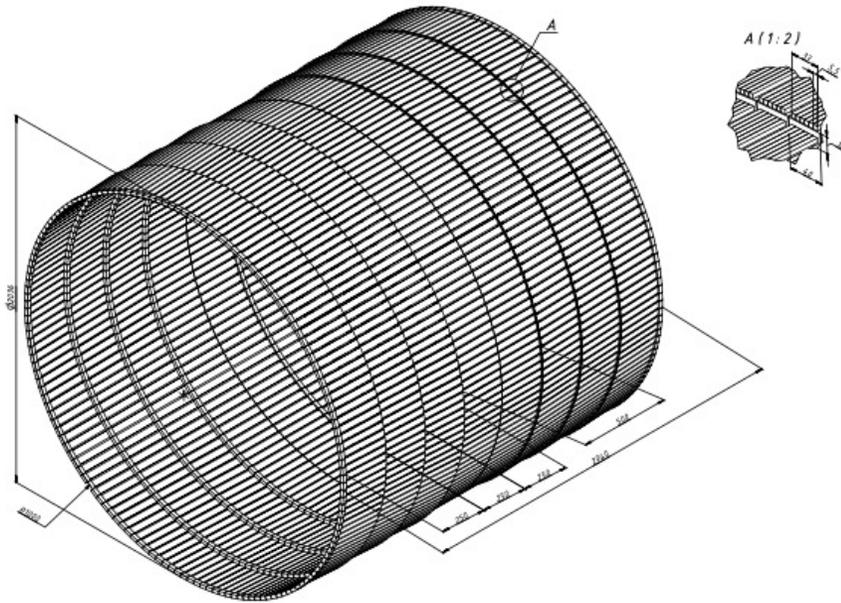
TOF & TOP

For perpendicular tracks with $\beta \geq \frac{1}{\sqrt{n(\lambda)^2 - 1}}$

$$\text{TOP} \sim \frac{L}{c/n(\lambda)} \cdot \frac{\beta \cdot n(\lambda)}{\sqrt{n(\lambda)^2 \beta^2 - 1}} = \frac{L}{c} \cdot \frac{n(\lambda)^2 \beta}{\sqrt{n(\lambda)^2 \beta^2 - 1}}$$

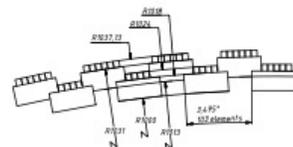
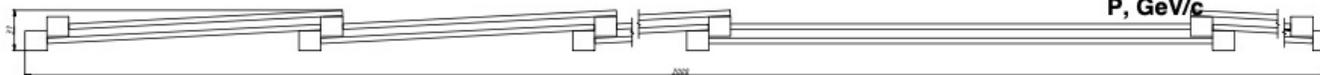
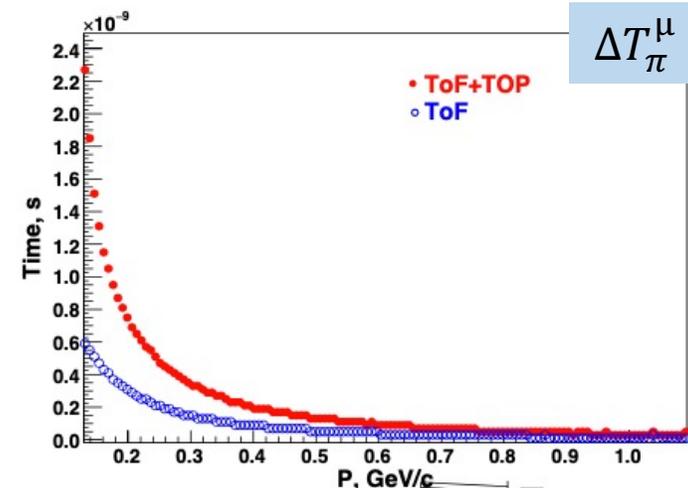
Time of Propagation (ToP) can improve the Time of Flight (ToF).

Супер С-Тау фабрика: ТоF+ТоР концепция



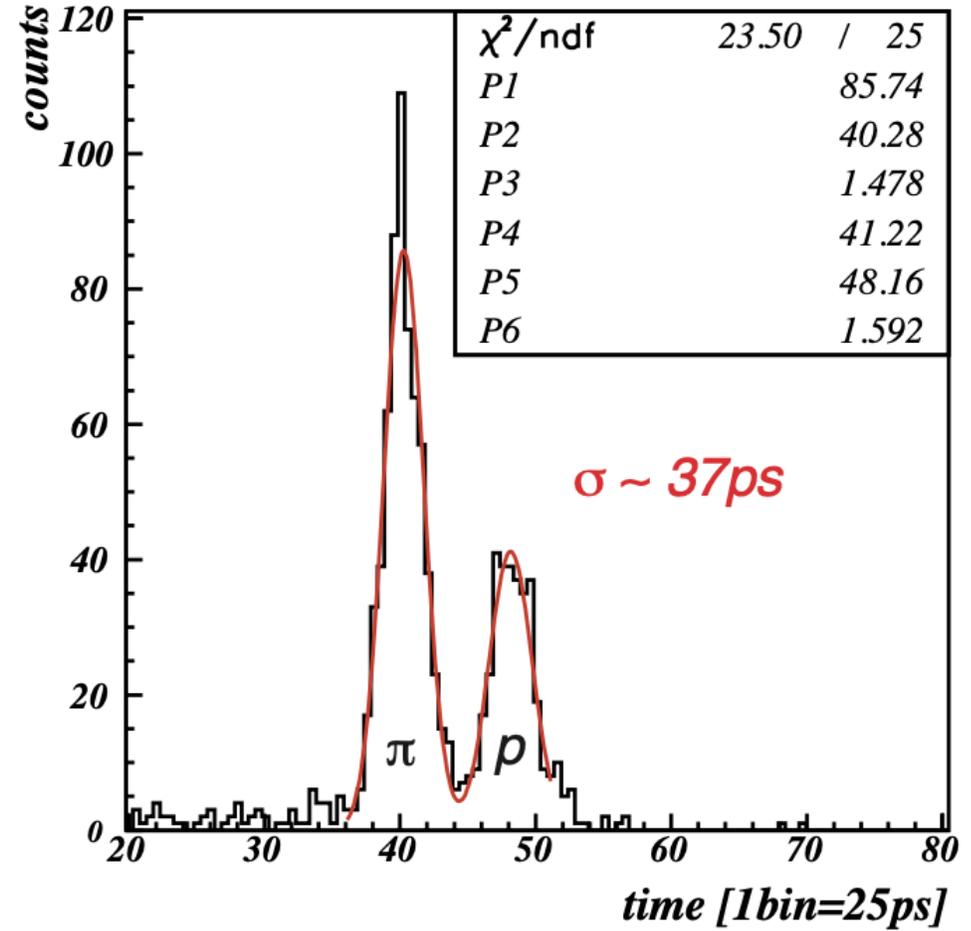
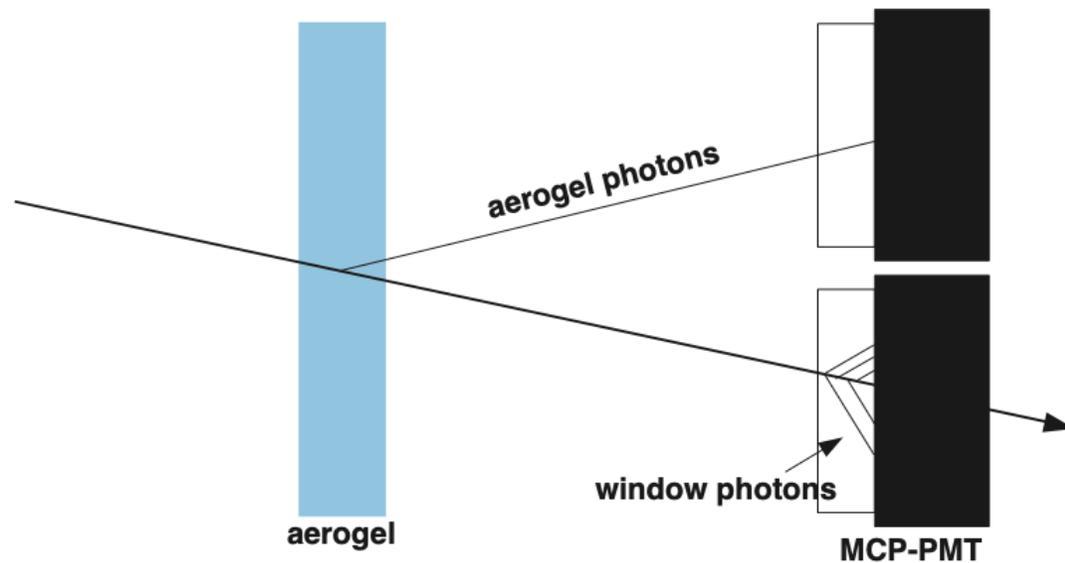
Main parameters

- π/K -separation from up to 2500 MeV/c
- μ/π -separation from 250 to 500 MeV/c
- Preliminary design:
 - Quartz bars $5 \times 5 \times 250 \div 500$ mm – 10000 pcs
 - 1648 – MCP PMTs $\sim 40 \times 20$ mm with 12 anodes
 - Amount of material $\sim 7\%X_0$



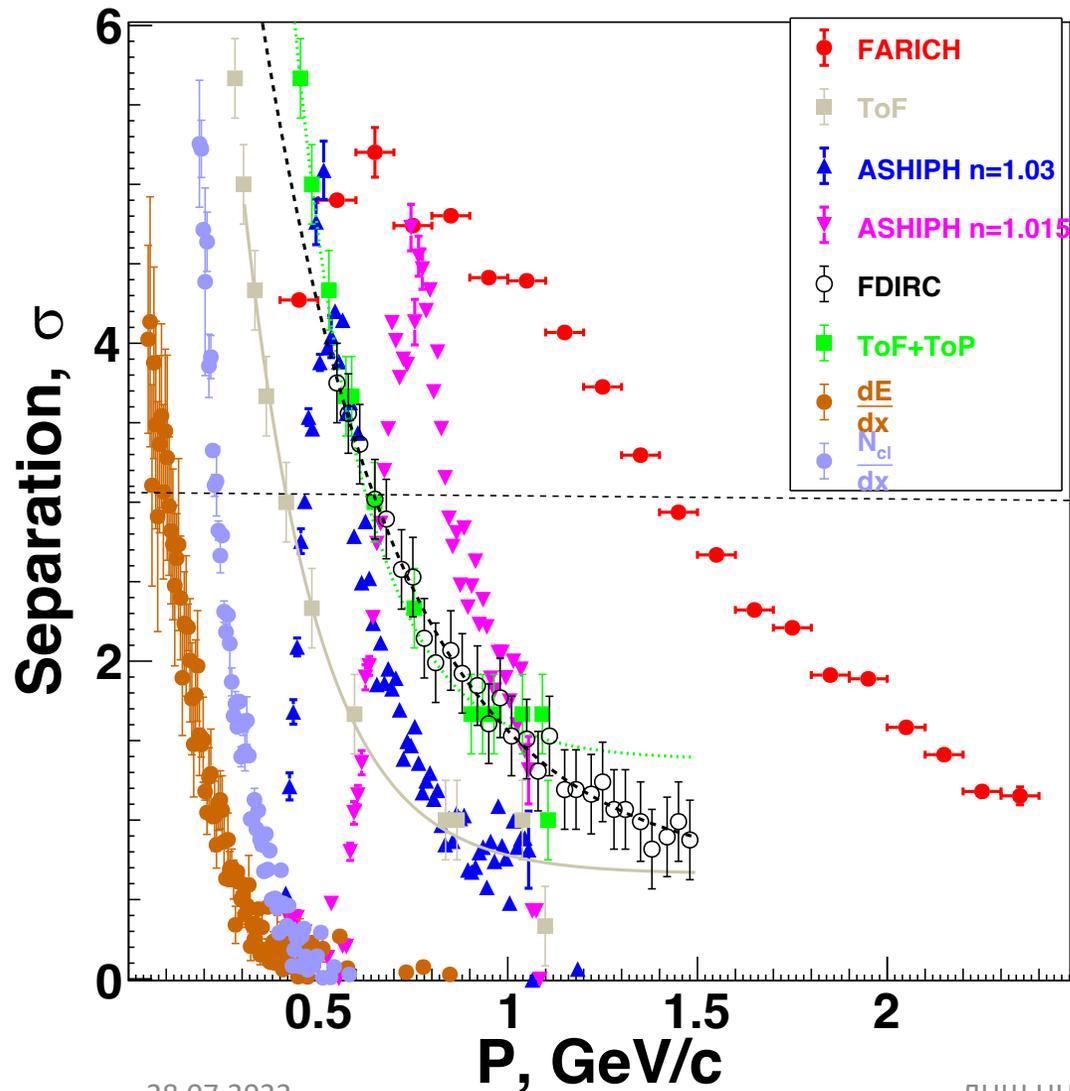
A.Yu. Barnyakov et al., *EPJ Web Conf.* **212** (2019) 01012.

Супер С-Тау фабрика: RICH+ToF

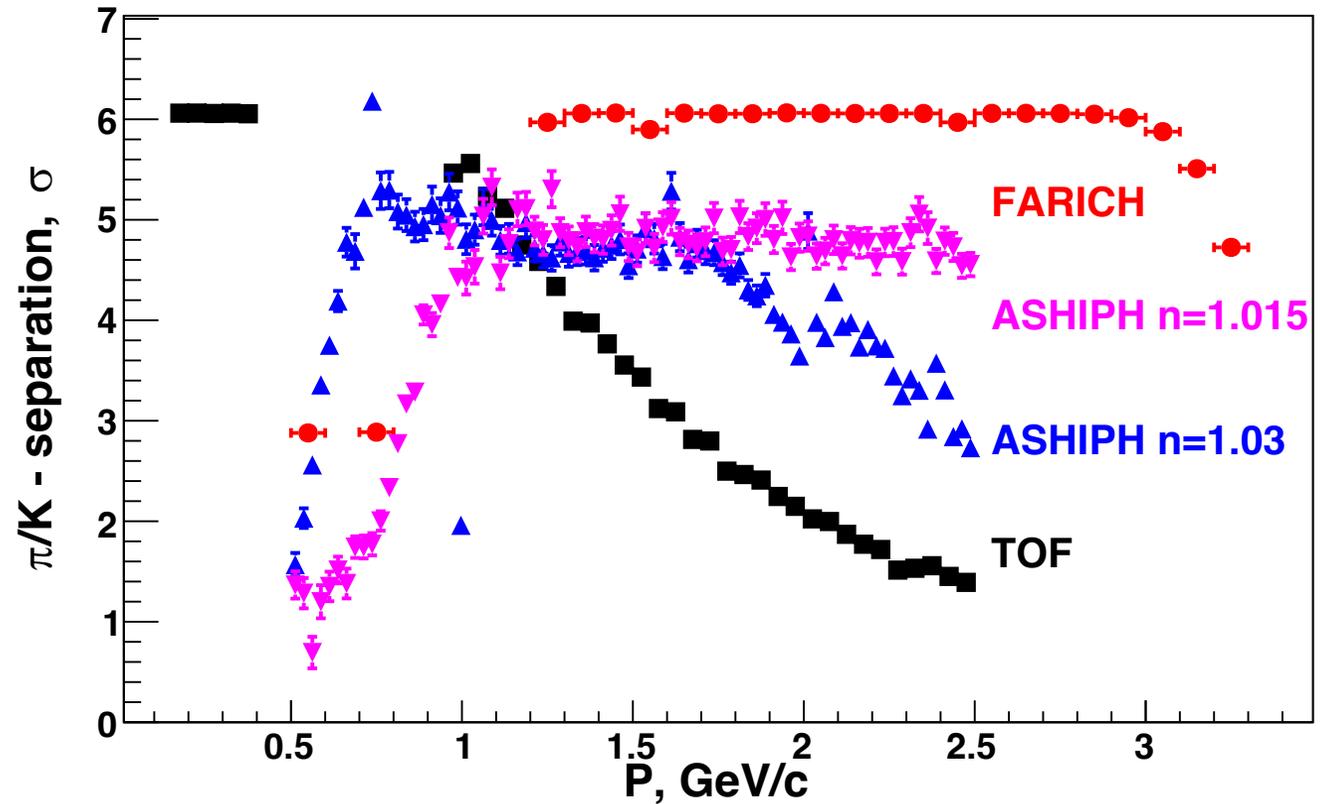


Супер С-Тау фабрика: сравнение PID опций

μ/π -разделение



π/K -разделение



Заключение

- Рассмотрены 4 метода идентификации частиц, применяемые в экспериментах на встречных пучках: dE/dx , ToF , ЧИ, РПИ
- Современные прецизионные эксперименты, такие как Супер С-Тау фабрика предъявляют серьезные требования к системам идентификации
 - π/K – разделение во всем рабочем диапазоне импульсов (до 3 ГэВ/с)
 - μ/π – разделение до 1.5 ГэВ/с
- Такие требования можно удовлетворить, комбинируя информацию о частице с нескольких систем
- Сейчас хороший момент, чтобы подключиться к разработке системы идентификации для проекта Супер С-Тау фабрика!!!

Рекомендуемая литература

1. Добрецов Ю.П. «Методы идентификации частиц в экспериментальной физике высоких энергий». Конспект лекций. М.: МИФИ, 2000. 68 с.
2. Peter Križan «Advances in particle-identification concepts», 2009 JINST 4 P11017
3. J. Va'vra «Particle identification methods in high-energy physics», NIM A454 (2000) 262-278
4. Boris Dolgoshein «Transition radiation detectors», NIM A326 (1993) 434-469