

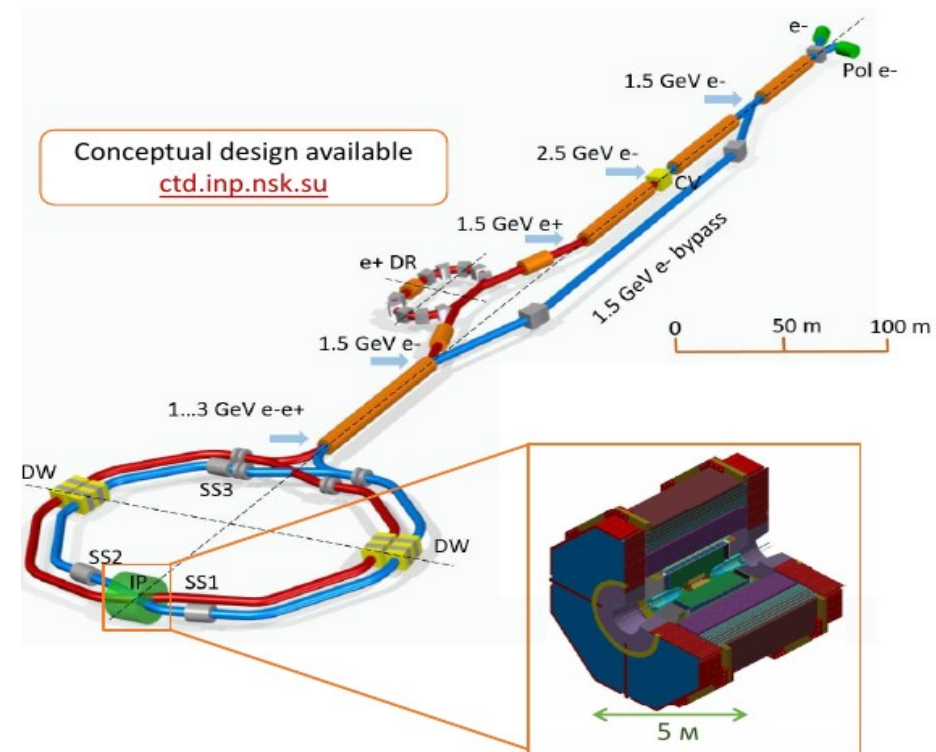
Калориметрия в ФВЭ

Д. А. Епифанов (ИЯФ, НГУ)

НЦФМ, 27 Июля 2022 г.

План:

- Введение
- **Электромагнитные калориметры полного поглощения**
- Электромагнитные сэмплинг-калориметры
- Адронные калориметры
- Заключение



Введение

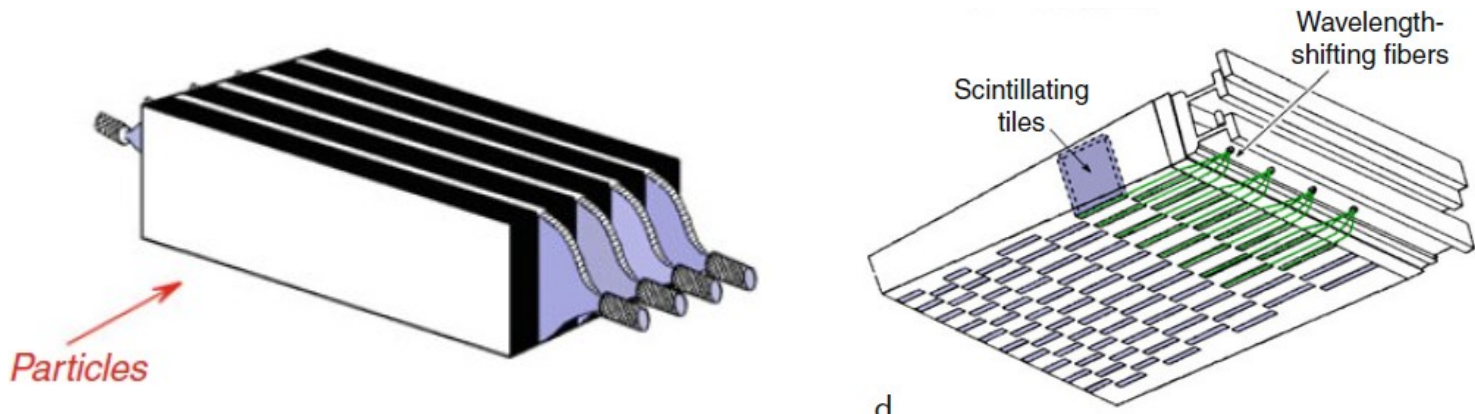
- **Калориметр** – прибор для измерения энергий и координат элементарных частиц.
- В современных универсальных детекторах частиц в экспериментах на e^+e^- коллайдерах импульсы *заряженных* частиц с высокой точностью измеряются в дрейфовых камерах.
- **Электромагнитный (э/м) калориметр** предназначен для измерения энергии и координат *гамма-квантов* (с энергией > 10 МэВ) с высокой точностью.
- **Э/м калориметр** используется для идентификации частиц (разделение e и μ , π , p). Информация с э/м калориметра используются в триггере детектора. Также сигналы с калориметра используются для мониторингования светимости коллайдера во время эксперимента и определения набранного интеграла светимости (оффлайн анализ данных).
- В экспериментах на e^+e^- коллайдерах при *низких и средних* энергиях в с.ц.м. ($\sim < 10$ ГэВ: КМД-3 & СНД @ ВЭПП-2000, BESIII @ BEPC II, Belle II @ SuperKEKB) множественность рождающихся частиц в событии всё ещё не очень высокая и параметры большинства долгоживущих адронов (p , π^\pm , K^\pm , K_S) могут быть измерены *без адронного калориметра* (искл: n , K_L).
- В экспериментах на e^+e^- коллайдерах при *высоких* энергиях в с.ц.м. (~ 100 ГэВ – ALEPH, DELPHI, OPAL, L3 @ LEP) и на *адронных коллайдерах* (ATLAS, CMS, LHCb @ LHC) рождается *большое* число адронов, адронные струи. Требуется адронный калориметр.
- **Адронный калориметр** предназначен для измерения энергии и координат адронов или адронных струй.
- **Калориметры по типу регистрируемой частицы: электромагнитные и адронные**

Два класса калориметров

- В веществе калориметра поглощается почти вся энергия измеряемой частицы, сама начальная частица обычно исчезает. Основная часть выделившейся в калориметре энергии переходит в тепло.
- В **гомогенных** калориметрах (*полного поглощения*) **всё вещество является активным** (и поглотителем и детектором). В активном веществе часть выделившейся в нём энергии преобразуется в измеряемый сигнал. Пример: сцинтилляционный кристалл ВГО (сигнал – вспышка сцинтилляционного света), объём с LXe (сигнал – ионизация).



- В **гетерогенных** калориметрах (сэмплинг-калориметрах) только **часть вещества является активной**. Такой калориметр состоит из неактивных поглощающих элементов и активных детектирующих. Сэмплинг-калориметр может быть выполнен, например, по схеме сэндвич.



Взаимодействие частиц с веществом (I)

Заряженные частицы

Ионизационные потери, формула Бете-Блоха

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион.}} = K z^2 \frac{Z}{A \beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \varepsilon_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right),$$

$$\varepsilon_{\text{max}} = 2m_e \frac{M^2 + m_e^2 + 2Em_e/c^2}{M^2 + m_e^2}$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0,307075 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$$

$$\delta(\beta\gamma)/2 \rightarrow \ln(\hbar\omega_p/I) + \ln\beta\gamma - 1/2$$

$$(dE/dx)_{\text{МИН}} = (1 - 2) \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$$

Тормозное излучение

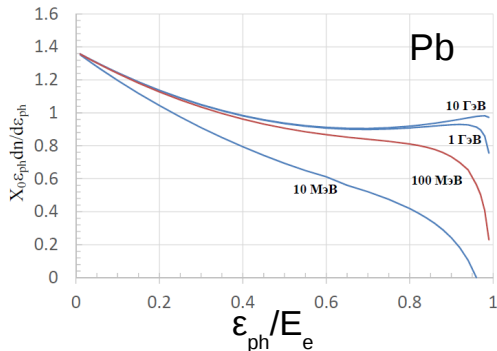
Для электрона:

$$-\frac{dE}{dx} \approx 4\alpha N_A \cdot \frac{Z^2}{A} r_e^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}, \quad E \gg m_e c^2 / \alpha Z^{1/3}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}, \quad X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z(Z+1)r_e^2 \ln(183 Z^{-1/3})} = \frac{716.4 \cdot A[\text{г}/\text{мол}]}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \text{ г}/\text{см}^2$$

X_0 – радиационная длина, $X_0 \sim m_e^2 A/Z^2$

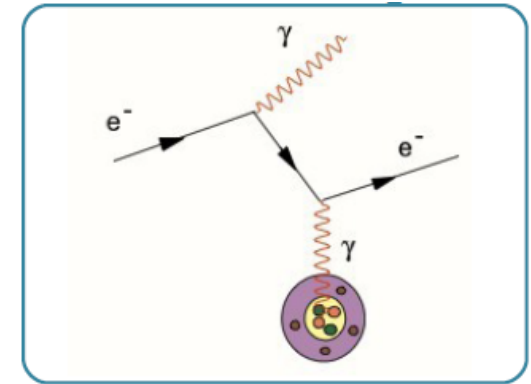
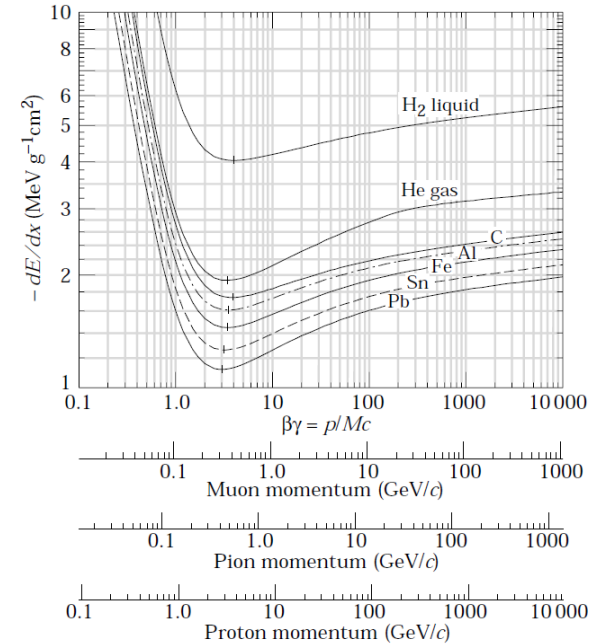
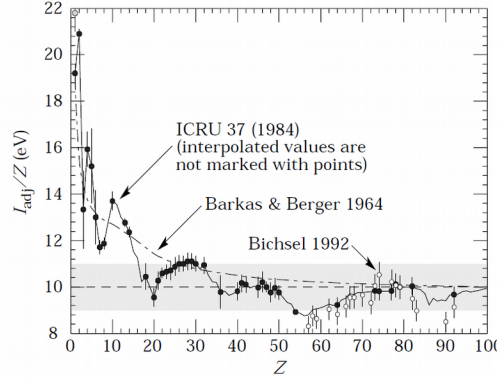
$$X_0 = \frac{1}{\sum \rho_i / X_0^i} \quad \rho_i - \text{массовая доля компонента с радиационной длиной } X_0^i$$



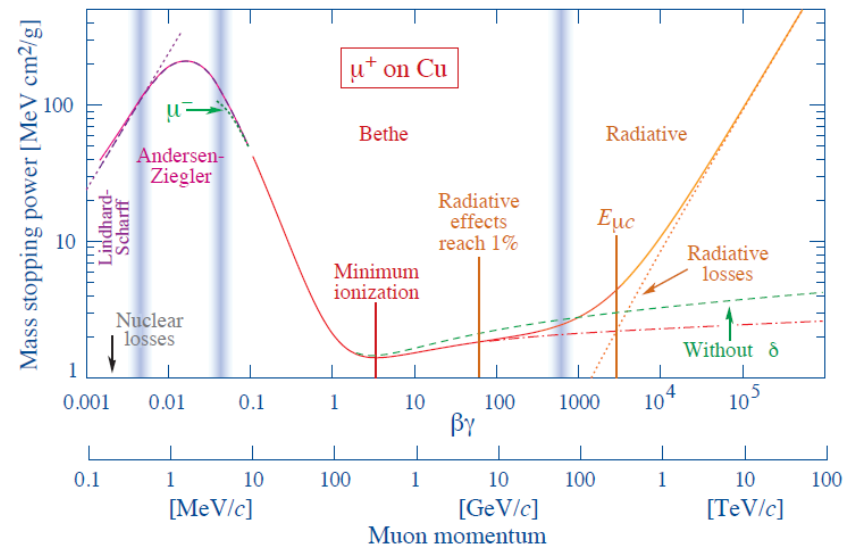
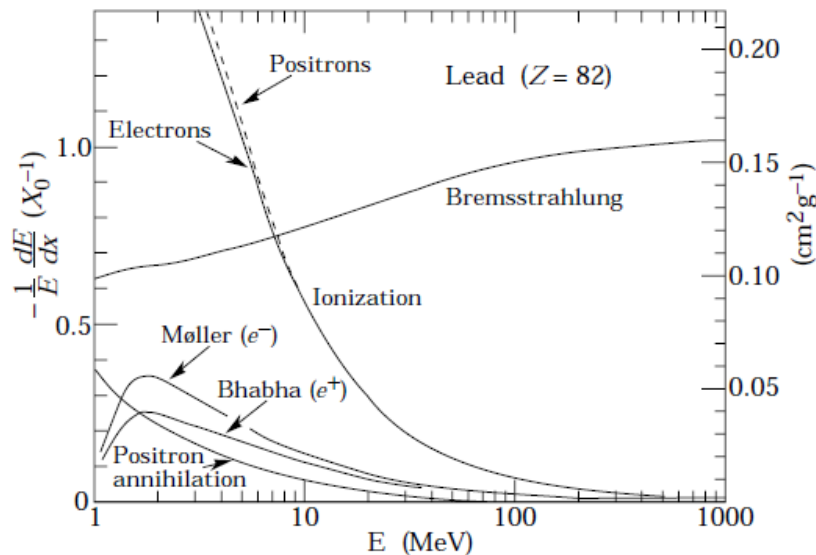
$$\frac{dn}{d\varepsilon_{ph} dx} = \frac{1}{X_0 \cdot \varepsilon_{ph}} \left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3}y + y^2 \right), \quad y = \varepsilon_{ph}/E_e$$

Угловое распределение фотонов:

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \sim \frac{m_e c^2}{E_e} \ln \frac{E_e}{m_e c^2}$$



Взаимодействие частиц с веществом (II)



Вводится понятие **критической энергии** электрона E_c , при которой:
 $(dE/dx)_{\text{ион}} = (dE/dx)_{\text{торм}} = E_c / X_0$

Твёрдые тела, жидкости:

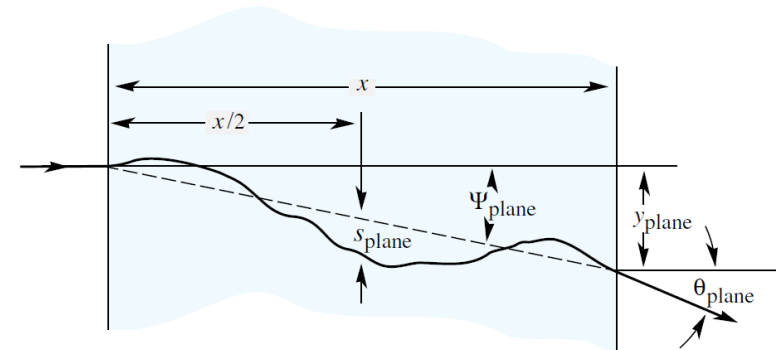
Газы:

$$E_c = \frac{610 \text{ МэВ}}{Z + 1,24} \quad E_c = \frac{710 \text{ МэВ}}{Z + 0,92}$$

- Множественное рассеяние**

Множественное рассеяние движущейся через вещество заряженной частицы на малые углы происходит в результате взаимодействия частицы с ядрами атомов вещества на больших прицельных параметрах (теория Мольера). Область малых углов рассеяния описывается **распределением Гаусса**.

$$\theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2}\right) \right]$$



Взаимодействие частиц с веществом (III)

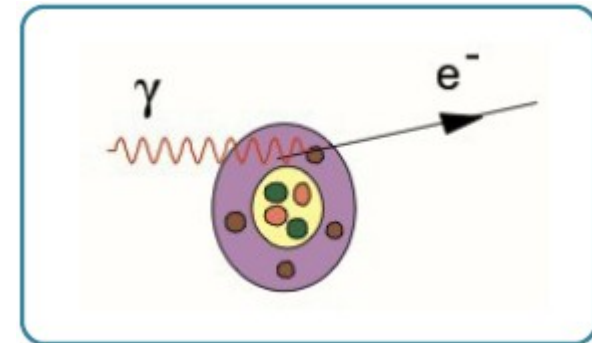
ФОТОНЫ:

• Фотоэффект

$$\sigma_{\text{photo}}^{\text{K}} = \left(\frac{32}{\epsilon^7}\right)^{1/2} \alpha^4 \cdot Z^5 \cdot \sigma_{\text{Th}}^e, \quad \epsilon = E_\gamma / m_e c^2, \quad E_\gamma \approx E_{\text{K}}$$

$$\sigma_{\text{photo}}^{\text{K}} \sim \left(\frac{1}{\epsilon^5}\right)^{1/2} \quad \text{для } E_{\text{K}} \ll E_\gamma \ll m_e c^2$$

$$\sigma_{\text{photo}}^{\text{K}} = 4\pi r_e^2 Z^5 \alpha^4 \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad \text{для } \epsilon \gg 1 \quad \sigma_{\text{Th}}^e = \frac{8}{3} \pi r_e^2 = 665 \text{ мбн}$$



• Комptonовское рассеяние

Формула Клейна-Нишины:

$$\sigma_C = \frac{\pi r_e^2}{\zeta} \left[\left(1 - \frac{2}{\zeta} - \frac{2}{\zeta^2}\right) \ln(1 + 2\zeta) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\zeta} - \frac{1}{2(1 + 2\zeta)^2} \right]$$

$$\zeta = E_\gamma / m_e c^2$$

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \zeta(1 - \cos \theta_\gamma)}$$

$$\sigma_C = \frac{\pi r_e^2}{\zeta} \left(\ln 2\zeta + \frac{1}{2} \right) \quad \text{для } \zeta \gg 1$$

$$\sigma_C = \sigma_{\text{Th}}^e \quad \text{при } \zeta \rightarrow 0$$

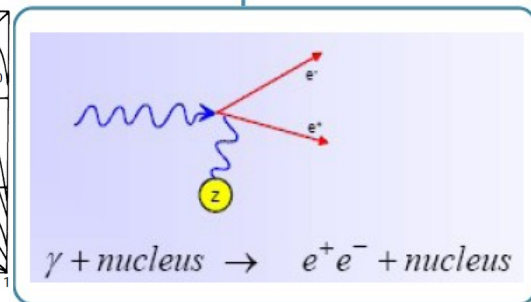
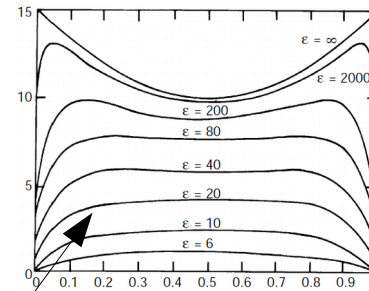
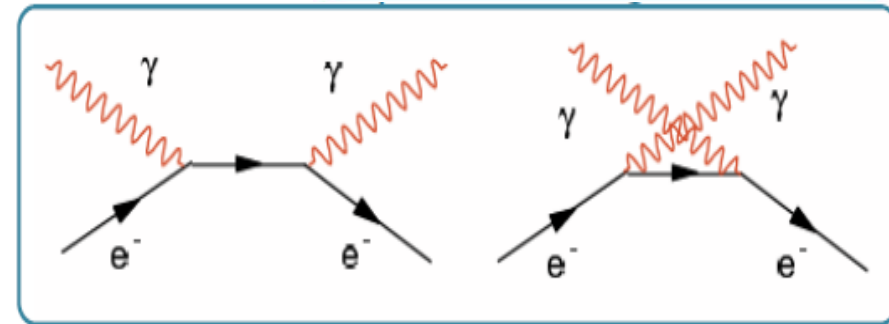
• Рождение пар

Становится возможным при: $E_\gamma \geq 2m_e c^2 + \frac{2m_e^2 c^2}{M_{\text{nuc}}} \approx 2m_e c^2$

$$\sigma_{\text{pair}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln 2\epsilon - \frac{109}{54} \right), \quad 1 \ll \epsilon < \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

$$\sigma_{\text{pair}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{54} \right), \quad \epsilon \gg \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

$$\sigma_{\text{pair}} \approx \frac{7}{9} 4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \approx \frac{7}{9} \cdot \frac{A}{N_A} \cdot \frac{1}{X_0}, \quad \lambda_{\text{pair}} = \frac{1}{n\sigma_{\text{pair}}} = \frac{9}{7} X_0$$



Спектр по относительной энергии электрона $x = \frac{E_+ - m_e c^2}{E_\gamma - 2m_e c^2}$
 Характерные углы между e+ и e-: $\Theta \approx m_e c^2 / E_\gamma$

Взаимодействие частиц с веществом (IV)

Пучок фотонов в веществе убывает по экспоненциальному закону: $I = I_0 \exp(-\mu x)$

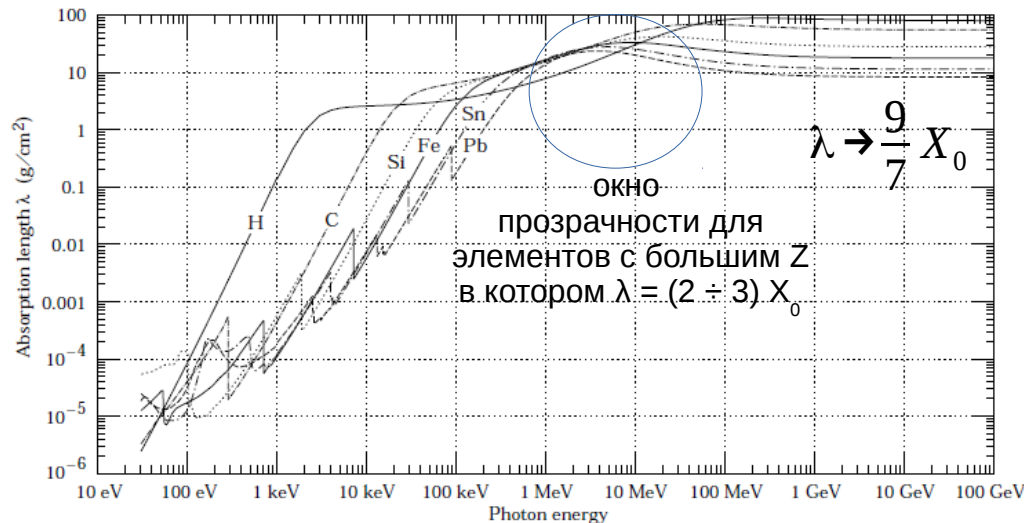
$$\mu = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i$$

– массовый коэффициент ослабления
 σ_i – атомное сечение процесса i

<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>

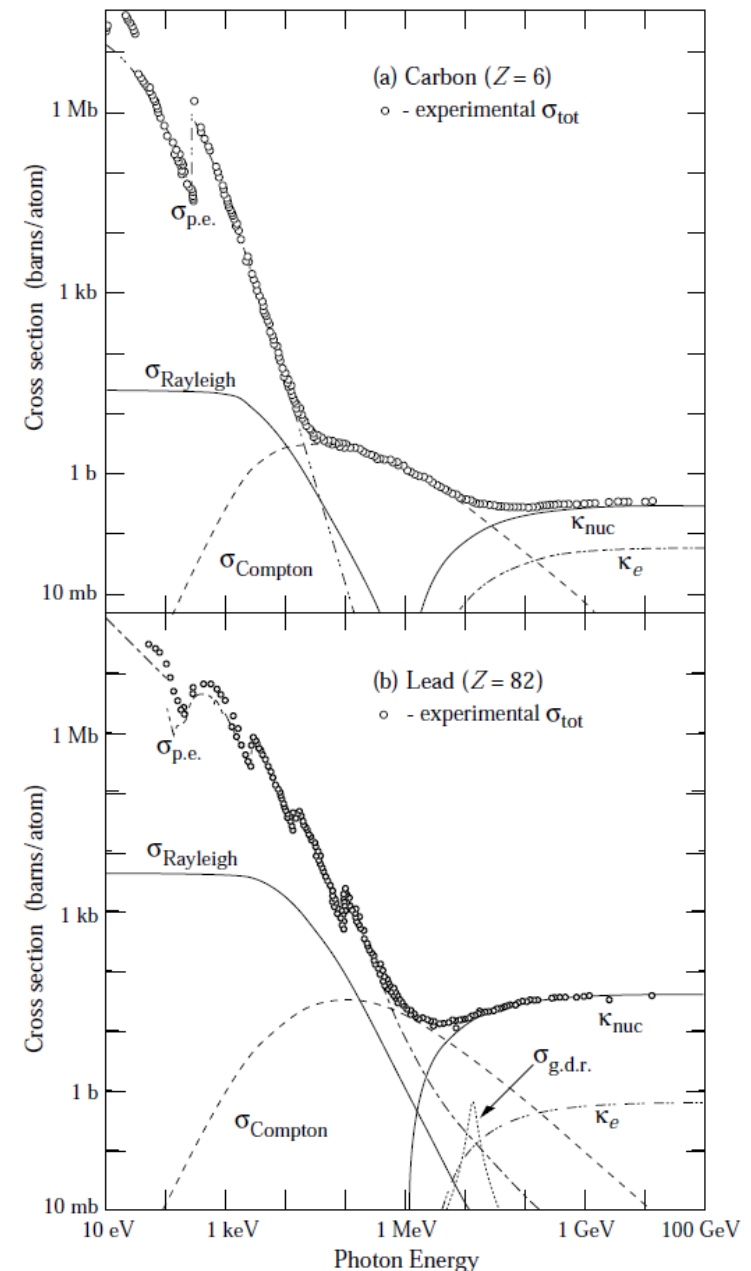
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

Длина ослабления: $\lambda = \frac{1}{\mu}$



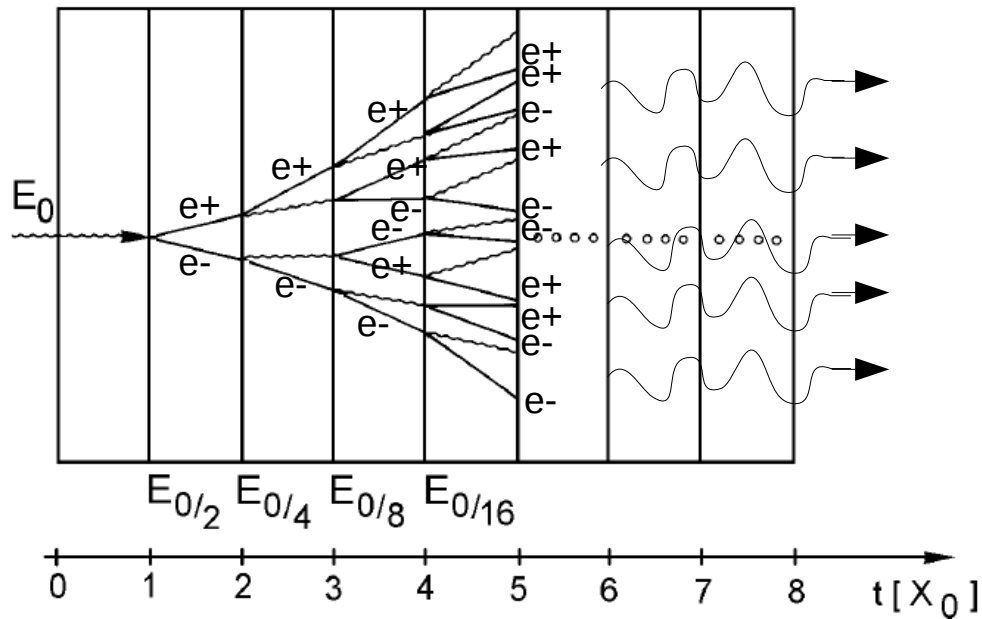
Для химического соединения: $\lambda_{eff} = \frac{1}{\mu_{eff}}, \mu_{eff} = \sum w_Z \mu_Z$

w_Z – массовая доля элемента с зарядом ядра Z в химическом соединении



Электронно-фотонный ливень (I)

При энергиях ~ 100 МэВ электроны теряют энергию в основном из-за тормозного излучения, а основным процессом взаимодействия γ -квантов с веществом является рождение пар. Таким образом при попадании высокоэнергичного γ -кванта или e^\pm в вещество в нём развивается электрон-фотонный (электромагнитный) каскадный процесс (ливень). Характерный пространственный масштаб обоих процессов - X_0 .

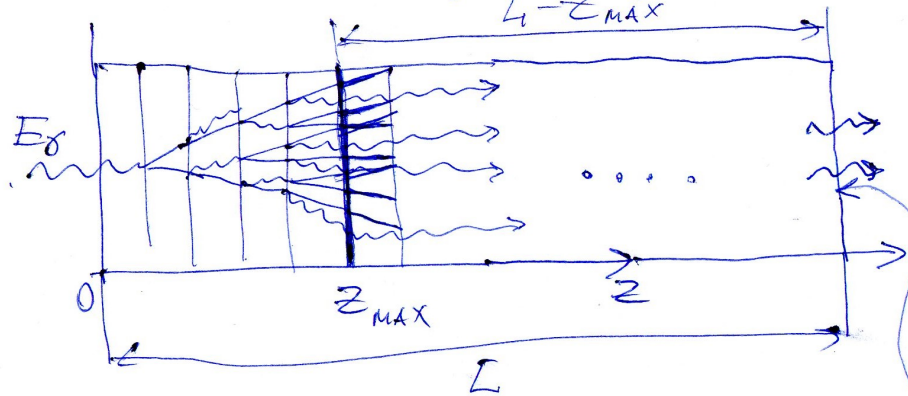


Упрощённая модель ливня:

- Энергия начальной частицы $E_0 \gg E_c$
- Очередное удвоение числа частиц в ливне происходит при прохождении ливнем X_0 , при этом $e^\pm \rightarrow e^\pm \gamma$, $\gamma \rightarrow e^+ e^-$, энергия начальной частицы делится пополам.
- Ионизационными потерями e^\pm пренебрегаем то тех пор пока $E_{e^\pm} > E_c$
- По достижении частицей E_c ливень достигает максимума: $N_0 = E_0/E_c = 2^{t_{\max}}$, $t_{\max} = \log_2(E_0/E_c)$, $N(e^\pm) = (2/3)N_0$, $N(\gamma) = N_0/3$
- После достижения максимума ливня в следующем слое $\sim X_0$ e^\pm оставляют всю свою энергию, а фотоны с энергией E_c (фотоны утечки) попадают в окно прозрачности вещества и далее двигаются в веществе с затуханием $\lambda = (2-3)X_0$.
- Флуктуации числа фотонов утечки, которые покинули объём вещества калориметра ограничивают энергетическое разрешение $\sigma_E/E \sim 1/E_\gamma^{1/4}$

Длина e^\pm - компоненты ливня: $L = \frac{2}{3} X_0 \sum_{k=0}^{t_{\max}-1} 2^k + \frac{2}{3} N_0 s_0 = \frac{2}{3} X_0 2^{t_{\max}} + \frac{2}{3} N_0 s_0 = \frac{2}{3} (X_0 + s_0) \frac{E_0}{E_c} = \kappa E_0$
 пропорциональна энергии начального фотона E_0

Оценить зависимость энергетического разрешения калориметра полтора по отношению от энергии поглощенного γ -кванта, E_γ , где доминируют большие энергии $E_\gamma \gg E_c$.



В соответствии с упрощенной моделью э/и пробоя в везелке в точке локального минимума

$$z_{\max} \approx \ln \frac{E_\gamma}{E_c} \text{ число } \gamma\text{-квантов с энергией } \sim E_c \text{ пробоя } N_\gamma^{\max} = \frac{1}{3} \frac{E_\gamma}{E_c}$$

Далее, в слое везелки $L - z_{\max}$ эти γ -кванты ионизируются и из задних стенок калориметра вылетают:

$$N_\gamma^{\text{out}} = N_\gamma^{\max} e^{-\frac{(L - z_{\max})}{d}}, \text{ где } d = 2\lambda_c$$

Таким образом $N_\gamma^{\text{out}} = \frac{1}{3} \frac{E_\gamma}{E_c} e^{\frac{z_{\max}}{2\lambda_c}} e^{-\frac{L}{2\lambda_c}} = \frac{1}{3} e^{-\frac{L}{2\lambda_c}} \left(\frac{E_\gamma}{E_c}\right)^{1 + \frac{1}{2\lambda_c}}$, флуоресцирующая масса γ -кванты вылетающие через заднюю стенку (утолщающую) $\sqrt{N_\gamma^{\text{out}}} = \frac{1}{\sqrt{3e^{\frac{L}{2\lambda_c}}}} \left(\frac{E_\gamma}{E_c}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2\lambda_c}}$ соответственно флуоресцирующая утолщающая энергии $\delta E = E_c \cdot \sqrt{N_\gamma^{\text{out}}}$. Поэтому энергетическое разрешение калориметра

будет $\frac{\delta E}{E_\gamma} = \frac{E_c}{E_\gamma} \sqrt{N_\gamma^{\text{out}}} = \frac{1}{\sqrt{3e^{\frac{L}{2\lambda_c}}}} \left(\frac{E_\gamma}{E_c}\right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2\lambda_c}}$. Таким образом энергетическое разрешение калориметра зависит от энергии, E_γ , поглощенного кванта как:

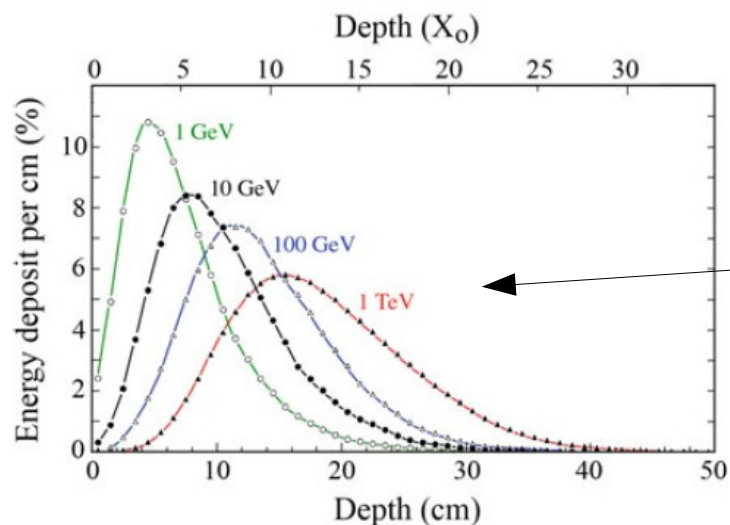
$$\frac{\delta E}{E} \sim \frac{1}{E^{\frac{1}{2}(1 - \frac{1}{\lambda_c})}} \text{ где } \lambda_c \text{ — толщина кристаллов с } X_0 \sim 2 \text{ см } \underline{\underline{\nu = 2}} \text{ и } \left[\frac{\delta E}{E} \sim \frac{1}{E^{1/4}} \right]$$

Электронно-фотонный ливень (II)

Параметризация E. Longo и I. Sestili (1975):

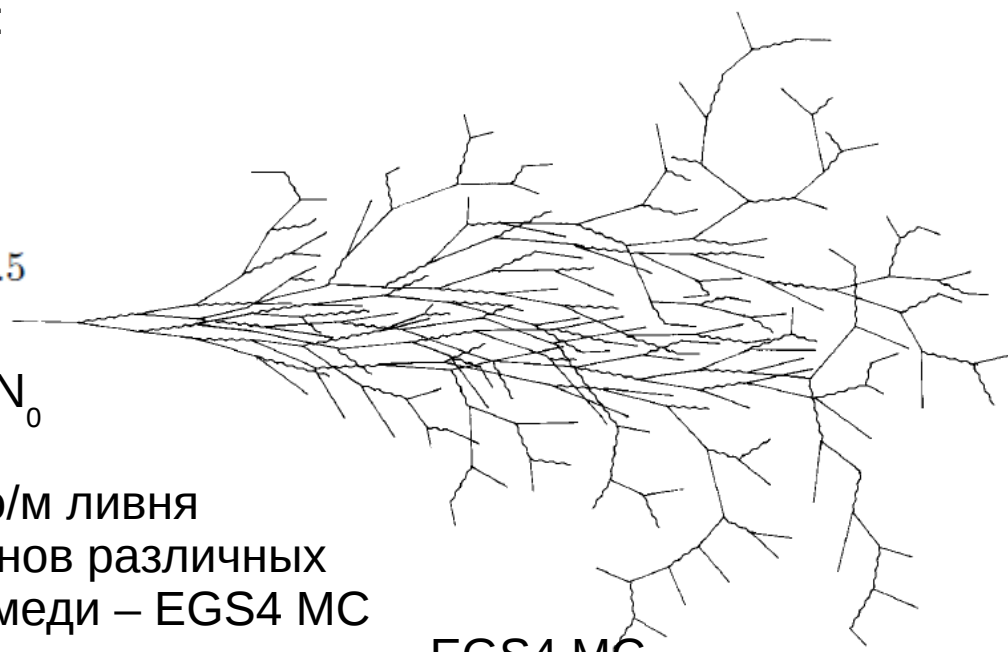
$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}, \quad t = x/X_0, \quad b \approx 0.5$$

$$t_{\max} = (a - 1)/b = \ln y + C_j, \quad C_e = -0.5, \quad C_\gamma = +0.5$$

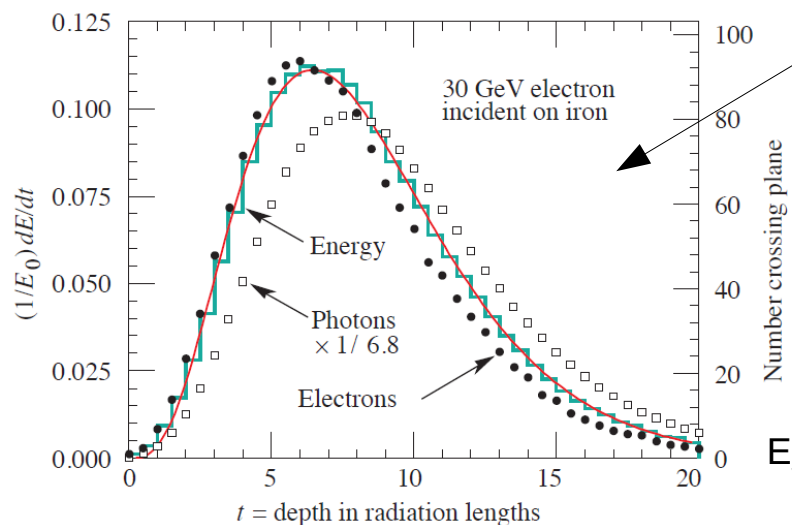


$$y = E_0/E_c = N_0$$

Профили э/м ливня от электронов различных энергий в меди – EGS4 MC

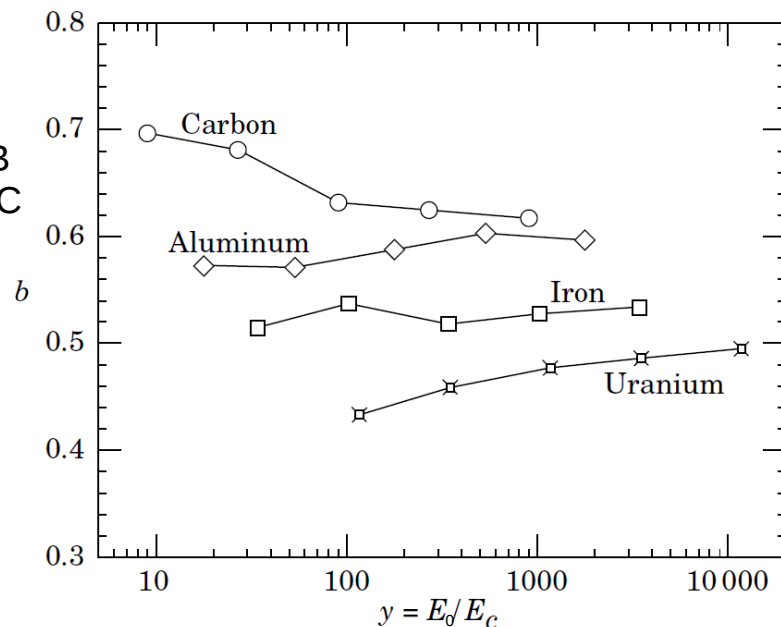


EGS4 MC



Профиль э/м ливня от электрона 30 ГэВ в железе – EGS4 MC

$E_{\gamma,e} > 1.5 \text{ МэВ}$

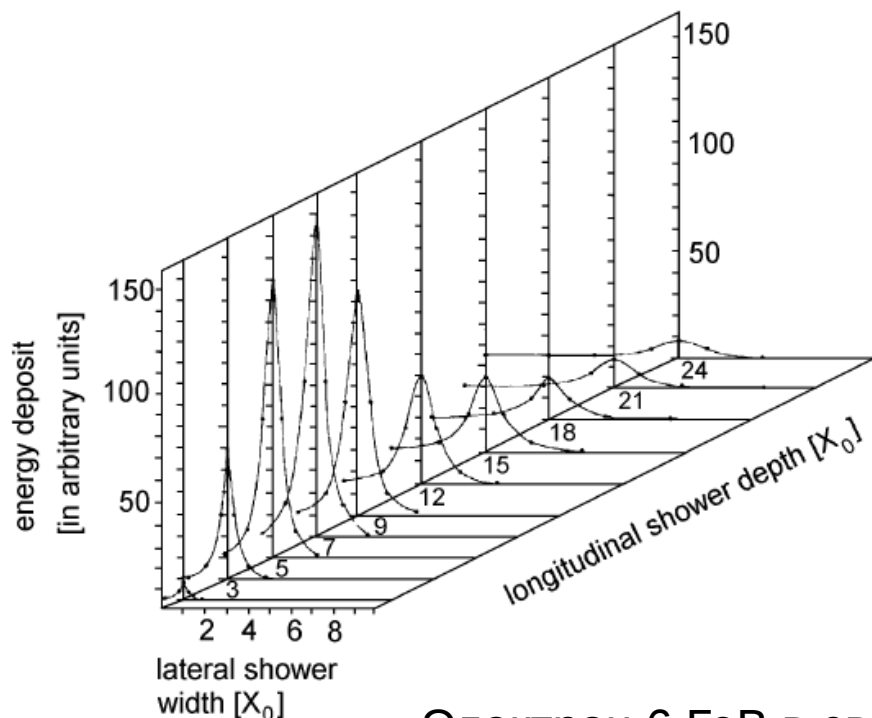


Электронно-фотонный ливень (III)

- Поперечная ширина э/м ливня определяется процессами многократного рассеяния e^\pm вблизи максимума ливня и выражается в единицах Мольеровского радиуса:

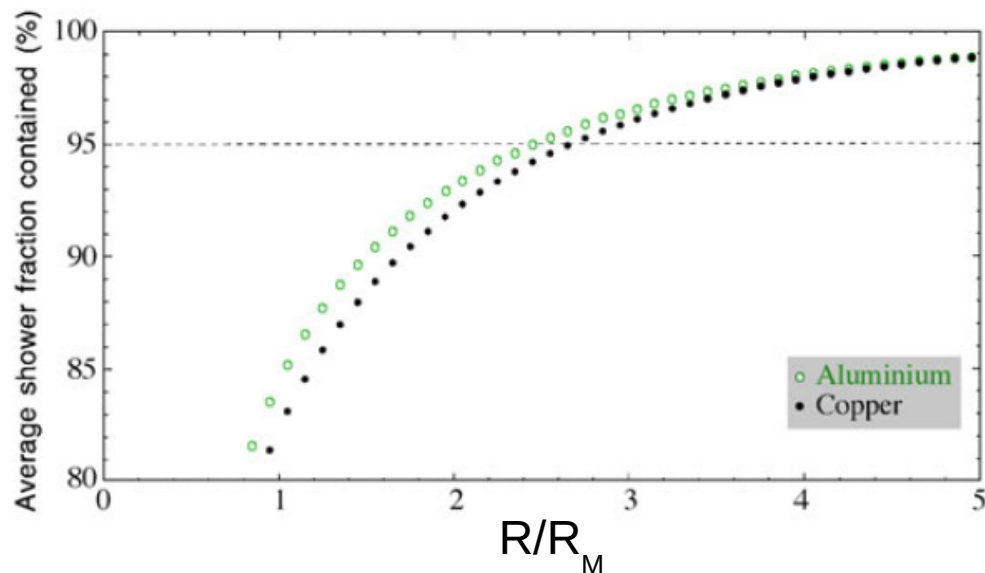
$$R_M = \frac{21 \text{ (МэВ)}}{E_c} X_0$$

Поперечное распределение имеет ядро (R_M) и более широкое гало – описывается суммой двух распределений Гаусса.
В среднем около 85% / 99% энергии ливня находится в цилиндре радиуса $R_M / 3.5R_M$



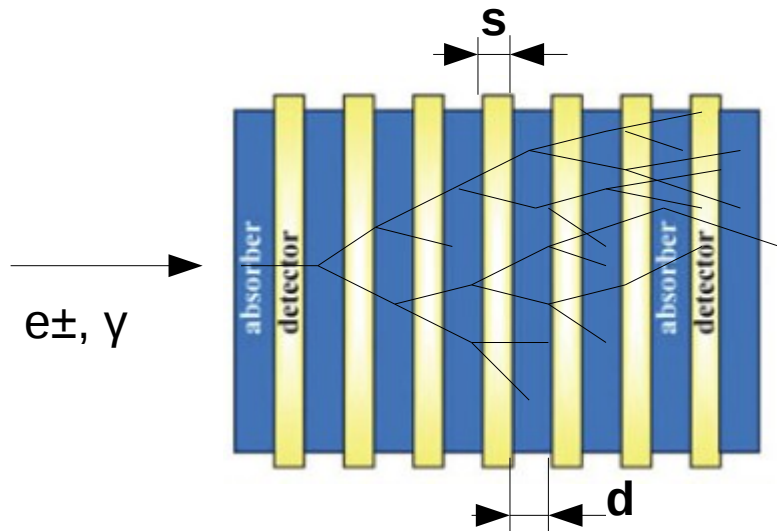
Электрон 6 ГэВ в свинце

EGS4 MC: доля энергии ливня в бесконечно длинном цилиндре радиуса R для различных веществ



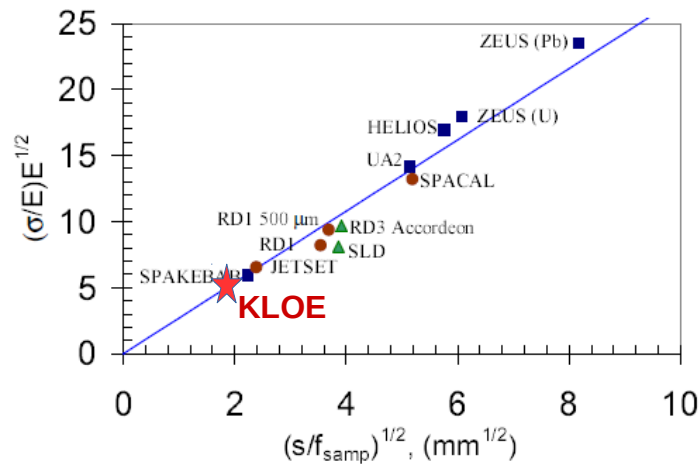
Электромагнитные калориметры (I)

Сэмплинг-калориметры



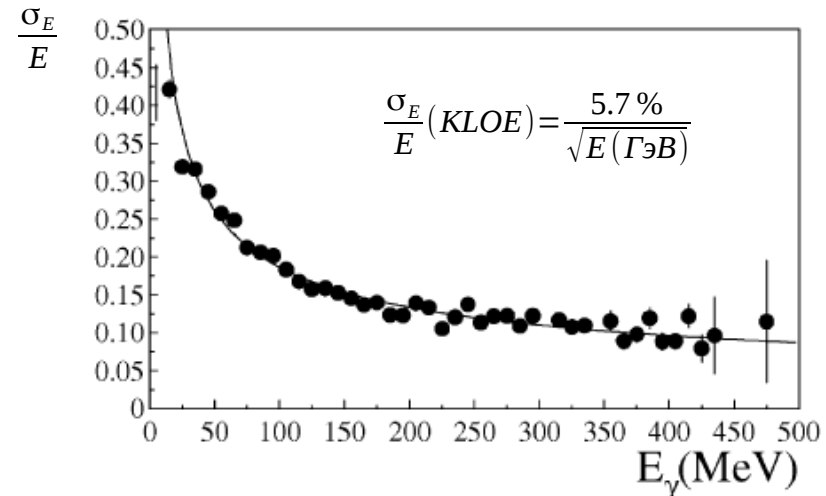
Активные слои детекторов пересекают e^\pm ливня, в результате часть общей длины e^\pm - компоненты ливня L , $L\varepsilon$, порождает сигнал (ионизационные потери) в детекторах, **пропорциональный** L , а значит и **энергии начальной частицы E_0** .

Количество задетектированных сегментов треков (частиц ливня) $N_{det} = L\varepsilon/s = \kappa E_0 \varepsilon/s$. Флуктуация этого числа $\sigma(N_{det}) = \sqrt{N_{det}(1-\varepsilon)}$ приводит к $\sigma(E_0)/E_0 \sim \sqrt{s/E_0}$

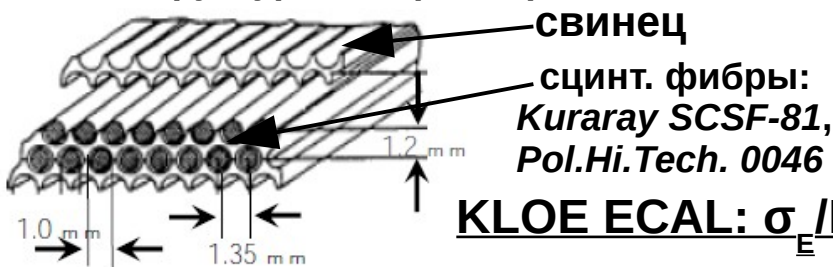


$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}} \sqrt{\frac{s[\text{мм}]}{f_{\text{сэмп}}}} \quad - \text{стохастический вклад доминирует}$$

$$f_{\text{сэмп}} = (dE/dx)_{\text{дет}} \cdot s / ((dE/dx)_{\text{дет}} \cdot s + (dE/dx)_{\text{полг}} \cdot d)$$



Сэмплинг-структура калориметра KLOE



KLOE ECAL: $\sigma_E/E(100 \text{ МэВ}) = 18\%$, $\sigma_E/E(1 \text{ ГэВ}) = 5.7\%$

Электромагнитные калориметры (II)

Калориметры полного поглощения

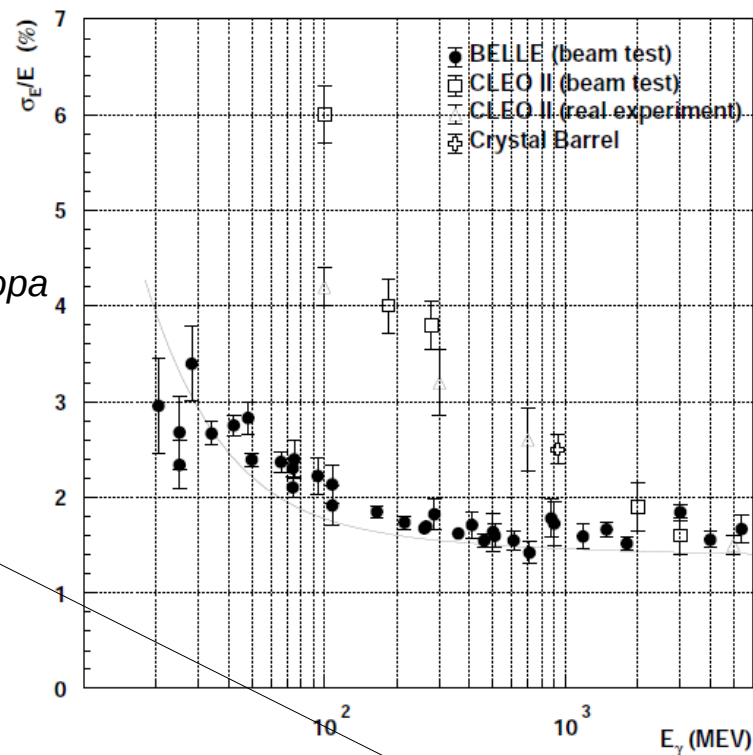
Стохастический вклад в энергетическое разрешение калориметра полного поглощения *бесконечных* размеров обычно мал (связан с конечным порогом регистрации частиц ливня: 0.5 – 1.0 МэВ – т.н. внутренние утечки ливня) и составляет $\sigma_E/E \approx (0.5 - 0.7)\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$

Факторы влияющие на энергетическое разрешение:

- **Продольные (и поперечные) утечки ливня**
- Пассивное вещество перед калориметром и внутри него (эл-ты мех. конструкции)
- **Статистика фотоэлектронов (в фотодетекторе счётчика)**
- **Электронные шумы**
- **Шумы наложения (pile-up noise)**
- Неоднородность отклика калориметра (стыки между частями)
- Стабильность электроники и откликов счётчиков
- Точность калибровки

Искусство экспериментатора – сделать все остальные вклады меньше вклада от продольных утечек ливня

Э/м калориметр Belle (Belle ECL)

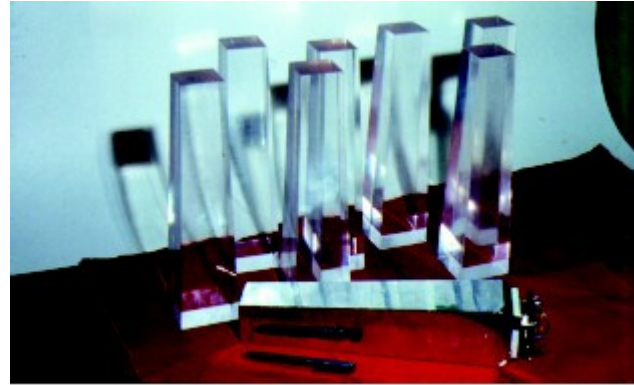
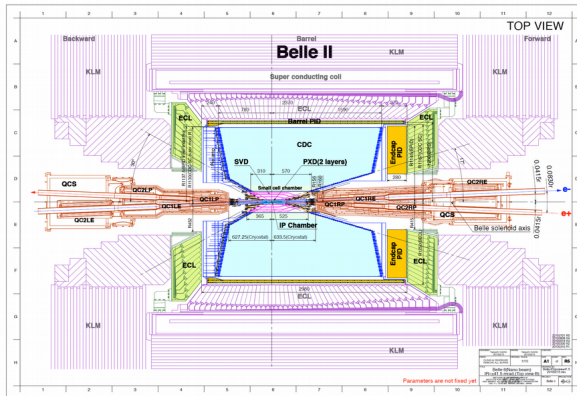


$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{A(\text{утечки})\%}{\sqrt[4]{E[\text{ГэВ}]}} \oplus \frac{B(\text{стат. ф. э.})\%}{\sqrt{E[\text{ГэВ}]}} \oplus \frac{C(\text{Эл. + налож. шумы})\%}{E[\text{ГэВ}]} \oplus D(\text{остальное})\%$$

Э/м калориметры полного поглощения на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) (Belle ECL) показывают рекордное энергетическое разрешение: $\sigma_E/E(100 \text{ МэВ}) = 2.5\%$, $\sigma_E/E(1 \text{ ГэВ}) = 1.9\%$

Электромагнитные калориметры полного поглощения

- **Кристаллические** (на основе неорганических сцинтилляционных кристаллов: CsI, CsI(Tl), CsI(Na), BGO, NaI(Tl) и др.)



- **Ионизационные** (на основе жидких благородных газов: Ar(87 K), Kr(119 K), Xe (165 K))

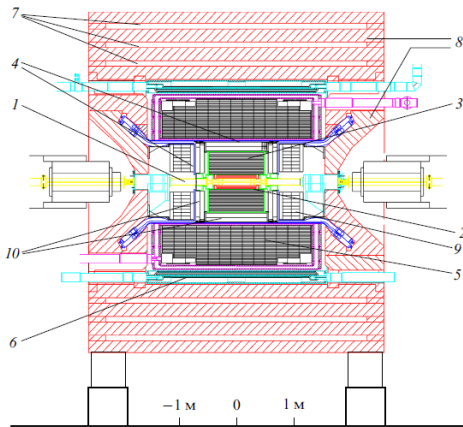
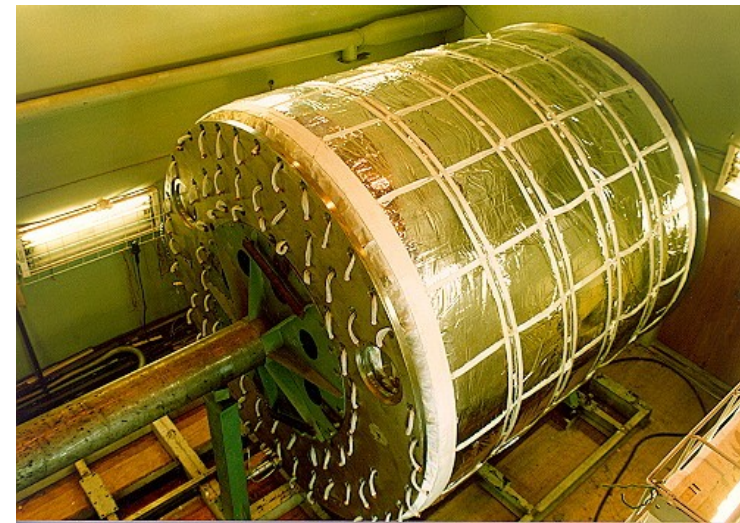
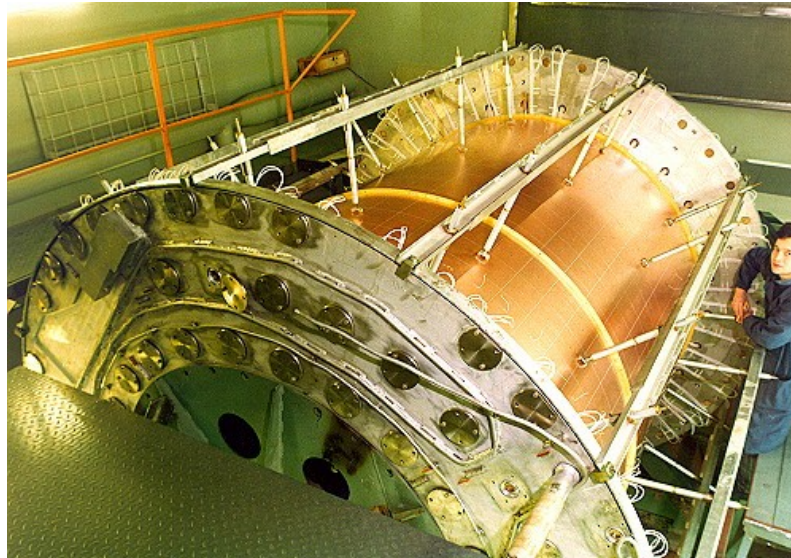


Рис. 2. Схема детектора "Кедр" (продольный разрез): 1 — вакуумная камера, 2 — вершинный детектор, 3 — дрейфовая камера, 4 — времяпролётная система, 5 — цилиндрический калориметр на основе жидкого криптона (LKr), 6 — обмотка магнита, 7 — мионная система, 8 — ярмо магнита, 9 — торцевой калориметр на основе кристаллов CsI, 10 — азотелые черенковские счётчики.



- **Полупроводниковые** (Si, Ge диоды с PIN структурой с большими размерами обеднённой носителями I-области): в ИЯФе эксплуатируются несколько германиевых детекторов, которые используются в системах измерения энергии пучков методом обратного комптоновского рассеяния фотонов на пучке.

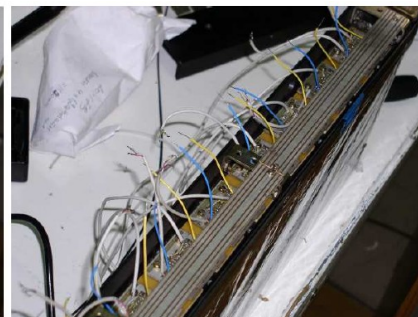
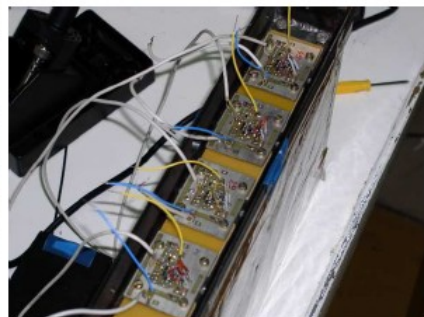
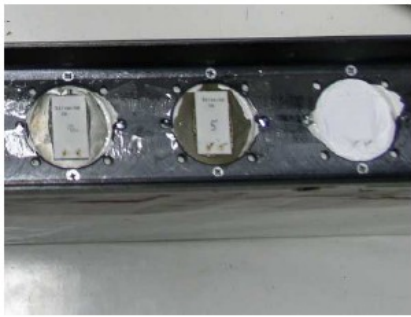
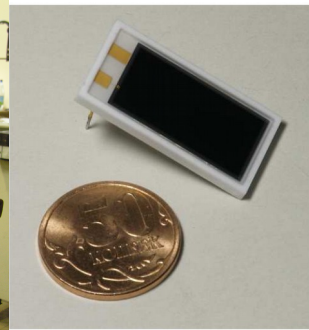
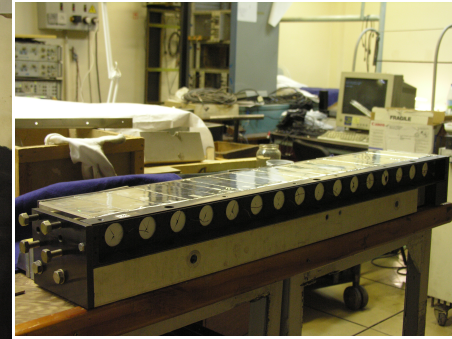
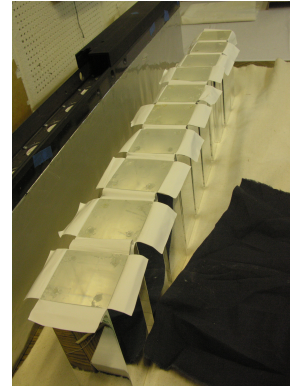
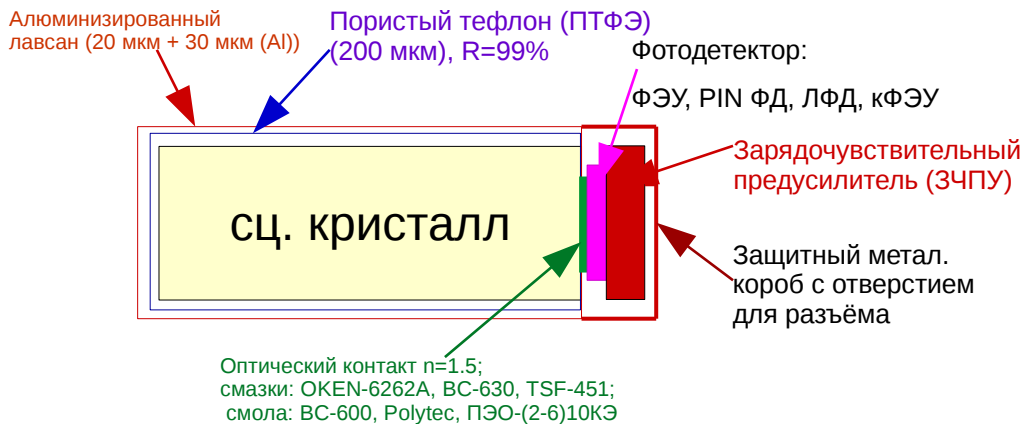
Кристаллические э/м калориметры

| Parameter: | ρ | MP | X_0^* | R_M^* | dE/dx^* | λ_I^* | τ_{decay} | λ_{max} | n^\dagger | Relative output [‡] | Hygroscopic? | $d(LY)/dT$ |
|------------------------|-------------------|------|---------|---------|-----------|---------------|-----------------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------------|-------------------|
| Units: | g/cm ³ | °C | cm | cm | MeV/cm | cm | ns | nm | | | | %/°C [§] |
| NaI(Tl) | 3.67 | 651 | 2.59 | 4.13 | 4.8 | 42.9 | 245 | 410 | 1.85 | 100 | yes | -0.2 |
| BGO | 7.13 | 1050 | 1.12 | 2.23 | 9.0 | 22.8 | 300 | 480 | 2.15 | 21 | no | -0.9 |
| BaF ₂ | 4.89 | 1280 | 2.03 | 3.10 | 6.5 | 30.7 | 650 ^s | 300 ^s | 1.50 | 36 ^s | no | -1.9 ^s |
| | | | | | | | <0.6 ^f | 220 ^f | | 4.1 ^f | | 0.1 ^f |
| CsI(Tl) | 4.51 | 621 | 1.86 | 3.57 | 5.6 | 39.3 | 1220 | 550 | 1.79 | 165 | slight | 0.4 |
| CsI(Na) | 4.51 | 621 | 1.86 | 3.57 | 5.6 | 39.3 | 690 | 420 | 1.84 | 88 | yes | 0.4 |
| CsI(pure) | 4.51 | 621 | 1.86 | 3.57 | 5.6 | 39.3 | 30 ^s | 310 | 1.95 | 3.6 ^s | slight | -1.4 |
| | | | | | | | 6 ^f | | | 1.1 ^f | | |
| PbWO ₄ | 8.30 | 1123 | 0.89 | 2.00 | 10.1 | 20.7 | 30 ^s | 425 ^s | 2.20 | 0.3 ^s | no | -2.5 |
| | | | | | | | 10 ^f | 420 ^f | | 0.077 ^f | | |
| LSO(Ce) | 7.40 | 2050 | 1.14 | 2.07 | 9.6 | 20.9 | 40 | 402 | 1.82 | 85 | no | -0.2 |
| PbF ₂ | 7.77 | 824 | 0.93 | 2.21 | 9.4 | 21.0 | - | - | - | Cherenkov | no | - |
| CeF ₃ | 6.16 | 1460 | 1.70 | 2.41 | 8.42 | 23.2 | 30 | 340 | 1.62 | 7.3 | no | 0 |
| LaBr ₃ (Ce) | 5.29 | 783 | 1.88 | 2.85 | 6.90 | 30.4 | 20 | 356 | 1.9 | 180 | yes | 0.2 |
| CeBr ₃ | 5.23 | 722 | 1.96 | 2.97 | 6.65 | 31.5 | 17 | 371 | 1.9 | 165 | yes | -0.1 |

Параметры кристаллов важные для калориметра:

- Малая X_0 (R_M)
- Большой световой выход (~>10000 фот/МэВ)
- Длина волны сц. света в области высокой кв. эфф. фотодетекторов
- Время высвечивания ~< 1 мкс
- Длина поглощения собственного сц. света ~> 100 X_0
- Малая гигроскопичность
- Лёгкость мех. обработки (пластичность)
- Низкий уровень собственной радиоактивности и высокая радстойкость
- Возможность массового производства (десятки тонн) кристаллов большого размера (10 x 10 x 40 см³) в течение нескольких (3-4) лет
- Разумная цена

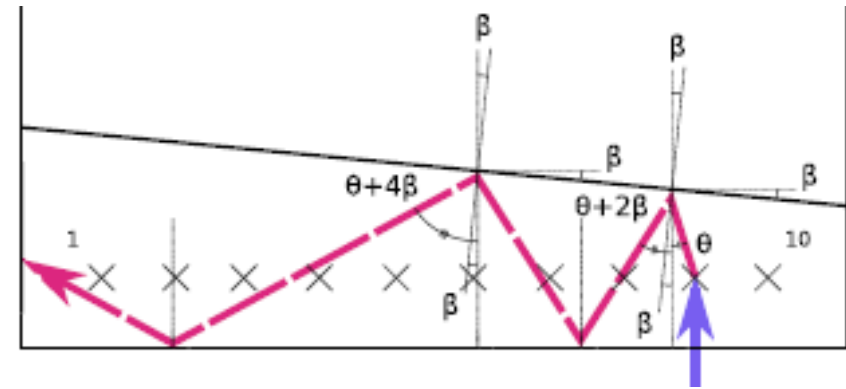
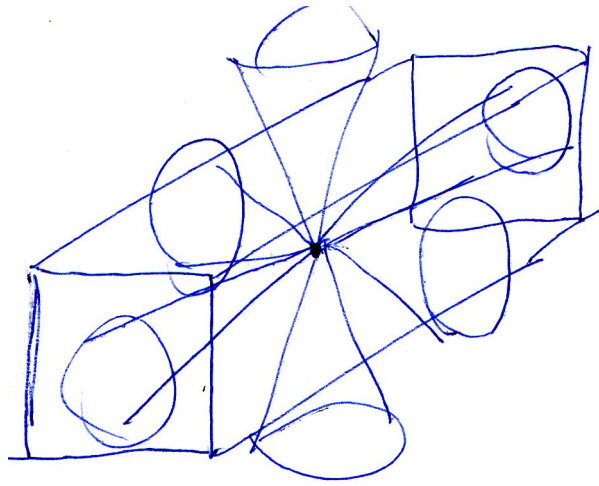
СЦИНТИЛЯЦИОННЫЙ СЧЁТЧИК



- Светоотражающий тефлон в счётчике служит для увеличения светосбора, алюминизированный лавсан обеспечивает мех. защиту, защищает счётчик от внешнего света и формирует замкнутый экран для защиты от внешних э/м полей (наводок).
- Фотодетектор преобразует вспышку сцинтилляционного света в импульс тока. В современных детекторах калориметры часто располагаются внутри сильного магнитного поля (1 – 1.5 Тл) поэтому от ФЭУ переходят к полупроводниковым фотодетекторам, нечувствительным к магнитному полю.
- Световыход счётчика:

$$S \text{ [ф.э./МэВ]} = \text{световыход кристалла [фот./МэВ]} * (\text{коэф. светосбора}) * (\text{кв. эфф. фотодетектора})$$
- Зарядочувствительный предусилитель (ЗЧПУ) служит для преобразования токового сигнала с фотодетектора в импульс напряжения с амплитудой пропорциональной заряду, втёкшему в ЗЧПУ. Аналоговый (парафазный) сигнал с ЗЧПУ счётчика передаётся по длинным (~10 м) кабелям в платы усилителей-формирователей-АЦП.

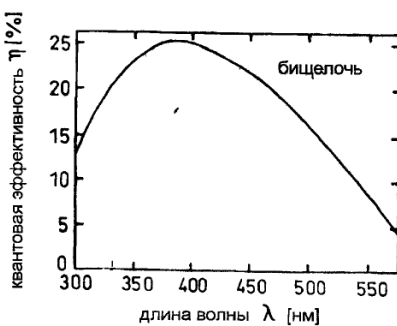
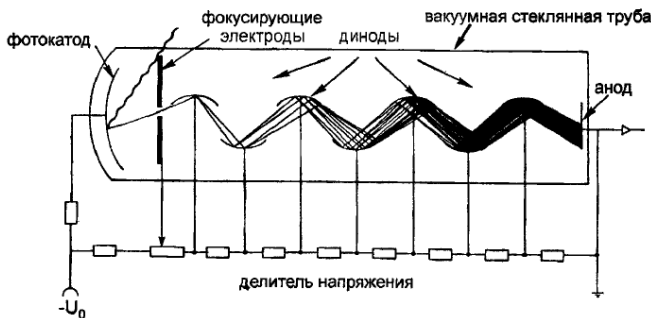
Светосбор в счётчике



- В случае 100%-ого оптического отражения ($\theta_{\text{падения}} = \theta_{\text{отражения}}$) в прямоугольном кристалле с $n=1.8 - 2.0$ (обёрнутом идеальным отражателем) через сигнальный торец выйдет свет из двух конусов $\theta < \theta_{\text{полн.внут.отр.}}$: коэффициент светосбора $\eta = 1 - \cos \theta_{\text{полн.внут.отр.}}$, $\sin \theta_{\text{полн.внут.отр.}} = 1/n$.
- Оптический контакт с $n_1 = 1.5$ на сигнальном торце увеличит светосбор до $\eta' = 1 - \cos \theta'_{\text{полн.внут.отр.}}$, $\sin \theta'_{\text{полн.внут.отр.}} = n_1/n$.
- Наличие доли ((10–20)%) диффузного отражения от поверхности кристалла постепенно перекачивает свет, замкнутый в кристалле вне двух конусов $\theta < \theta'_{\text{полн.внут.отр.}}$, в область с $\theta < \theta'_{\text{полн.внут.отр.}}$. В результате после большого числа отражений весь свет вышел бы через сигнальный торец.
- В реальности же, конечная длина поглощения сц. света в кристалле (1.5 – 2 м) сильно ограничивает коэффициент светосбора. Обычно в больших счётчиках (6 x 6 x 30 см³) светосбор <15%.
- Пирамидальная форма кристалла позволяет несколько увеличить коэффициент светосбора на большой торец, однако часто растёт и продольная неоднородность светосбора (требует компенсации матированием частей боковых граней).

Фотодетекторы для кристаллических калориметров (I)

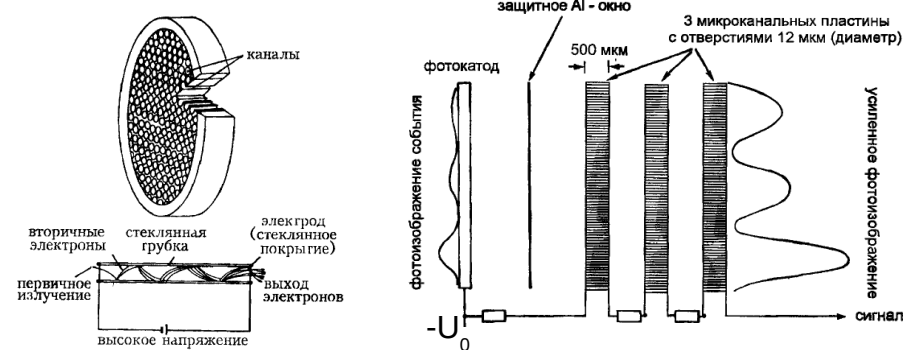
- **ФЭУ (фотоэлектронный умножитель), вакуумный фото- триод, тетрод, пентод**



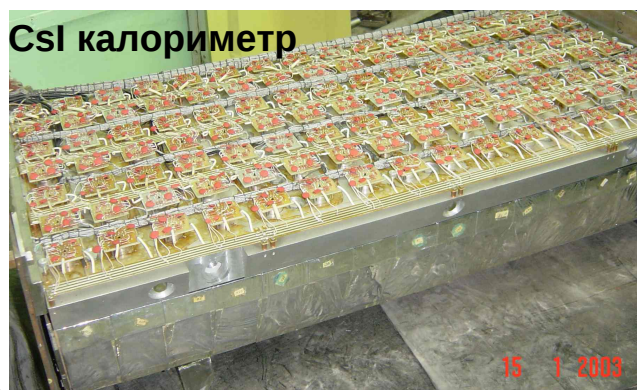
Электроды смонтированы в откачанном стеклянном объёме, который помещается в металлический корпус (с высокой магнитной проницаемостью). Число электродов может быть большим $N=15$. Коэф. вторичной эмиссии динода $\rho(=\alpha\Delta U)=3\div 4$, соответственно коэф. усиления ФЭУ $g=\rho^{N-2}$ может достигать $10^6 \div 10^7$.

Важной характеристикой ФЭУ является квантовая эффективность фотокаатода. Длительность выходного сигнала $0.5\div 5$ нс (разброс времён прилёта электронов на анод). Темновой ток на аноде (на 1 см^2 фотокаатода) $I_{\text{темн}} = (10 \div 100) \text{ нА}$.

ФЭУ с микроканальными пластинами (МКП)



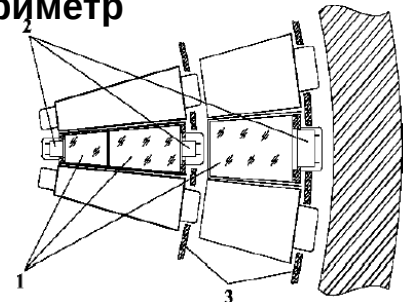
ИЯФ КМД-2 CsI калориметр



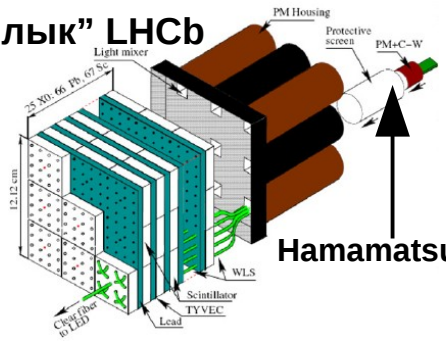
ИЯФ КЕДР торцевой CsI калориметр



ИЯФ СНД калориметр

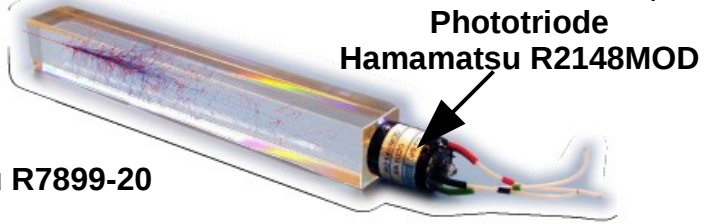


"Шашлык" LNCb



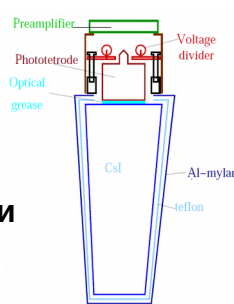
Наматсусу R7899-20

Торцевой калориметр CMS (PbWO₄)



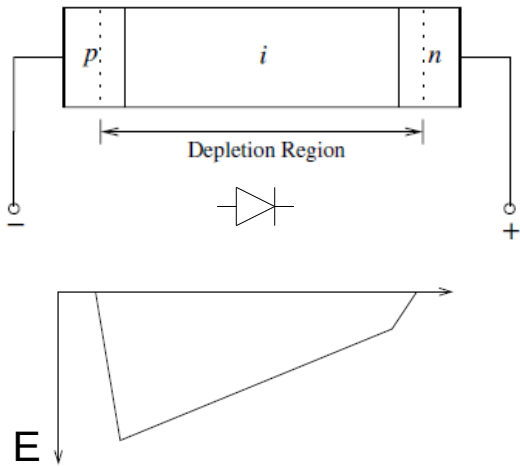
Phototriode Hamamatsu R2148MOD

обновление торцевого ECL Belle II с крист. чистого CsI и фотопентодами

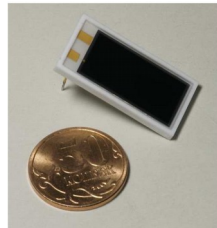


Фотодетекторы для кристаллических калориметров (II)

• PIN ФД: полупроводниковые фотодиоды с PIN структурой



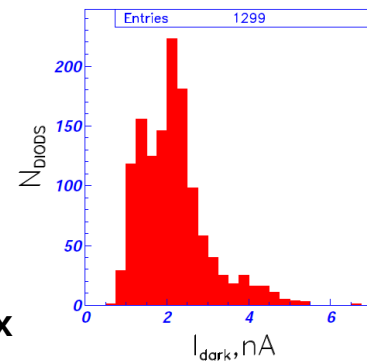
Hamamatsu S2744-08



квант. эфф. ~ 80 %
 $U_{\text{смещ}} \sim < 70 \text{ В}$
 $I_{\text{ТЕМН}} \sim 2 \text{ нА}$
 площадь = 2 см²
 толщ. i-слоя = 300 мкм

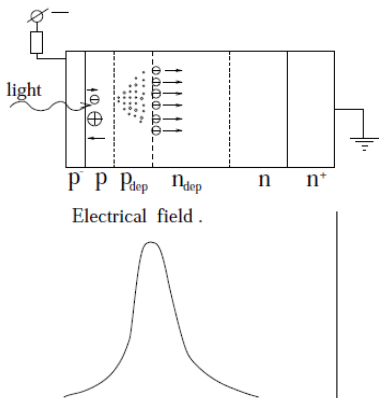
Использование в кристаллических калориметрах:

- ИЯФ: CsI-калориметр КМД-3
- ВГО-калориметр КМД-3
- КЕК: ECL Belle II
- ИHEP(Пекин): EMC BESIII

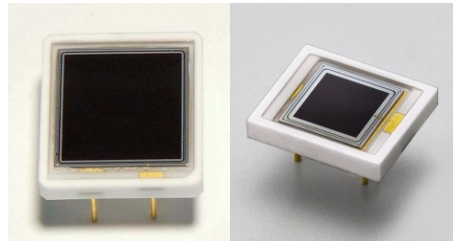


ВГО-калориметр КМД-3

• ЛФД: полупроводниковые лавинные фотодиоды



Hamamatsu APD S8664-1010 S8664-55



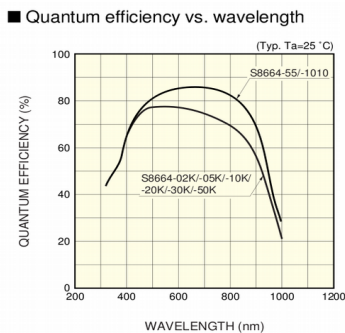
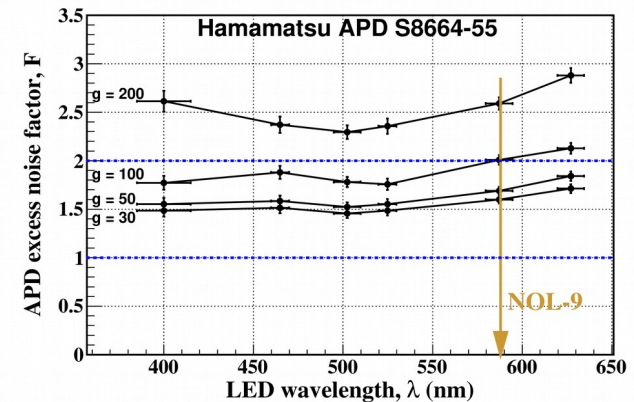
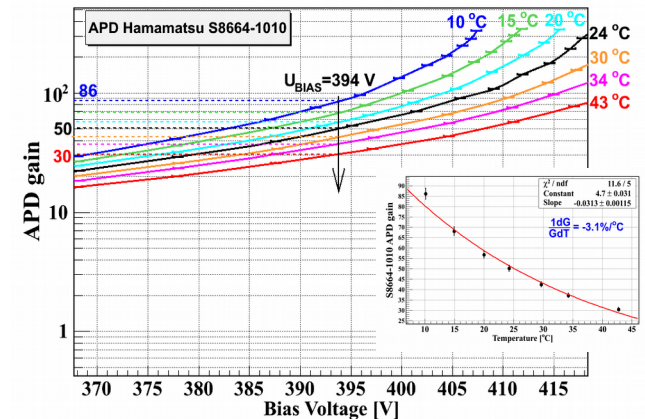
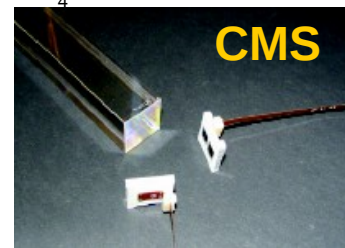
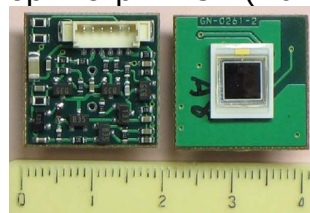
высокая квант. эфф.
 реком. коэф. усиления $g=50$
 $(1/g)dg/dT = -3.3\%/град.$

$U_{\text{смещ}} (g=50) \sim 400 \text{ В}$
 $I_{\text{ТЕМН}} (g=50) \sim 2 \text{ нА}$

Фактор избыточного шума $F < 2$ при $g \leq 100$

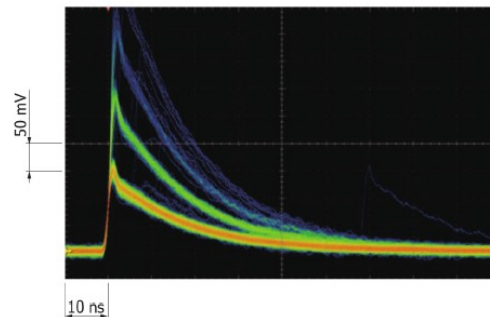
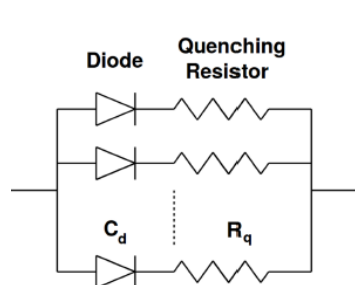
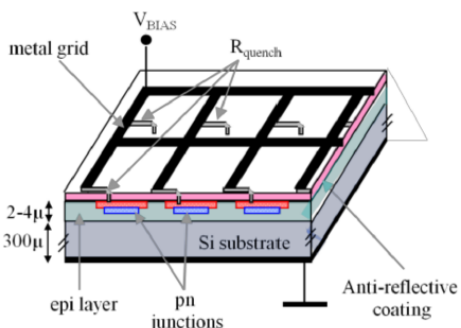
Использование в кристаллических калориметрах:
 ЦЕРН: баррельный калориметр CMS (PbWO₄)

Калориметр ALICE (PbWO₄)



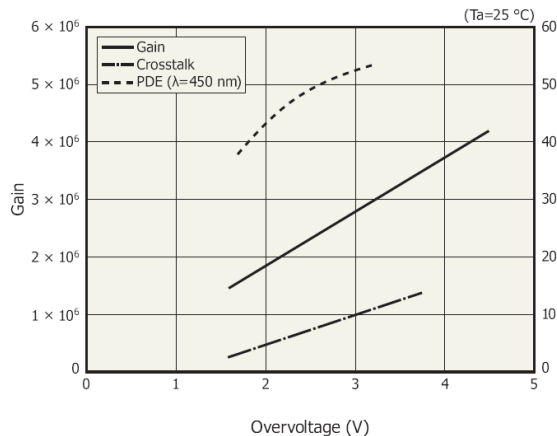
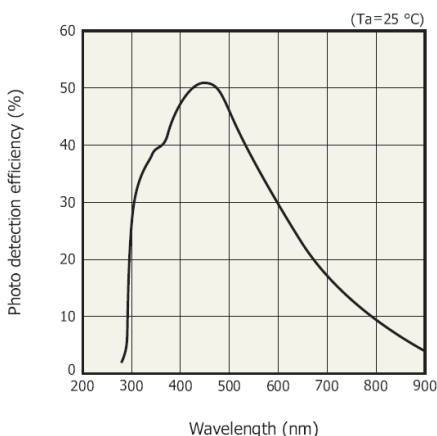
Фотодетекторы для кристаллических калориметров (III)

- кФЭУ: полупроводниковые кремниевые фотоумножители**

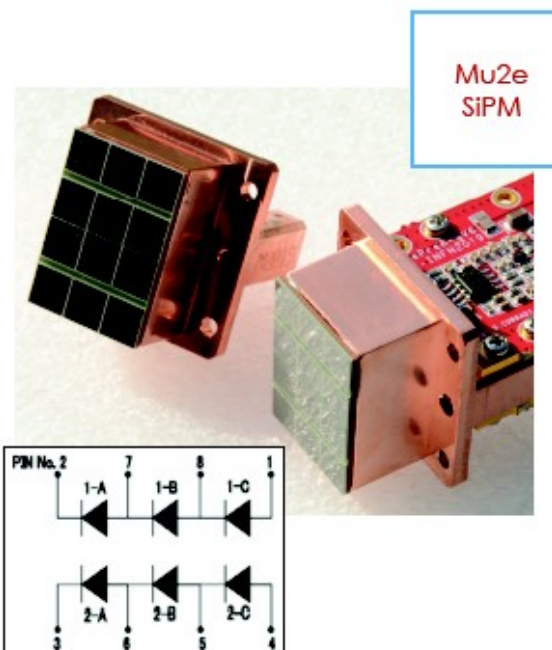


Hamamatsu MPPC
S14160-3050HS

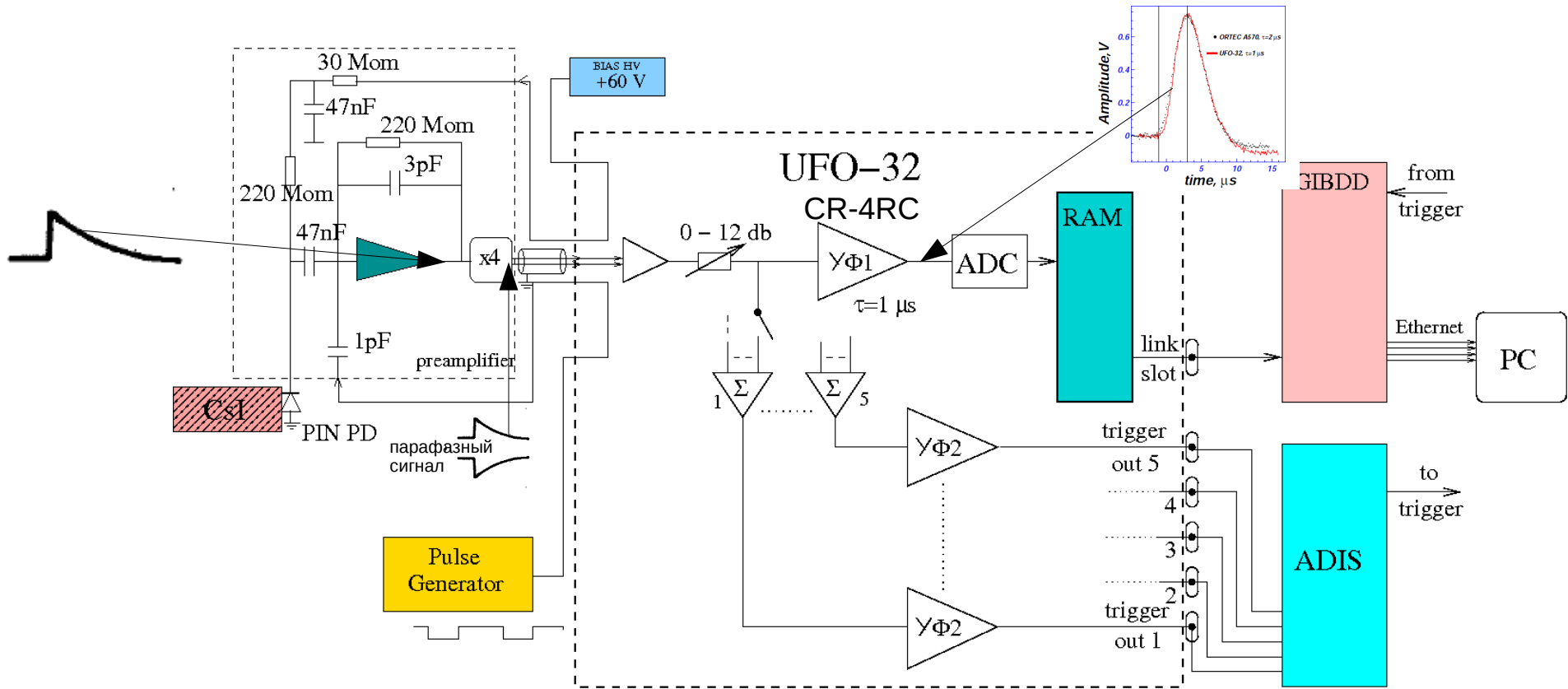
Размер: 3 x 3 мм²
 Напряжение пробоя: 38 В
 Заполнение: 74%
 Размер пикселя: 50 мкм
 Коэф. усиления: ~10⁶
 Высокая квант. эфф.
 Темновой счёт: 0.5 МГц
 Гасящее сопр.: 0.5 МОм



Использование в кристаллических калориметрах:
 Fermilab: CsI(pure)-калориметр Mu2e

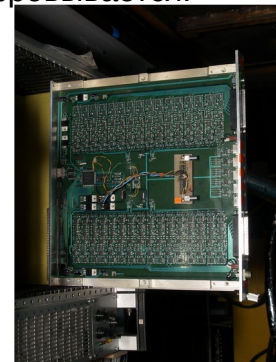
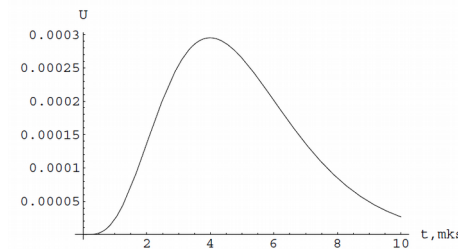
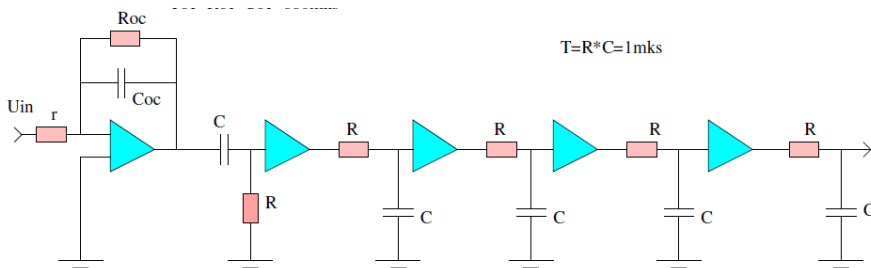


Спектрометрический тракт счётчика калориметра

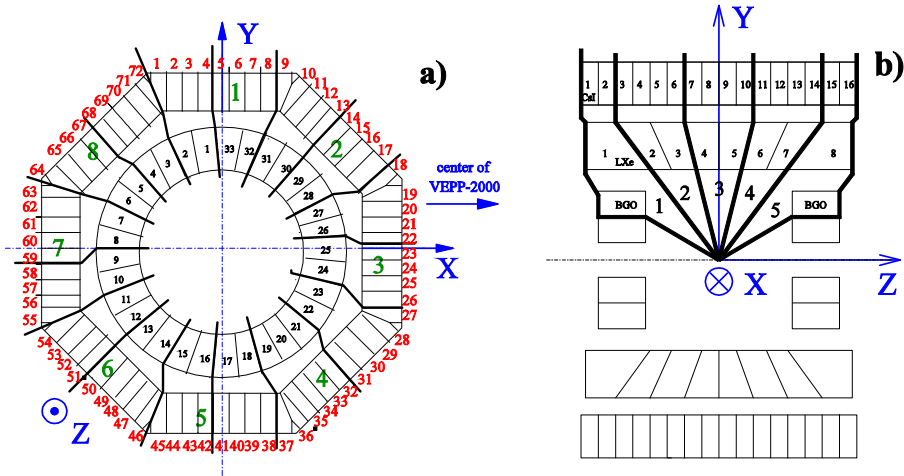
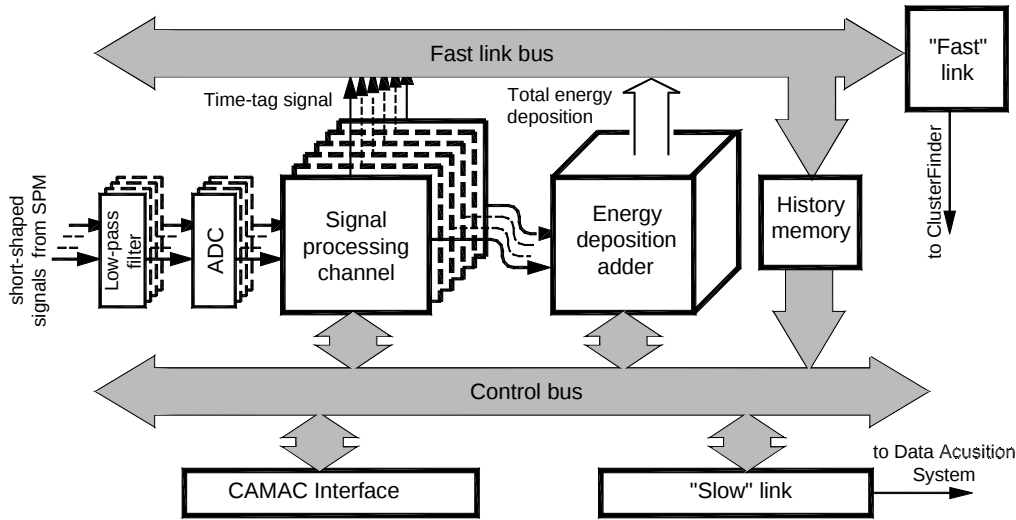


Входной импульс тока $I(t) = Q_{in} \delta(t)$ интегрируется ЗЧПУ и выходной импульс $U(t) = H(t)(Q_{in}/C_{fb}) \exp(-t/R_{fb} C_{fb})$, т.о. чувствительность ЗЧПУ ($Q \rightarrow U$) $s = 1/C_{fb}$ (измеряется в В/пКл). В ЗЧПУ также обычно формируется парафазный сигнал для передачи его по длинным (~10 м) кабелям в плату усилителя-формирователя.

В усилителе-формирователе (УФ) производится фильтрация (близкая к оптимальной) сигнала в CR-nRC фильтре с постоянной $\tau_{дифф} = \tau_{инт} = \tau = CR$ (время формирования УФ, τ , обычно выбирают равным времени высвечивания сц. кристалла), в результате на выходе получается гладкий сигнал колоколообразной формы (с передним фронтом πt), который затем оцифровывается.

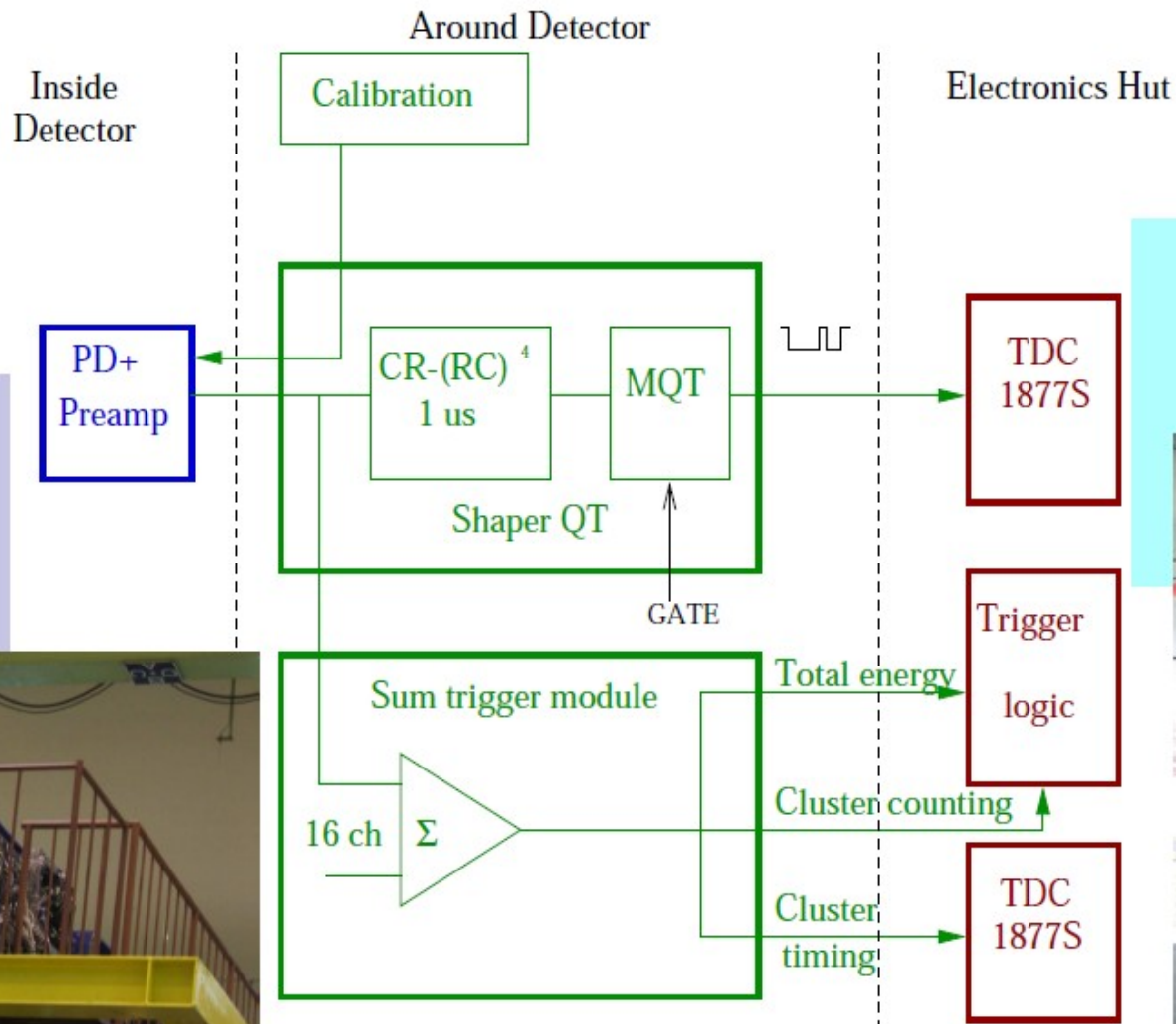


Подсистема нейтрального триггера (CsI КМД-3)



- LXe: 80 trigger cells
- CsI: 80 trigger cells
- BGO: 48 trigger cells

Электроника э/м калориметра Belle



- 52 TKO crates
- 576 Shaper-QT
- 288 STM



- 6 FASTBUS crates
- 108 LeCroy TDC(96)
- Trigger VME crate



Электронные шумы в спектрометрическом тракте

$$ENC^2 = \frac{2I_d K g F \tau}{e} + \left(\frac{R^2}{\lambda} + E^2 \right) C^2 + D^2$$

Эквивалентный шумовой заряд Дробовой шум (параллельный) Тепловой шум (последовательный) Фликкер (1/f) шум остаточный шум

Эквивалентная шумовая энергия связан со вкладом в ENC вторичных каскадов ЗЧПУ и УФ

$ENE [MэВ] = ENC / S$, S – световыход счётчика,
 $ENE = 0.2 \div 0.4$ МэВ у хороших э/м калориметров

e – заряд позитрона;

I_d – темновой ток;

g – коэф. усиления ЛФД ($g=1$ в схеме с PIN ФД);

K – дробовой формфактор УФ ($K=1.8$ для CR-4RC УФ);

F – фактор избыточного шума ($F=1$ в схеме с PIN ФД);

C – ёмкость фотодетектора;

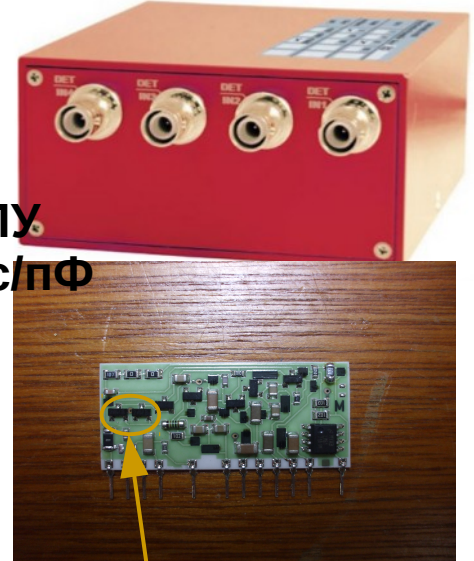
$B^2 = 4k_B T R_s F_{temp} / e^2$; У хороших ЗЧПУ $B=2\div3$ ф.э./мкс/пФ

T – температура (K);

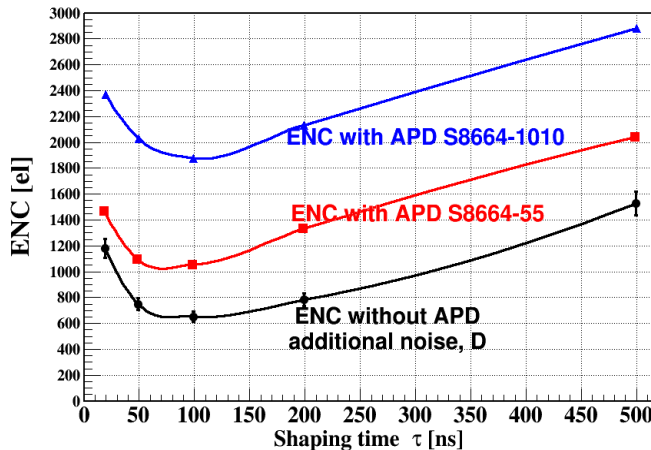
R_s – обратная крутизна полевого транзистора на входе ЗЧПУ ($R_s = 30\div50$ Ом);

F_{temp} – тепловой формфактор УФ ($F_{temp} = 0.256$ для CR-4RC УФ).

4ch preamplifier
 CAEN A1422B045F3
 45 mV/MeV (1 V/pC)



2 BF862 FETs



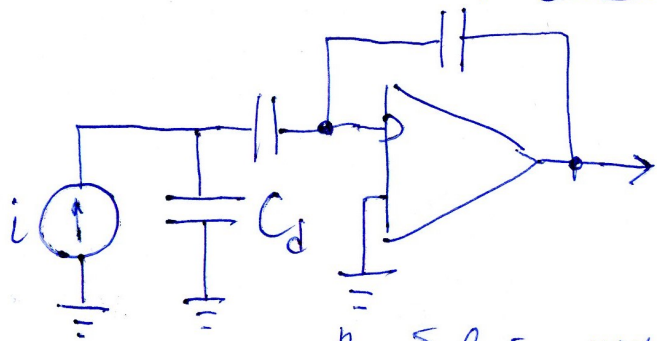
$$ENC^2 = (2eI_d + \frac{4k_b T}{R_b} + i_{na}^2) K_i T_s + (4k_b T R_s + e_{na}^2) K_v \frac{C^2}{T_s} + K_{vf} A_f C^2$$

$T_s = 4\tau$ (для CR-4RC) – длина переднего фронта

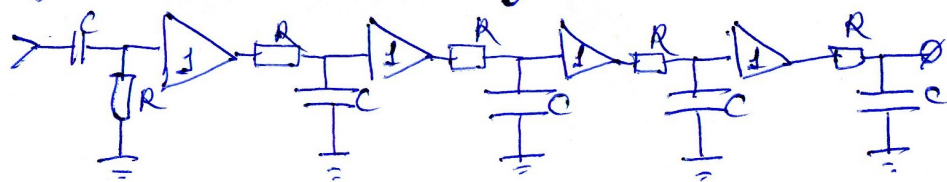
$K_i = K/4$, $K_v = 4F_{temp}$

Зависимость D от τ связана с наличием дополнительных параллельных (i_{na}) и последовательных (e_{na}) шумов.

С_f Возмущение гребцов и мембраны + формулы для шумов



шум гребцов:



$\tau = RC$

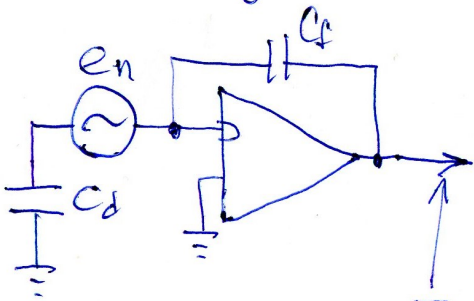
$$K = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \left(\frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \right)^4 = \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^5} = \frac{j\omega \tau}{(1 + j\omega \tau)^5}$$

$$|K|^2 = \frac{\omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5}$$

$$\frac{di^2}{df} = 2e I_{dark} : U = i \cdot \frac{1}{j\omega C_f}$$

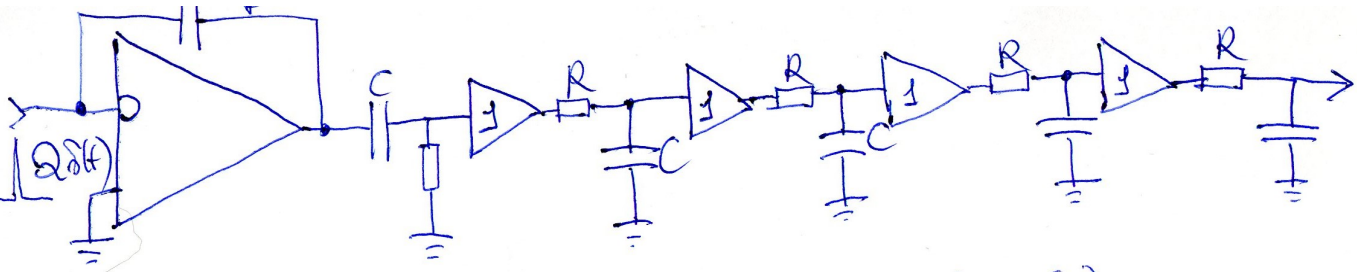
$$U^2 = i^2 \frac{1}{\omega^2 C_f^2} \Rightarrow \frac{dU^2}{df} = \frac{di^2}{df} \frac{1}{\omega^2 C_f^2} \Rightarrow \frac{dU_{box}^2}{df} = \frac{di^2}{df} \frac{1}{\omega^2 C_f^2} \frac{\omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5} \Rightarrow \frac{dQ_{gp}^2}{df} = \frac{di^2}{df} \cdot \frac{\tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5}$$

$$Q_{gp}^2 = \int_0^\infty \frac{d\omega}{2\pi} 2|e| I_{dark} \frac{\tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5} = \frac{2|e| I_{dark} \tau^2}{2\pi} \int_0^\infty \frac{dz}{(1 + z^2)^5} = \frac{2|e| I_{dark} \tau^2}{2\pi} \frac{35}{512}$$

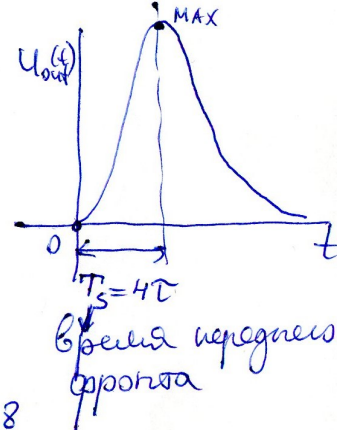


$$\frac{de_n^2}{df} = 4kTR_s \frac{dU^2}{df} = \left(\frac{C_d}{C_f} \right)^2 \frac{de_n^2}{df} = 4kTR_s \left(\frac{C_d}{C_f} \right)^2 \Rightarrow \frac{dU_{box}^2}{df} = 4kTR_s \left(\frac{C_d}{C_f} \right)^2 \frac{\omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5}$$

$$Q_{temp}^2 = C_f^2 \int \frac{dU_{box}^2}{df} df = 4kTR_s \frac{C_d^2}{C_f^2} \int \frac{d(\omega\tau)}{2\pi} \frac{\omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^5} = \frac{4kTR_s C_d^2}{2 \cdot 2\pi \tau} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{z^2 dz}{(1 + z^2)^5} = \frac{kTR_s C_d^2}{\tau} \frac{5}{128} = 4kTR_s \frac{C_d^2}{\tau} \frac{5}{512}$$



$$U_{out} = -\frac{Q}{C_f} \frac{1}{24} \left(\frac{t}{\tau}\right)^4 e^{-\frac{t}{\tau}}$$



$$U_{max} = U_{out}(t=T_s) = -\frac{1}{24} \frac{Q}{C_f} 4^4 e^{-4} = -\frac{4^4}{24} e^{-4} \left(\frac{Q}{C_f}\right); \quad C_f = \frac{32}{3e^4}$$

$$ENC^2 = \frac{1}{C_f^2} \left\{ \overline{Q_{gp}^2} + \overline{Q_{temp}^2} \right\} = \frac{9 \cdot e^8}{2^{10}} \left\{ 2|e| I_{dark} \tau \cdot \frac{5 \cdot 7}{2^9} + 4kTR_s \frac{C_d^2}{\tau} \cdot \frac{5}{2^9} \right\} =$$

$$F_{temp} = \frac{3^2 \cdot 5 e^8}{2^{19}} \approx 0.256$$

$$F_{shot} = \frac{7 \cdot 3^2 \cdot 5 e^8}{2^{19}} = 7 F_{temp} \approx 1.791$$

$$= 2|e| I_{dark} \tau \cdot \underbrace{\frac{3^2 \cdot 5 \cdot 7}{2^{19}} e^8}_{F_{shot} \text{ фотодобов формирования}} + 4kTR_s \frac{C_d^2}{\tau} \cdot \underbrace{\frac{3^2 \cdot 5 e^8}{2^{19}}}_{F_{temp} \text{ шумов формирования}}$$

Часто вместо τ используют длительность перегиба фронта T_s :

$$ENC^2 = 4kTR_s \frac{C_d^2}{T_s} F_{re} + 2|e| I_{dark} T_s F_i, \quad \text{поэтому}$$

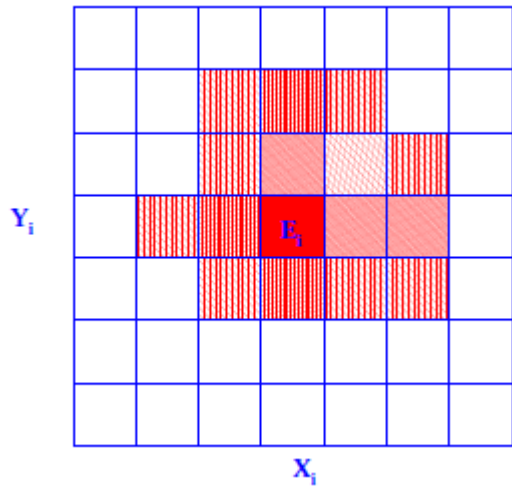
$$F_{re} = 4 F_{temp} = \frac{3^2 \cdot 5 e^8}{2^{17}} \approx \underline{\underline{1.02}}$$

$$F_i = \frac{F_{shot}}{4} = \frac{3^2 \cdot 5 \cdot 7 e^8}{2^{21}} \approx \underline{\underline{0.448}}$$

} эти коэффициенты можно найти в литературе.

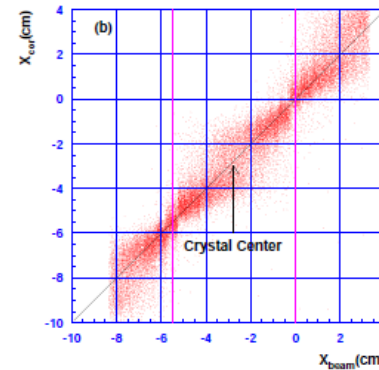
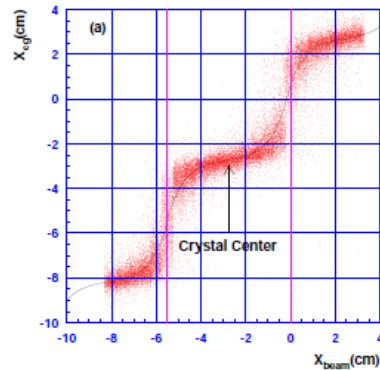
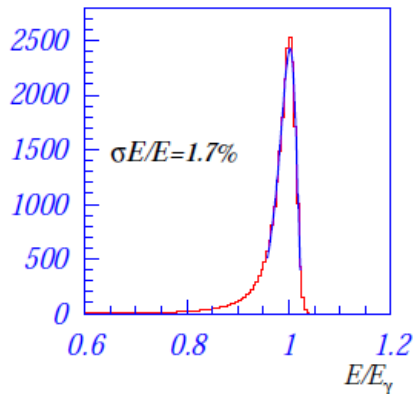
Реконструкция кластеров, энергия и координаты

- 1) В событии ищется затравочный кластер с порогом на энерговыделение ~ 10 МэВ
- 2) Далее для формирования кластера (группы связанных кристаллов) вокруг него ведётся поиск сработавших счётчиков с низким порогом на энерговыделение ~ 1 МэВ (определяется величиной E_{NE}).

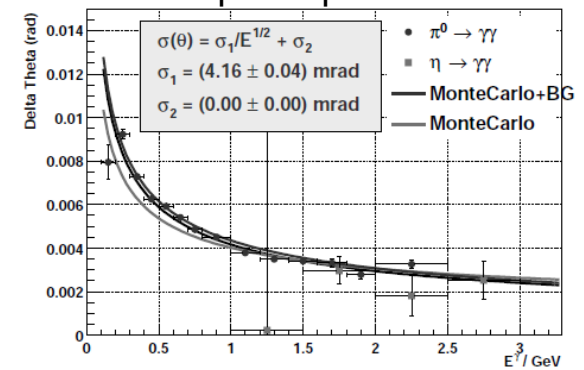


$$E_{cl} = \sum E_i, \quad E_T = f_E(E_{cl}), \quad X_g = \frac{\sum E_i X_i}{\sum E_i}, \quad X_c = F_{cor}(X_g, E_T)$$

$\times 10^2$



Угловое разрешение
калориметра BABAR



Функция – логарифмический Гаусс:

$$dW = \exp\left(-\frac{\ln^2[1 - \eta(E - E_p)/\sigma]}{2s_0^2} - \frac{s_0^2}{2}\right) \frac{\eta dE}{\sqrt{2\pi}\sigma s_0}, \quad \sigma = \text{FWHM}/2.35,$$

$$s_0 = \frac{2}{\xi} \operatorname{arsinh}\left(\frac{\eta\xi}{2}\right), \quad \xi = 2.35, \quad E_p - \text{положение пика}, \quad \eta - \text{асимметрия}.$$

Координатное разрешение:
 $\sigma_{x,y} = R_M / \sqrt{(E/E_c)} = 5 \text{ мм}/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$

Калибровка счётчиков калориметра

$$E_i = \alpha_i(A_i - P_i) ,$$

A_i – амплитуда сигнала

i -ого канала (в кан. АЦП)

P_i – пьедестал i -ого

канала (в кан. АЦП)

α_i – калибровочный коэффициент

i -ого канала (МэВ/кан.)

- Пьедестал определяется в результате спец. заходов (без пучков) с триггером от генератора импульсов – т.н. пьедестальные заходы, либо во время эксперимента с пучками от т.н. случайного триггера.
- Периодически (~раз в сутки) проводятся спец. калибровочные заходы (от генератора импульсов) для мониторингирования стабильности отклика электроники калориметра.
- **Абсолютная энергетическая калибровка** (определение α_i) проводится по физическим событиям процессов $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ (Bhabha), $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$. Часто проводится предварительная калибровка с помощью событий с космическими мюонами.

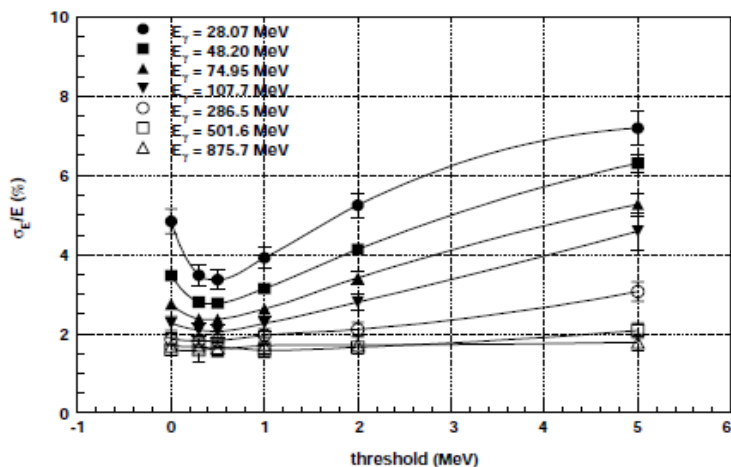
$$E = \sum_{i=1}^M \alpha_i A_i , \quad (\text{пьедесталы уже вычтены}),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_j} = 0 , \quad \sum_{i=1}^M \alpha_i \left(\sum_{k=1}^N A_{jk} A_{ik} \right) = \sum_{k=1}^N E_{0k} A_{jk}$$

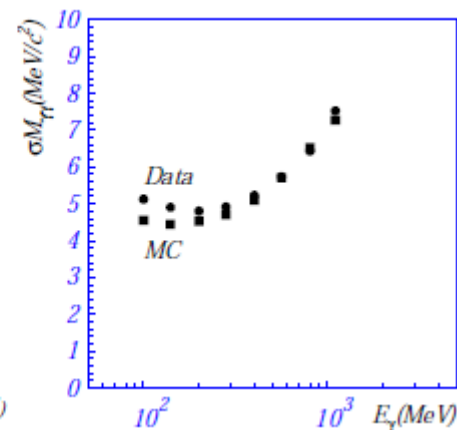
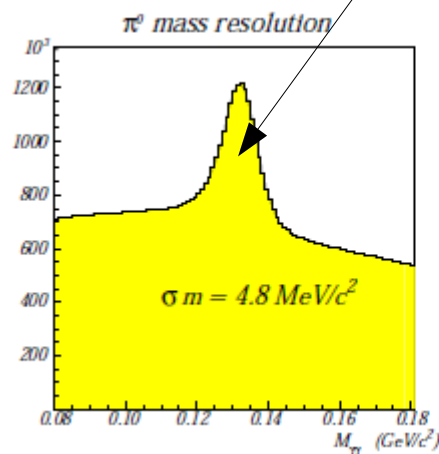
$$L = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^M \alpha_i A_{ik} - E_{0k} \right)^2$$

$$m^2 = 2E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos \psi)$$

Зависимость энерг. разрешения от порога по энергии в счётчике при формировании кластера

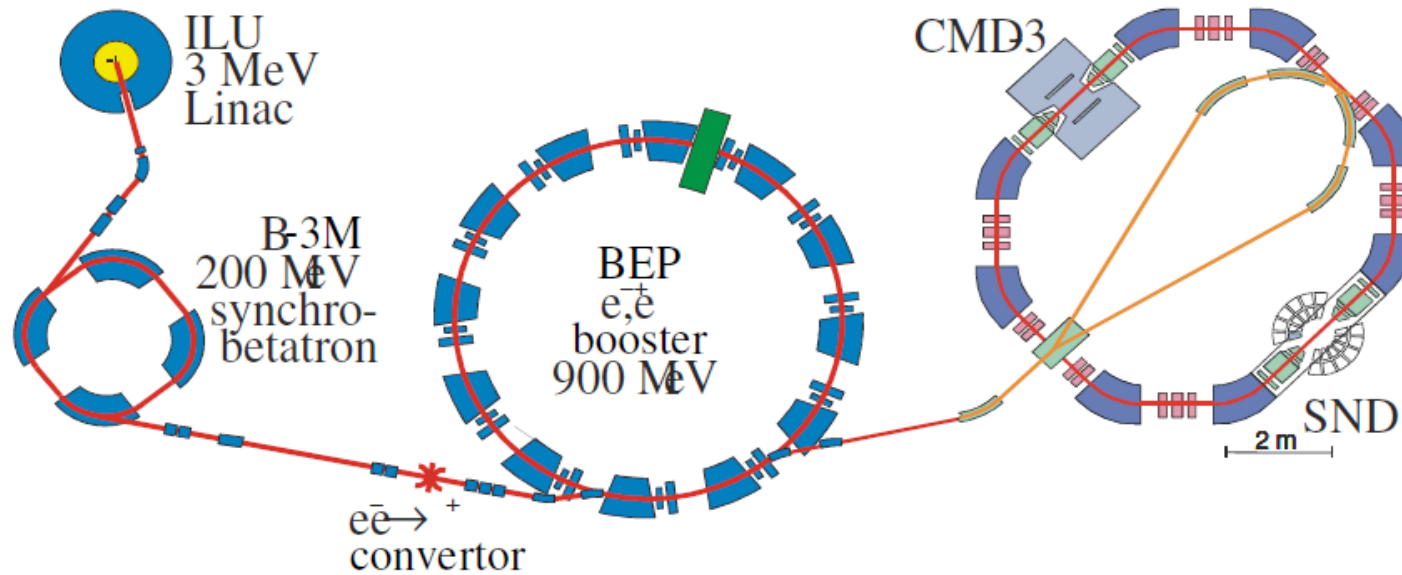


$\sigma_{m\mu\mu}$ определяется в основном энергетическим разрешением

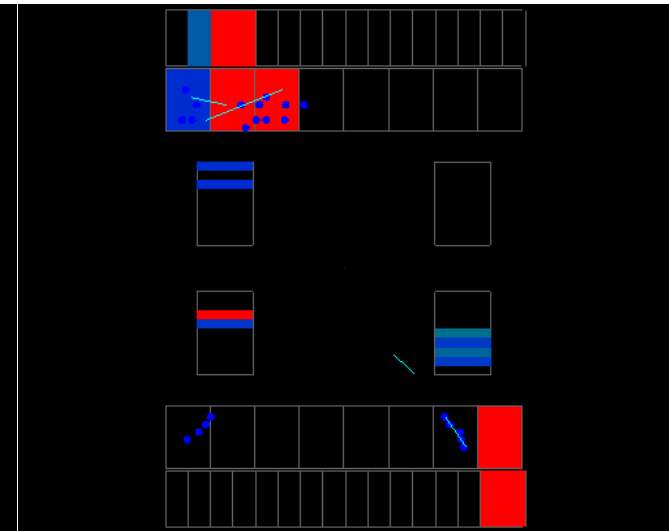
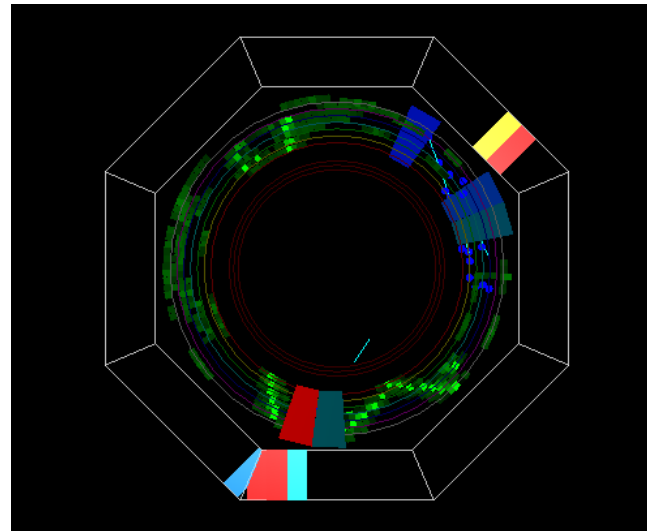
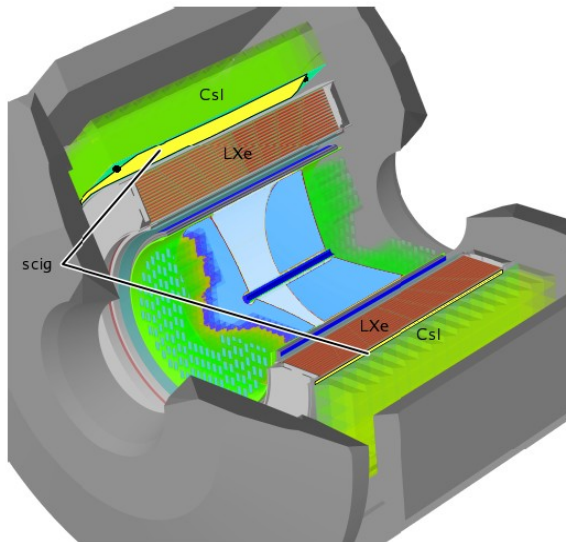


Калориметры детектора КМД-3

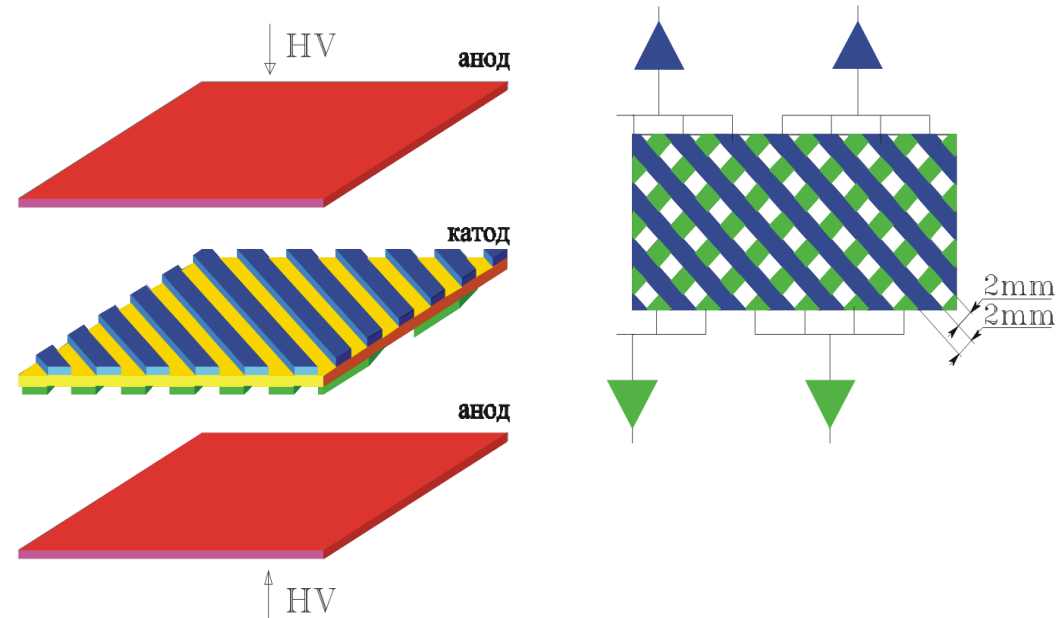
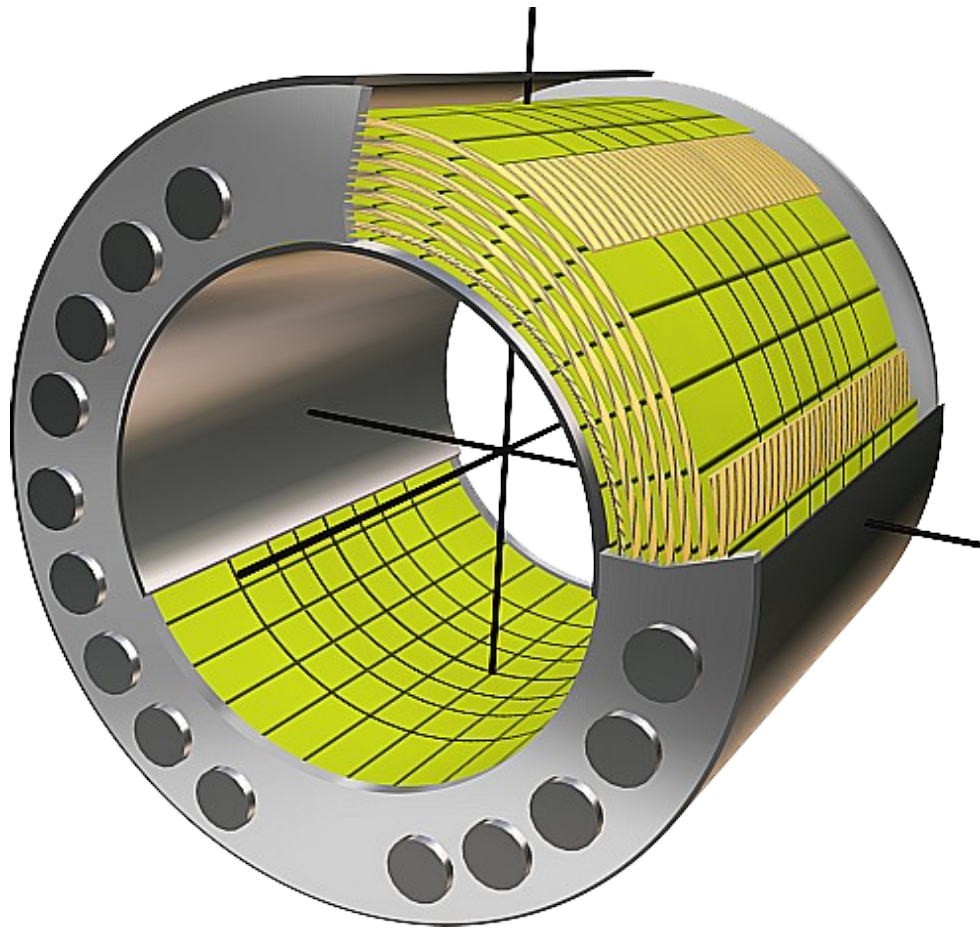
ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера, Новосибирск



$$2E = 0.3 - 2.0 \text{ ГэВ}, L = 10^{32} \text{ см}^{-1}\text{с}^{-1}$$



LXe калориметр (I)



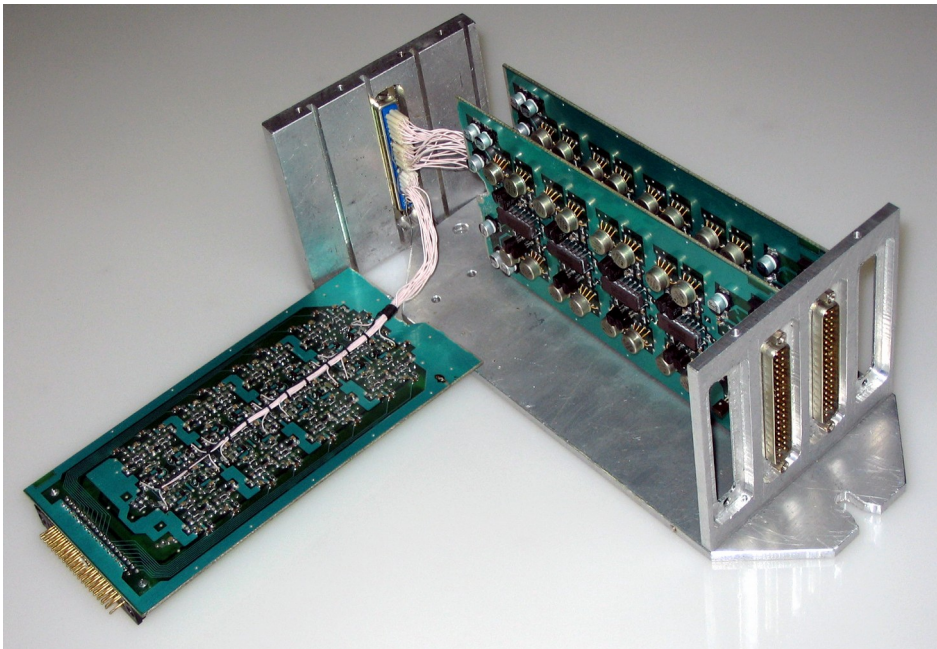
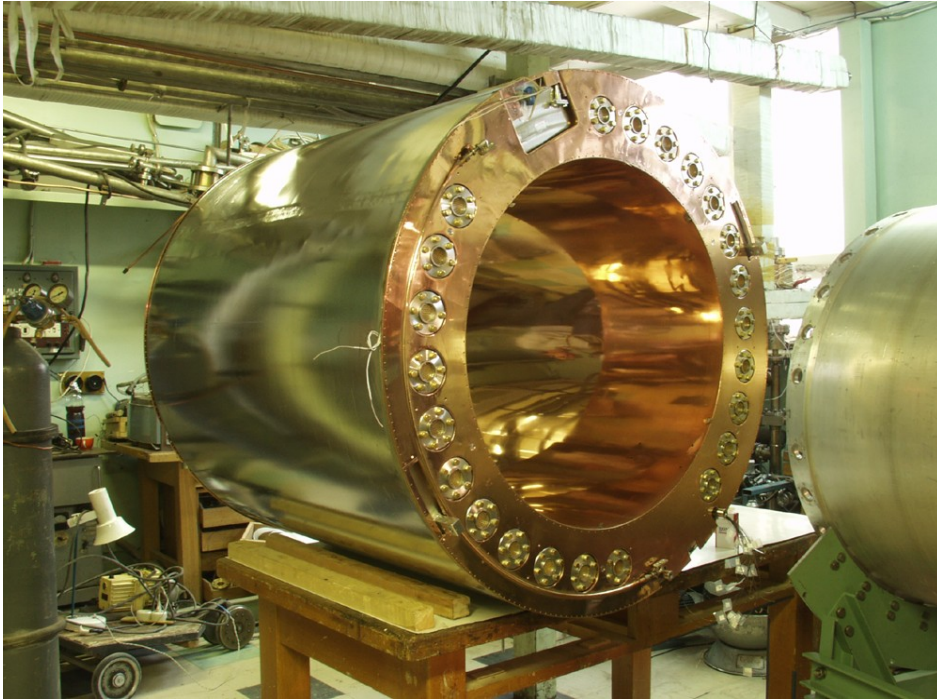
- LXe: $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $w = 16 \text{ эВ/пара}$
- Толщина – $5X_0$, Объём = 400 литров
- Чистота (длина своб. Пробега e) – 20 мм
- Температура=170 К, Давление=1.2 атм.
- Потребление жидкого азота – 6 литров/час

Баррельный (LXe+Csl) калориметр

- Точное измерение координаты и точки конверсии γ -кванта
- $\sigma_E/E = 4.7 - 3 \%$ ($E_\gamma = 100 - 1000 \text{ МэВ}$)
- $\sigma_{\theta,\varphi} = 0.005$

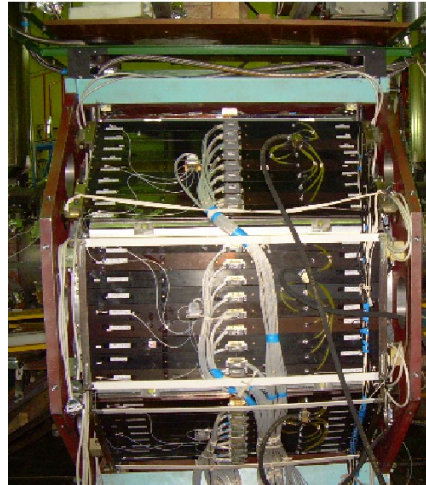
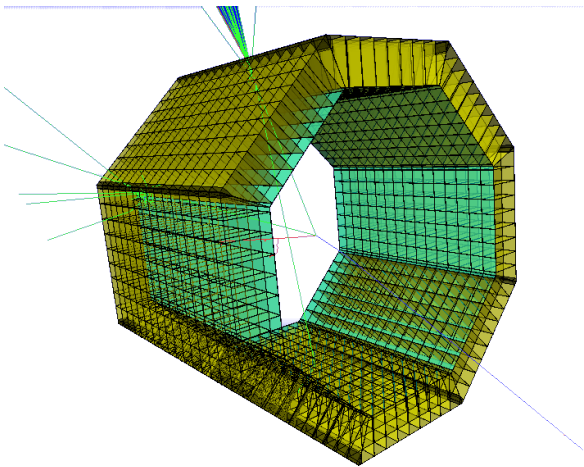
- 15 цилиндрических электродов (7 – катодов, 8 – анодов) с промежутками между ними 10.2 мм. $R_{\text{внутренний}} = 369 \text{ мм}$, $R_{\text{внешний}} = 511.8 \text{ мм}$
- 8 анодов обеспечивают измерение энергии в 264 башнях: 8 - вдоль Z, и 33 – в плоскости R- φ .
- 7 катодов разделены на 2124 полосок для измерения координат (~300 полосок на электрод)

LXe калориметр (II)



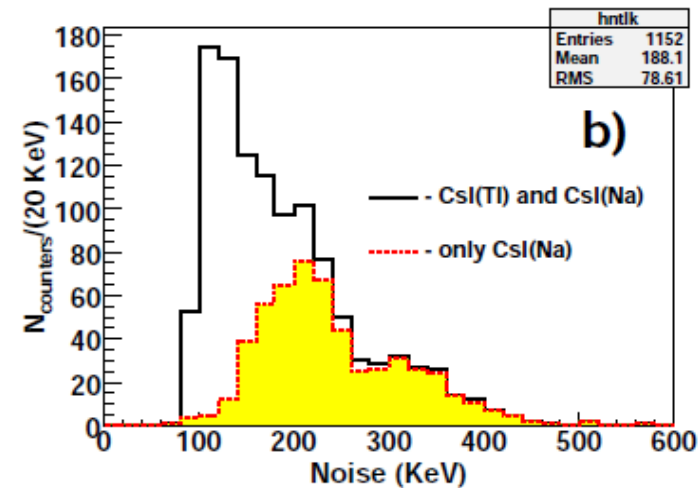
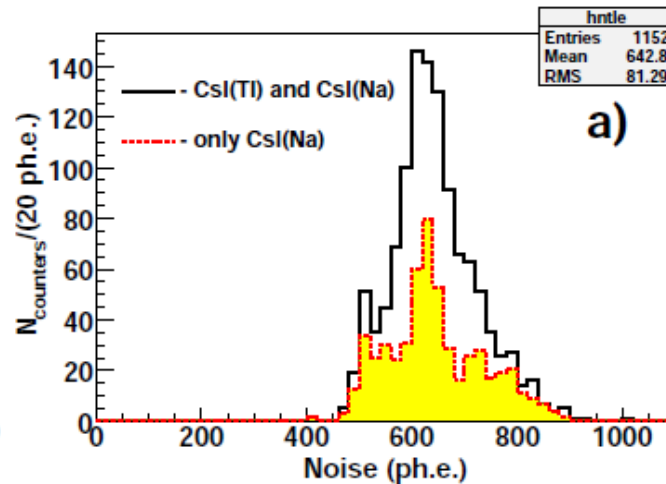
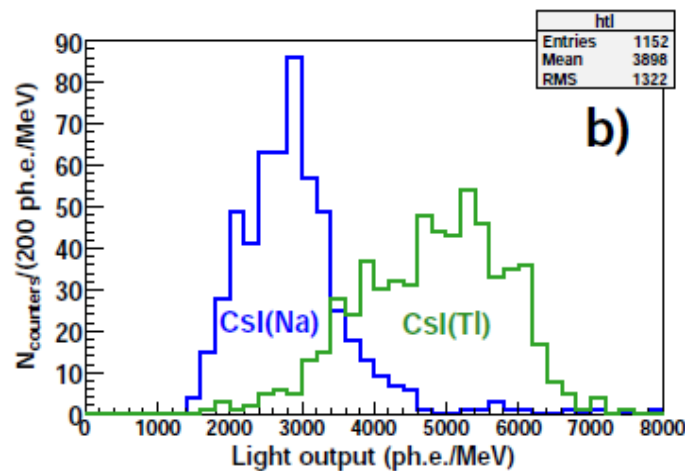
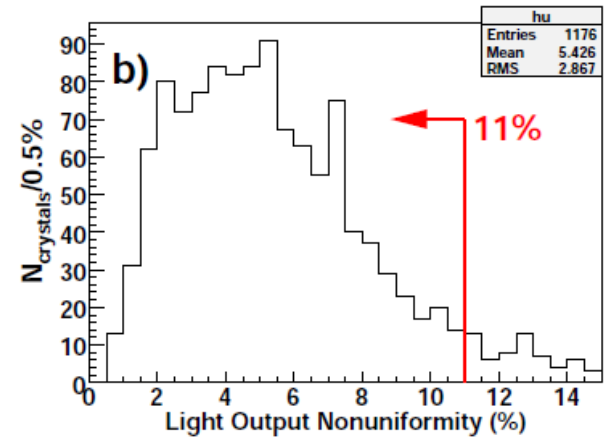
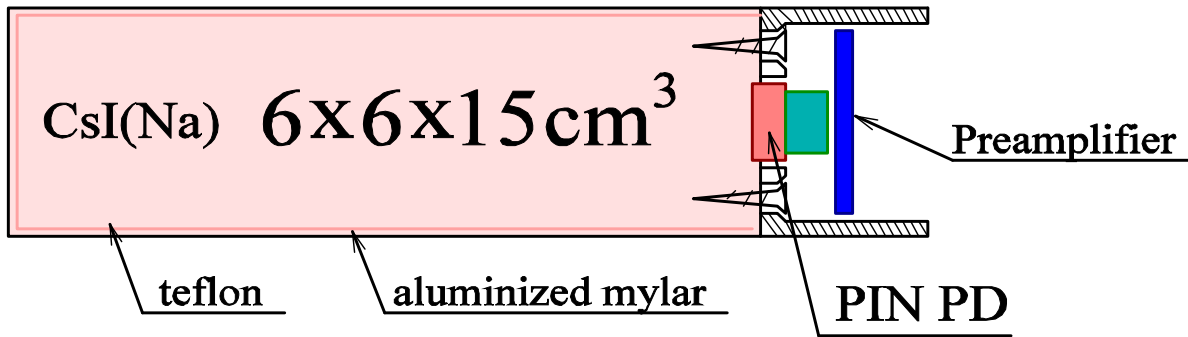
- Катоды (координатные полоски):
типичная амплитуда – 36000 эл.,
электронные шумы ~ 2200 эл.
- Аноды (энергетические башни):
чувствительность – 13500 эл./МэВ,
электронные шумы ~ 3000 эл (0.22 МэВ)

CsI калориметр

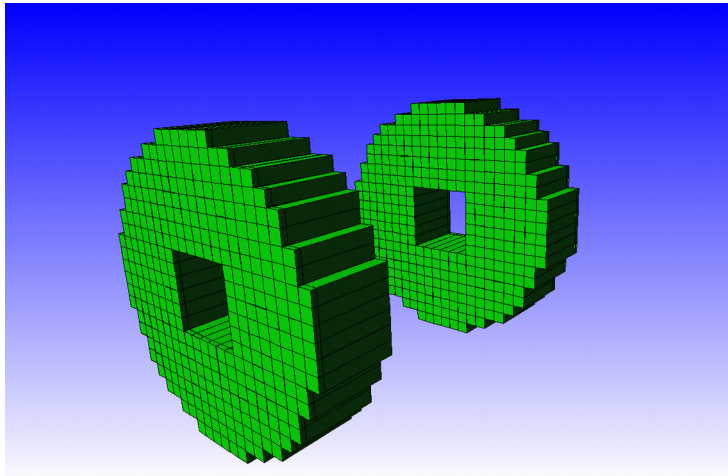


- Состоит из 8-ми октантов
- Каждый октант собран из 9-ти модулей
- Модуль состоит из 16-ти счётчиков
- Счётчик сделан на основе кристалла CsI(Tl) или CsI(Na) с размерами $6 \times 6 \times 15 \text{ см}^3$, $8X_0$

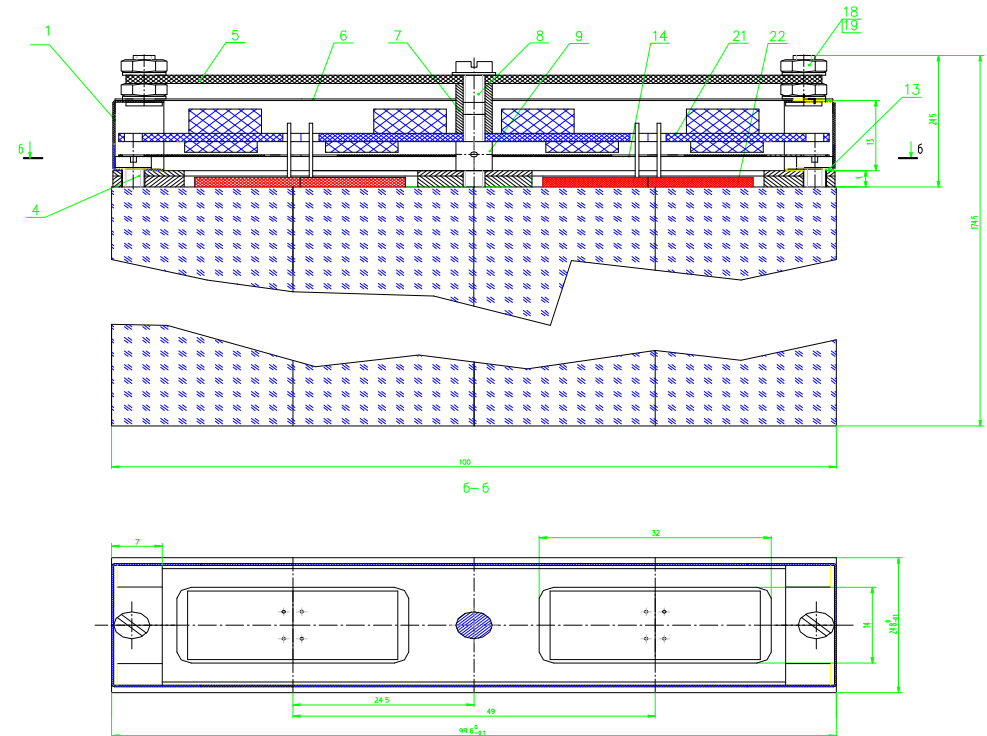
1152 счётчиков (масса кристаллов 2.8 тонн)



Торцевой ВГО калориметр (I)

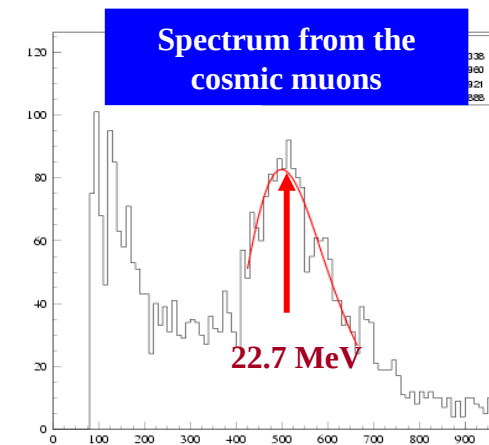
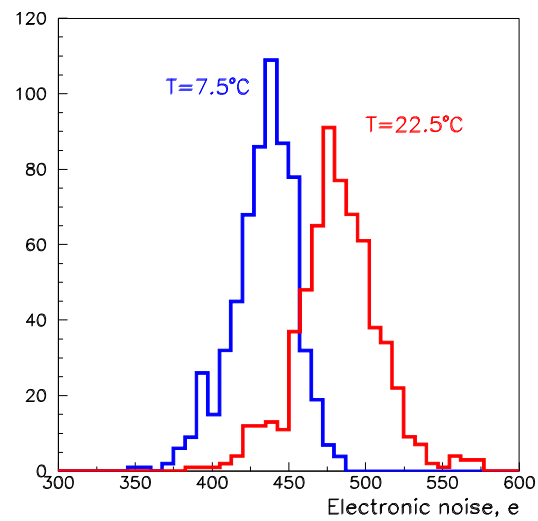
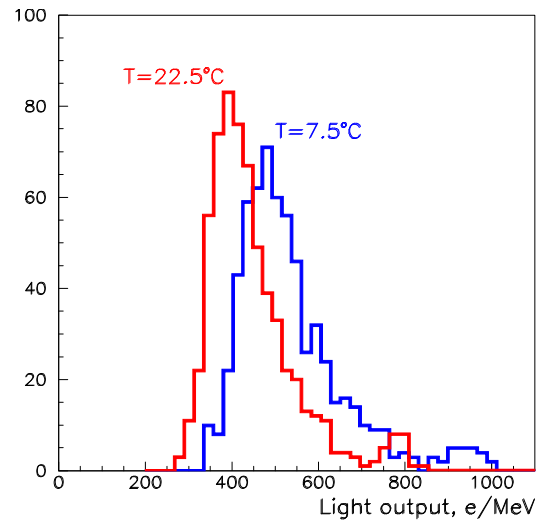
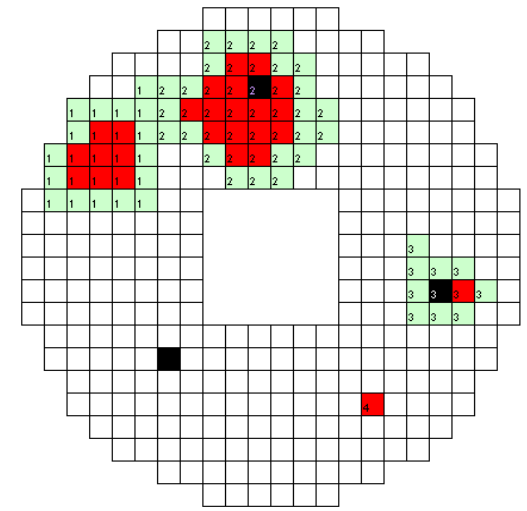
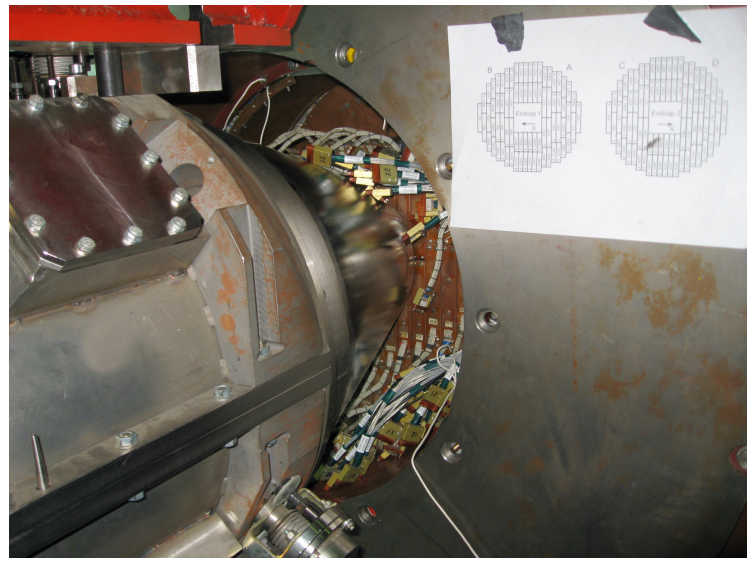
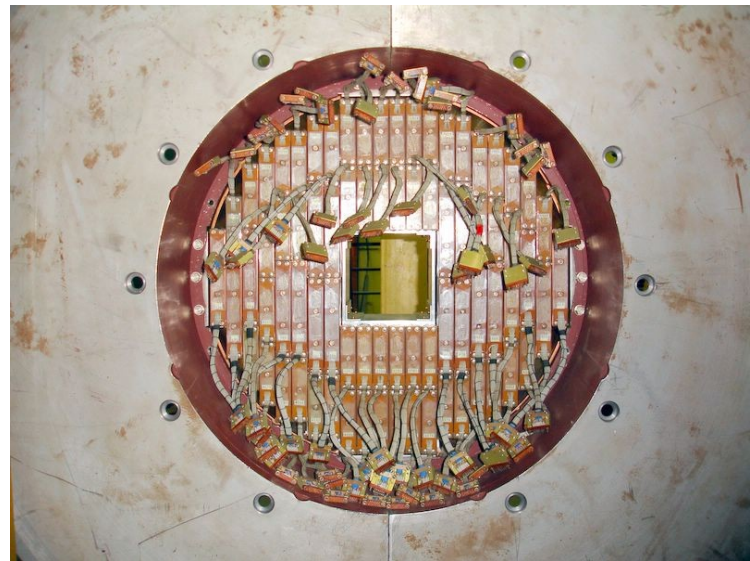


- Калориметр состоит из 680-ти счётчиков (масса всех кристаллов 450 кг), охватывает телесный угол $0.3 \cdot 4\pi$
- Счётчик состоит из кристалла ВГО с размерами $25 \times 25 \times 150 \text{ мм}^3$, $13.5X_0$
- $\sigma_E/E = 8 - 4 \%$ ($E_\gamma = 100 - 1000 \text{ МэВ}$)
- $\sigma_\theta = 0.03 - 0.02 \text{ рад}$



Световыход счётчика – 500 ф.эл./МэВ, ENC=500 ф.эл. (ENE = 1 МэВ)

Торцевой VGO калориметр (II)

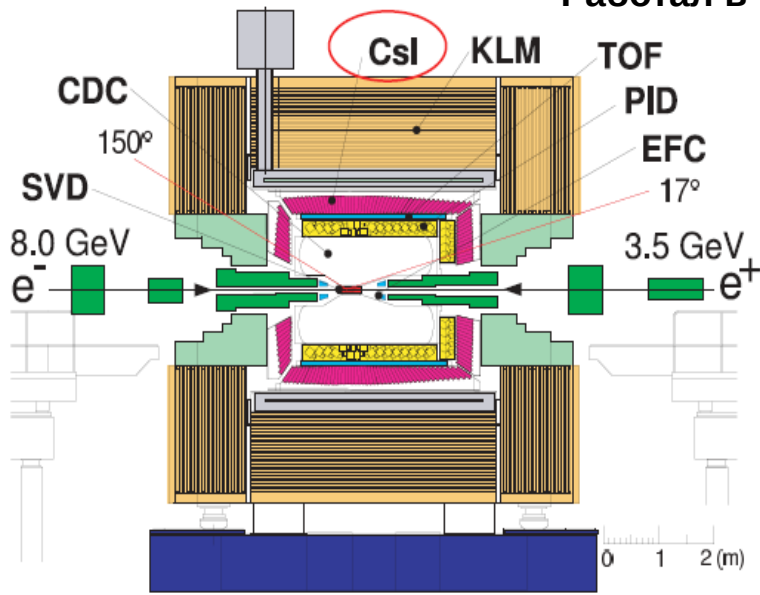


- Используется специальная система охлаждения калориметра
- Эксплуатируется при $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

- Калибровка с помощью космических мюонов
- Калибровка по событиям $\text{Bhabha } e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

Электромагнитный калориметр Belle

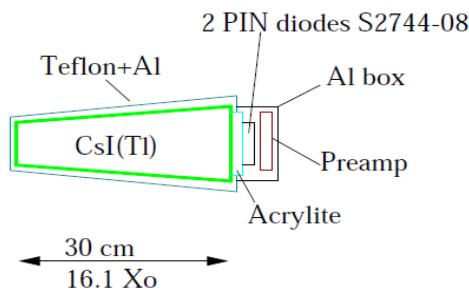
Работал в магнитном поле 1.5 Тл, охватывал телесный угол 91% от 4π.



- Калориметр на основе кристаллов CsI(Tl)
- Толщина – 30 см (16.1 X₀)
- Всего 8736 счётчиков (40 тонн кристаллов)
- Располагается в области с высоким магнитным полем 1.5 Тл (внутри сверхпроводящего соленоида)
- Кол-во вещества перед калориметром: (CDC+ACC+TOF): 0.3X₀

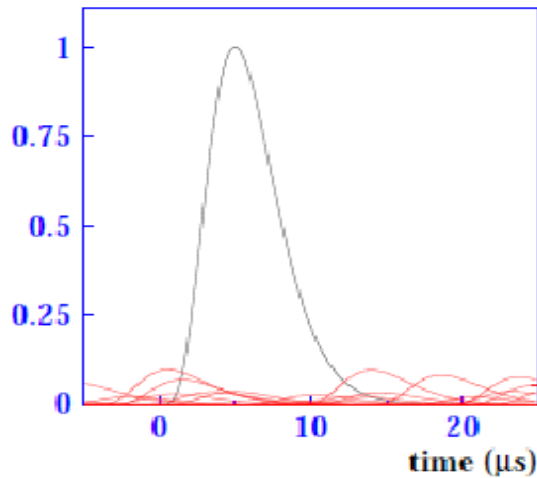
$$\sigma_E / E \approx 1.8\% \quad (E = 1\text{GeV})$$

$$\sigma_x = 6 \text{ mm}/\sqrt{E(\text{GeV})}$$



- Crystals 300x(50-80)x(50-80) mm
- Wrapping 200μm teflon+50 μm Al mylar
- Readout 2 10x20 mm PIN diodes
- 2 charge sensitive preamplifiers
- Shaper CR-(RC)⁴, τ=1μs
- Lightoutput 5000 p.e./MeV
- Electronic noise 1000e ≈ 200 keV

Проблемы при увеличении светимости коллайдера: КЕКВ → SuperKEKB (Belle → Belle II)



$$\sigma_{pile-up} [MeV] = \bar{E}_\gamma \cdot \sqrt{\nu \cdot \tau}$$

$\bar{E}_\gamma \approx 1 \text{ MeV}$ – энергия фоновых γ

$\nu = 1 \text{ МГц}$ – частота фоновых γ на 1 счётчик

τ – время формирования УФ (τ= 1 мкс на Belle)

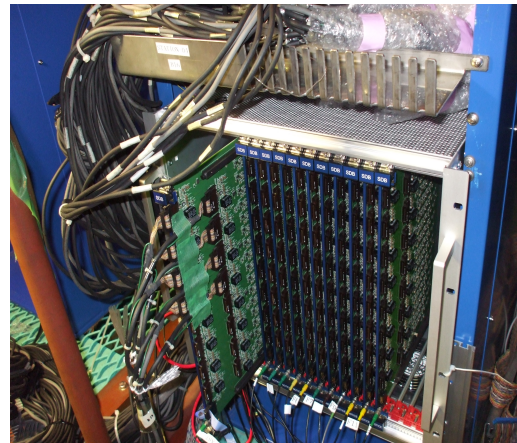
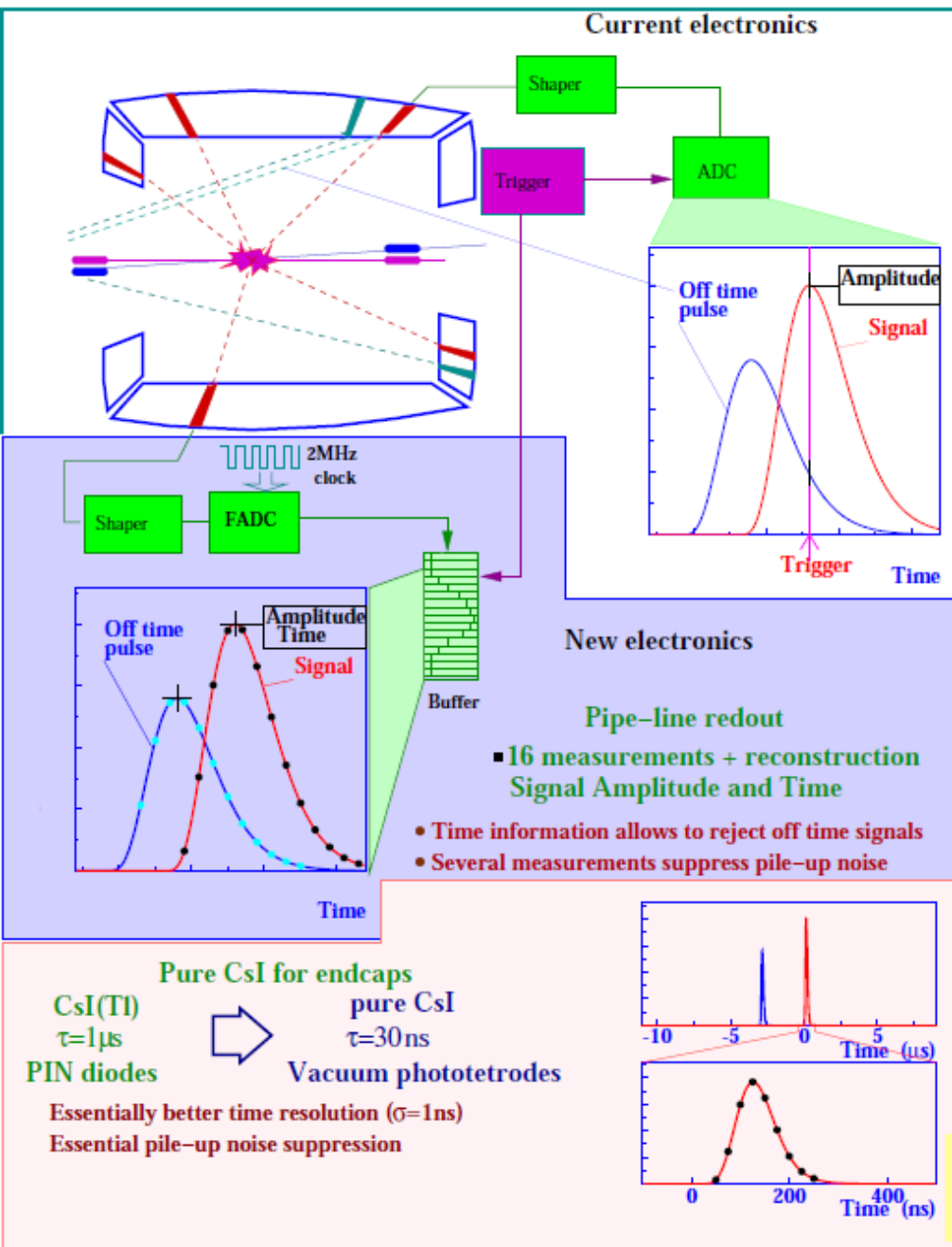
• Радиационное повреждение кристаллов и PIN ФД (увеличение темнового тока): Belle – до 200 нА

• Увеличение шумов наложения: Belle – до 1 МэВ, Belle II – как минимум в разы больше

• Высокий уровень пучкового фона, большое количество ложных кластеров: Belle (3 + 3 кластера с энергией > 20 МэВ), Belle II – ожидается на порядок больше

Электромагнитный калориметр Belle II (ECL)

В калориметре повторно используются кристаллы CsI(Tl).



- Была разработана электроника с конвейерной оцифровкой сигналов и анализом формы сигналов (в 16-канальной плате Shaper-DSP). Успешно используется в эксп. заходах с 2018 года.
- Восстанавливается амплитуда и **время** прихода сигнала. Это позволяет подавить число ложных фоновых кластеров в 7 раз.
- Уменьшение времени формирования в 2 раза до 0.5 мкс уменьшает шумы наложения в 1.4 раза.
- Значительное уменьшение шумов наложения в $\sqrt{(1000 \text{ ns}/30 \text{ ns})}=5.5$ раз в торцевом ECL (1152+960 каналов) возможно при замене кристаллов CsI(Tl) на кристаллы чистого CsI.

Задача по обновлению калориметра Belle II схожа с задачей разработки э/м калориметра для СЧТФ

Быстрые кристаллы для калориметров Belle II и СЧТФ

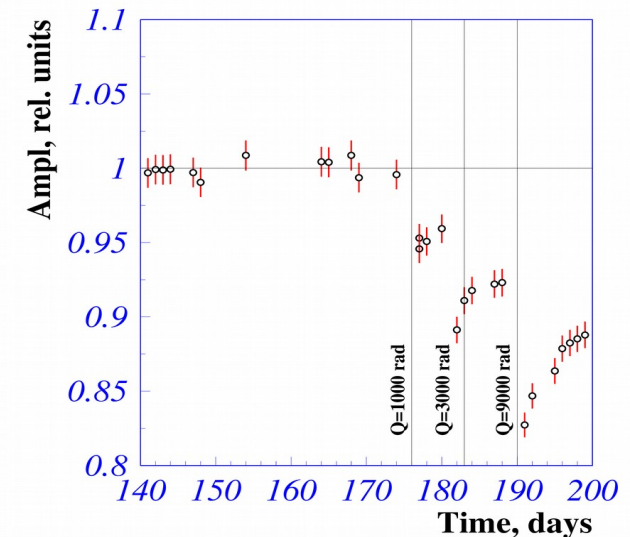
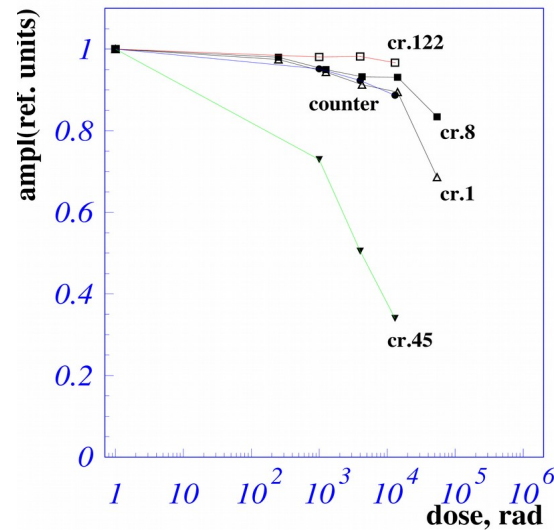
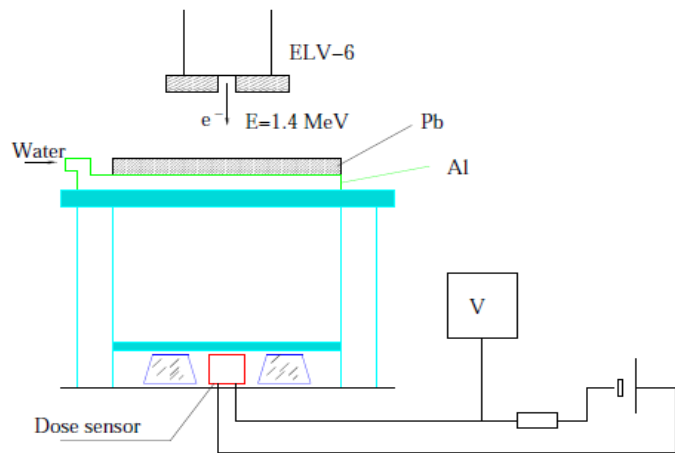
| crystal | ρ , g/cm ³ | X_0 , cm | λ_{em} , nm | n | N_{ph}/MeV | τ , ns |
|--|-------------------------------|---------------|------------------------|------|--------------|----------------|
| CsI(Tl) | 4.51 | 1.86 | 550 | 1.8 | 52000 | 1000 |
| CsI | 4.51 | 1.86 | 305/400 | 2 | 5000 | 30/1000 |
| BaF ₂ | 4.89 | 2.03 | 220/310 | 1.56 | 2500/6500 | 0.6/620 |
| CeF ₃ | 6.16 | 1.65 | 310 | 1.62 | 600 | 3 |
| PbWO ₄ | 8.28 | 0.89 | 430 | 2.2 | 25 | 10 |
| LuAlO ₃ (Ce) | 8.34 | 1.08 | 365 | 1.94 | 20500 | 18 |
| Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ (Ce) | 7.13 | 1.37 | 510 | 1.8 | 5600 | 60 |
| Lu ₂ SiO ₅ (Ce) | 7.41 | 1.2 | 420 | 1.82 | 26000 | 12/40 |

- CsI(Tl) имеет наибольший световыход и разумную цену $\sim 3\$/\text{см}^3$.
Используется в калориметрах: Belle, Belle II, BaBar, BES-III, CMD-3.
- Lu₂SiO₅ (LSO), LuAlO₃, LYSO тоже обладают большим световыходом (и они значительно быстрее CsI(Tl)), но и существенно дороже (15 – 30) $\$/\text{см}^3$, COMET (2000 LYSO кристаллов).
- Кристаллы чистого CsI с быстрой компонентой высвечивания 30 нс и всё ещё доступной ценой $\sim 6\$/\text{см}^3$. Существует несколько компаний в мире, которые могут произвести большое число кристаллов нужных размеров в разумные сроки (~ 40 тонн): AMCRYS(Харьков), Saint Gobain (Франция), SICCAS (Китай) → **хороший вариант для Belle II и СЧТФ.**

Изучение радиационной стойкости кристаллов чистого CsI

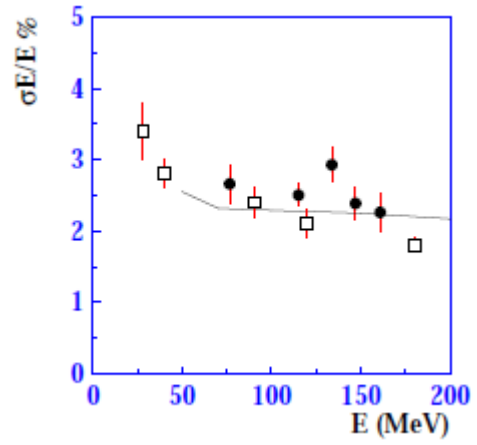
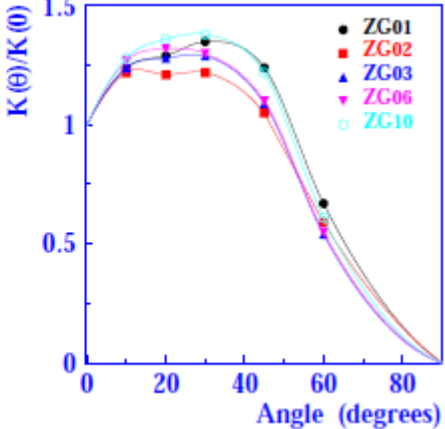
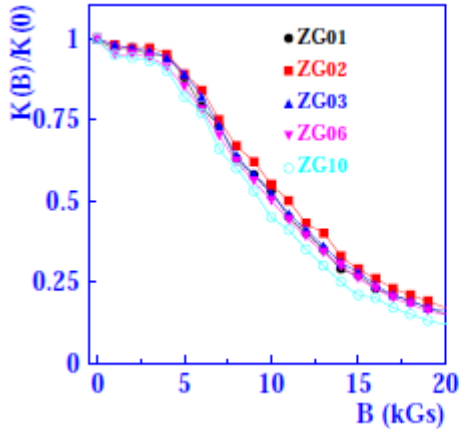
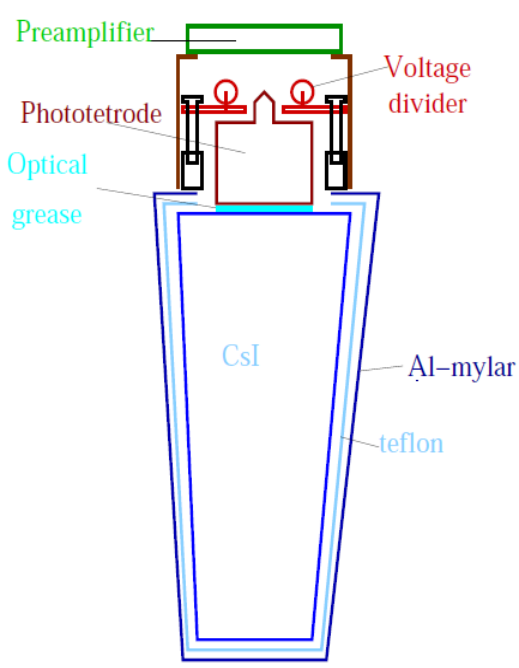
I. Bedny et al., NIMA598 (2009) 273.

A. Boyarintsev et al., JINST11 (2016) P03013.



- Изучалась радстойкость 4 кристаллов CsI(pure) и 1-ого счётчика (CsI(pure) + фотопентод), они облучались тормозными γ -квантами с энергией $E_\gamma < 1.4$ МэВ.
- Темп набора дозы контролировался током ускорителя ELV-6 и измерялся специальным дозиметром сделанным из кристалла CsI(Tl) и PIN ФД.
- Для набранной дозы 15 крад уменьшение световыхода 3-ёх кристаллов и счётчика оказалось меньше 15%, но для одного кристалла уменьшение световыхода составило 60%, световыход этого кристалла восстановился до уровня 80% от первоначального в течение 1-ого года. С точностью 3% не было зарегистрировано изменение отношения Fast/Total.
- Кристаллы чистого CsI также были облучены нейтронами (вплоть до 10^{12} 1/см²), с точностью 5% не было зарегистрировано уменьшение световыхода кристаллов.
- **Нужно разработать надёжную процедуру браковки кристаллов чистого CsI с плохой радстойкостью.**

Обновление (торцевого) калориметра Belle II



● Исследования с прототипом из 20-ти счётчиков на основе кристаллов CsI(pure) и фотопентодов Hamamatsu дали хорошие результаты:

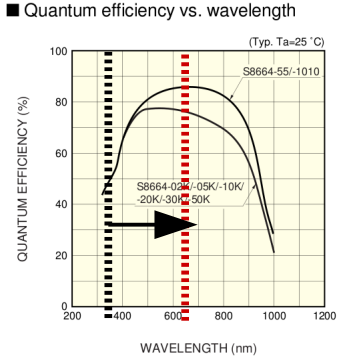
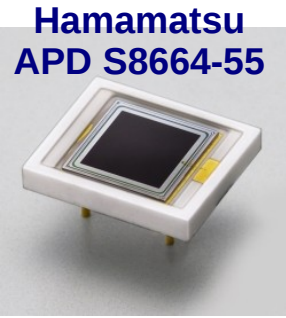
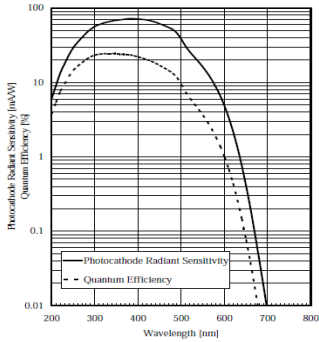
- низкий уровень шумов наложения,
- хорошее энергетическое и временное разрешение.

● Однако имеется и ряд недостатков: нет дублирования фотодетектора, сильная зависимость от магнитного поля, для Belle II потребуется разработать новую мех. конструкцию. Была предложена другая схема: счётчик на основе CsI(pure) и кремниевого ЛФД.

● Для опции CsI(pure) + Si ЛФД рассматривались ЛФД Hamamatsu APD: S8664-1010 and S8664-55.

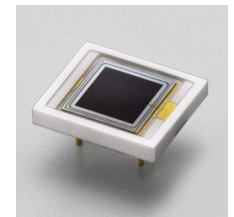
● С кристаллом CsI(pure) реального размера и 1 ЛФД (1 x 1 cm²) Hamamatsu S8664-1010 была измерена ENE ≈ 2 MeV, однако требуемая ENE ≤ 0.4 MeV

● Основной задачей стало достичь нужного уровня ENE и световыхода (LO) счётчика на основе CsI(pure) и Si ЛФД. Для увеличения LO была использована пластина с КНЛ (NOL-9), она позволила поднять LO приблизительно в 4 раза.



Вариант CsI(pure)+NOL-9+4ЛФД (I)

- Первые тесты показали, что для счётчика с размерами $6 \times 6 \times 30 \text{ см}^3$ на основе кристалла CsI(pure) и 1 ЛФД Hamamatsu S8664-1010 (1 см^2 , $C_{\text{APD}} = 270 \text{ пФ}$) присоединённого к одному из двух торцов кристалла с помощью смазки OKEN-6262A получается световой выход **$LO = 26 \text{ ф.э./см}^2/\text{МэВ}$** (для времени форм. 30 нс), что соответствует $ENE \approx 2 \text{ МэВ}$. Такой низкий световой выход и большая ENE приводит к существенной деградации энергетического разрешения калориметра (σ_E/E (100 МэВ) $\approx 8\%$). Приемлемые же параметры: **$LO \geq 150 \text{ ф.э./МэВ}$, $ENE < 0.4 \text{ МэВ} \rightarrow \sigma_E/E$ (100 МэВ) = 3.7% (3.4% за счёт флуктуаций продольных утечек)**
- Причины низкого светового выхода: малая чувств. площадь ЛФД (1/36 от площади торца), малая квантовая эффективность ЛФД ((20 – 30)%) для УФ сц. света (320 нм). Причины большой $ENE = ENC/LO$: малый световой выход и большой ENC (большая ёмкость Hamamatsu S8664-1010, малое время формирования $\tau = 30 \text{ ns} \rightarrow$ тепловой шум $\sim C_{\text{APD}}/(\sqrt{\tau} * g_{\text{FET}})$ доминирует).
- Способы улучшить LO и ENE:
 - Увеличить число ЛФД ($LO \sim N_{\text{APD}}$, $ENE \sim 1/\sqrt{N_{\text{APD}}}$) \rightarrow дорого
 - **Использовать ЛФД меньшей площади: 4 ЛФД Hamamatsu S8664-55 (0.25 см^2 , $C_{\text{APD}} = 85 \text{ пФ}$). Световой выход такой же, а ENE уменьшается как $1/\sqrt{N_{\text{APD}}} = 0.5$.**
 - **Использовать спектросместитель (320 нм \rightarrow 600 нм) для увеличения кв. эфф.**
 - **Оптимизировать схему ЗЧПУ (увеличить как можно больше g_{FET})**

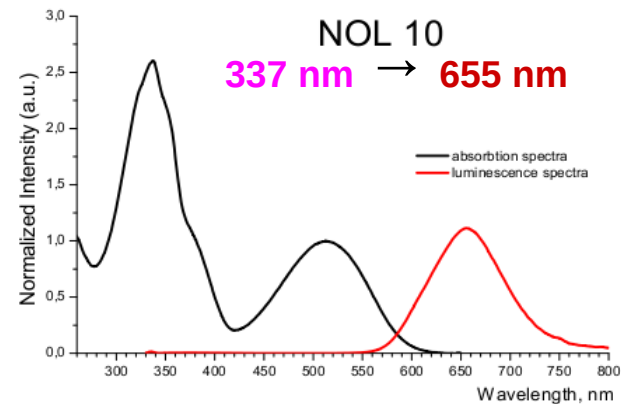
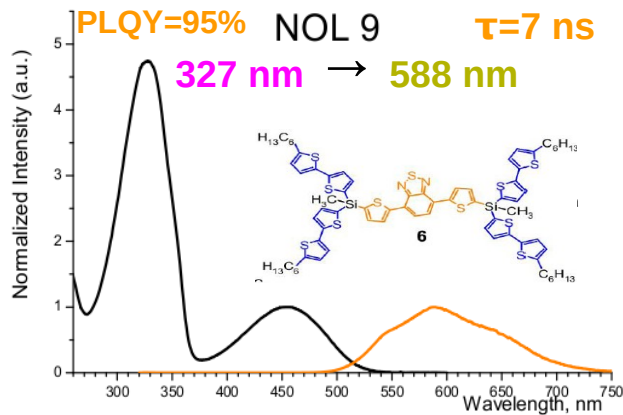
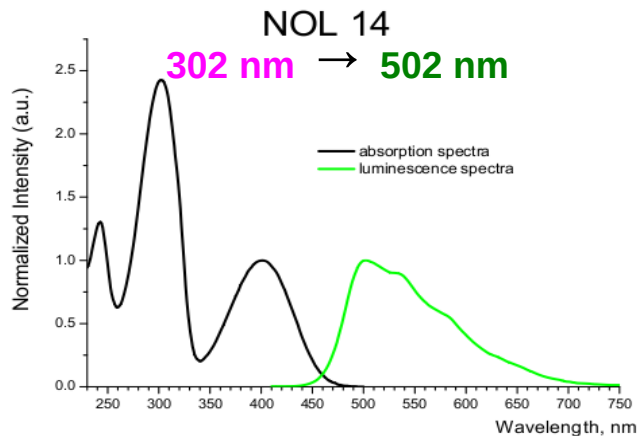


Было выбрано решение: CsI(pure) + NOL-9 + 4ЛФД (Hamamatsu S8664-55)

Вариант CsI(pure)+NOL-9+4ЛФД (II)

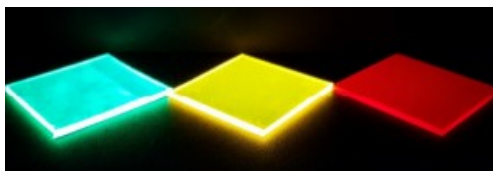
Y. Jin et al., *NIMA* **824** (2016) 691. H. Aihara et al., *PoS PhotoDet 2015* (2016) 052. H. Aihara et al., *PoS ICHEP 2016* (2016) 703.

На основе трёх типов КНЛ (NOL-9,10,14) от **LumInnoTech Co.**, были изготовлены пластины с размерами 60 x 60 x 5 мм³.

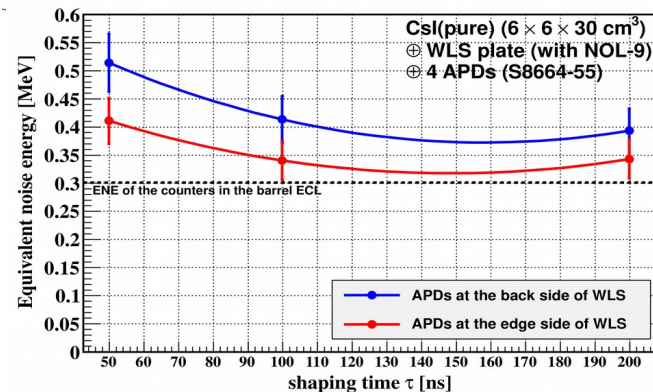
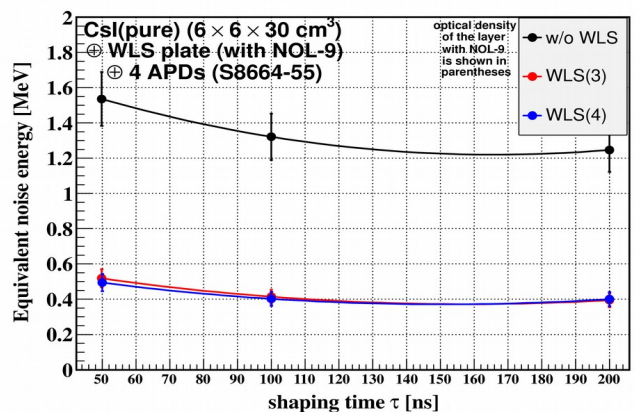
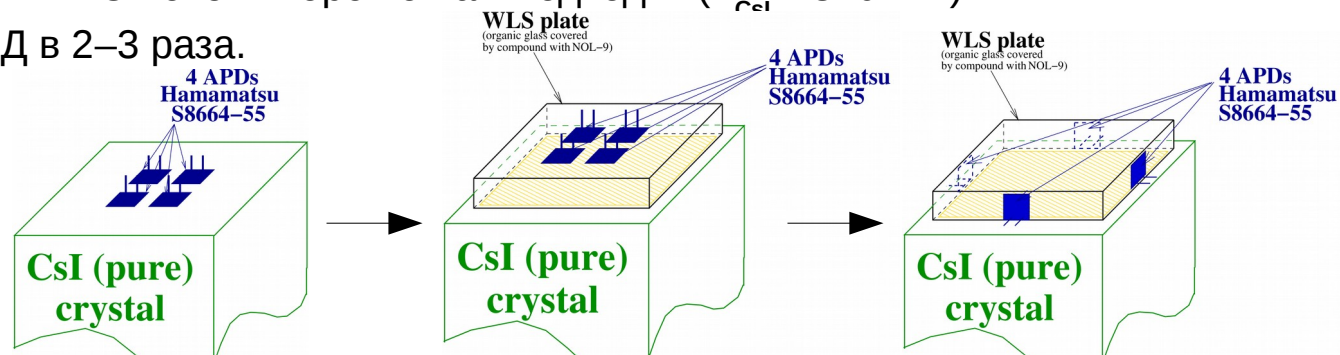
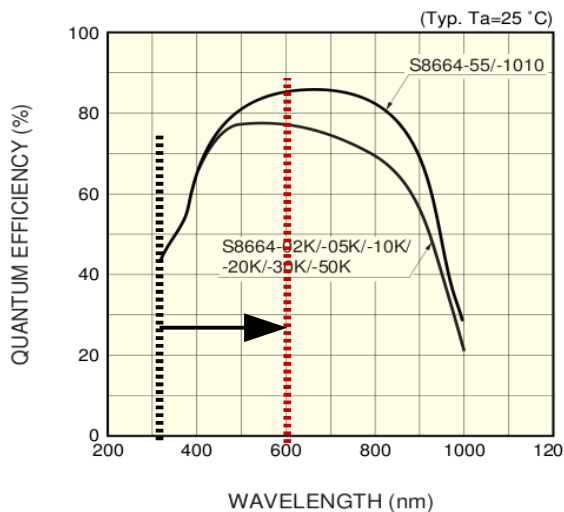


Спектры поглощения и испускания этих NOL очень хорошо нам подходят ($\lambda_{CsI} = 320$ nm).

Достигалось улучшение кв. эфф. ЛФД в 2–3 раза.

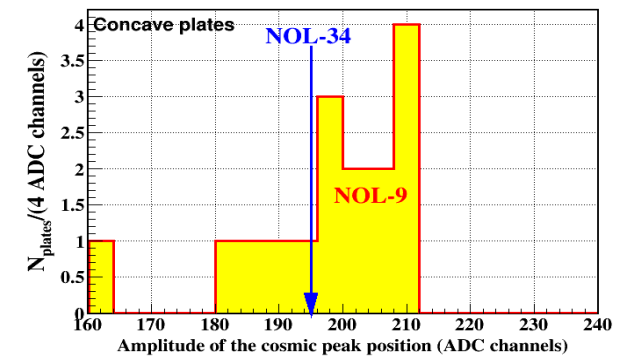
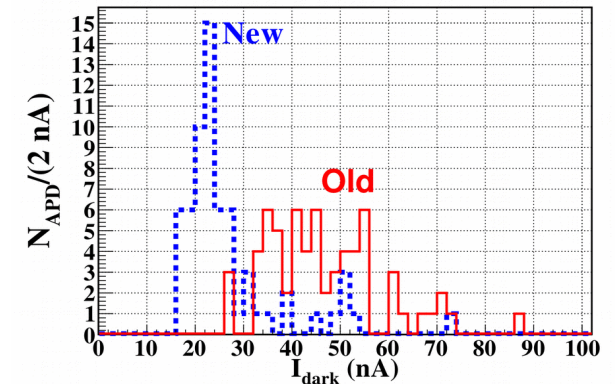


■ Quantum efficiency vs. wavelength



Вариант CsI(pure)+NOL-9+4ЛФД (III)

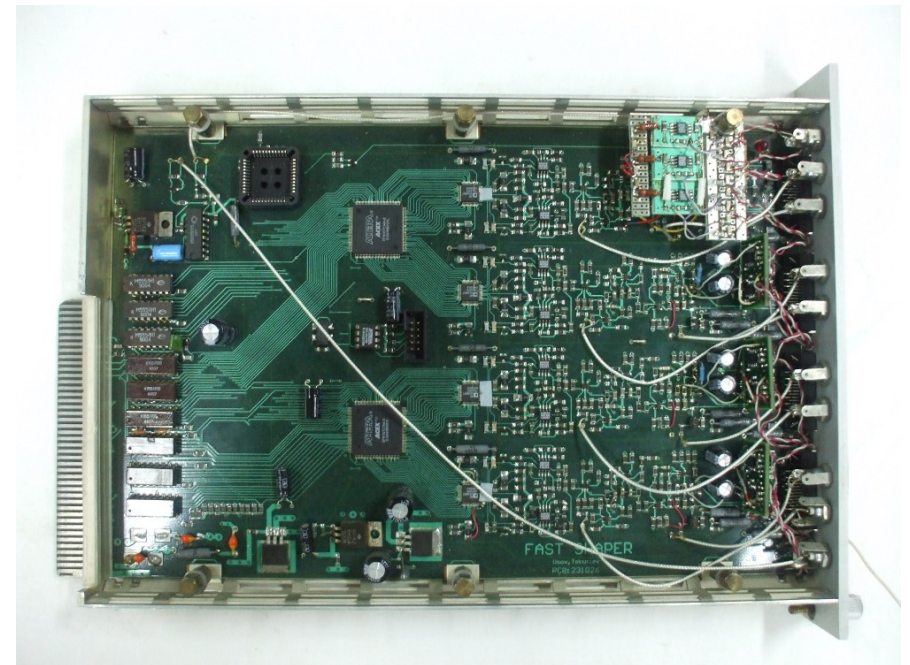
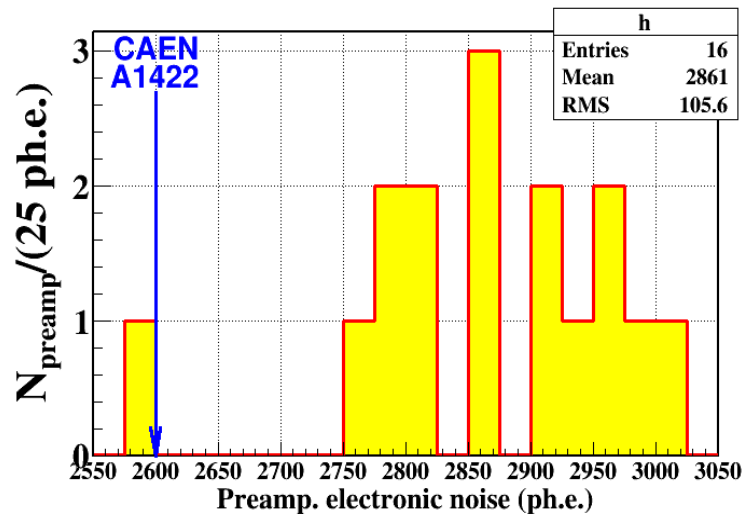
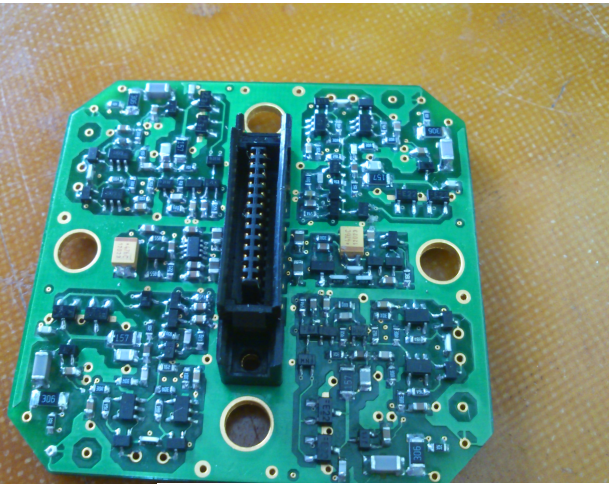
- Сконструирован прототип из 16-ти счётчиков, параметры кристаллов с размерами 6 x 6 x 30 см³ были измерены, разработана и изготовлена необходимая механика.
- 64 Hamamatsu S8664-55 ЛФД от LHC CMS были использованы.
- 16 пластин с NOL-9, ЛФД были приклеены к торцам пластин с помощью смолы BC-600. Сборки пластины+4ЛФД были проверены.



Вариант CsI(pure)+NOL-9+4ЛФД (IV)

4-канальный ЗЧПУ и УФ-АЦП плата

- 4-канальный ЗЧПУ размерами 53 x 55 мм²
- Каждый канал: чувств. 0.2 В/пКл, 2 вх. FET 2SK932 (с высокой крутизной), парафазный выход, цепь подачи напряжения смещения ЛФД, калибровочный вход.



- 4-канальная плата КАМАК УФ-АЦП
- CR-(RC)⁴ фильтр ($\tau = 30$ ns) + 40 MHz 12-битное конвейерное АЦП + циклич. буфер на 256 слов
- Установлены спец. дифференциальные приёмники и сумматоры для приёма парафазных сигналов с ЗЧПУ

Вариант Csl(pure)+NOL-9+4ЛФД (V)

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{1.9\%}{\sqrt[4]{E [GeV]}} \oplus \frac{Stat}{\sqrt{E [GeV]}} \oplus \frac{Elec}{E [GeV]}$$

Флуктуации
утечек ливня

Статистика
фотоэлектронов

Электронные
шумы

$$Stat = 100\% \cdot \sqrt{\frac{F}{S [ph.e/MeV] \cdot N_{APD} \cdot 1000}}$$

$$F = 1.69 \pm 0.04$$

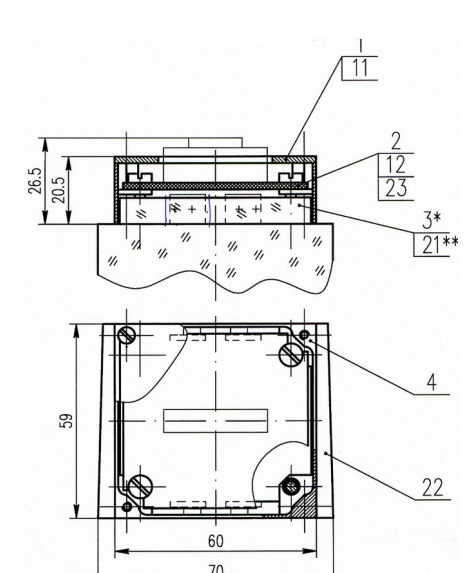
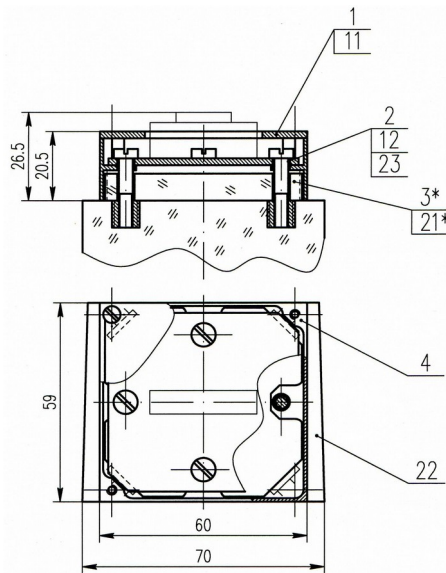
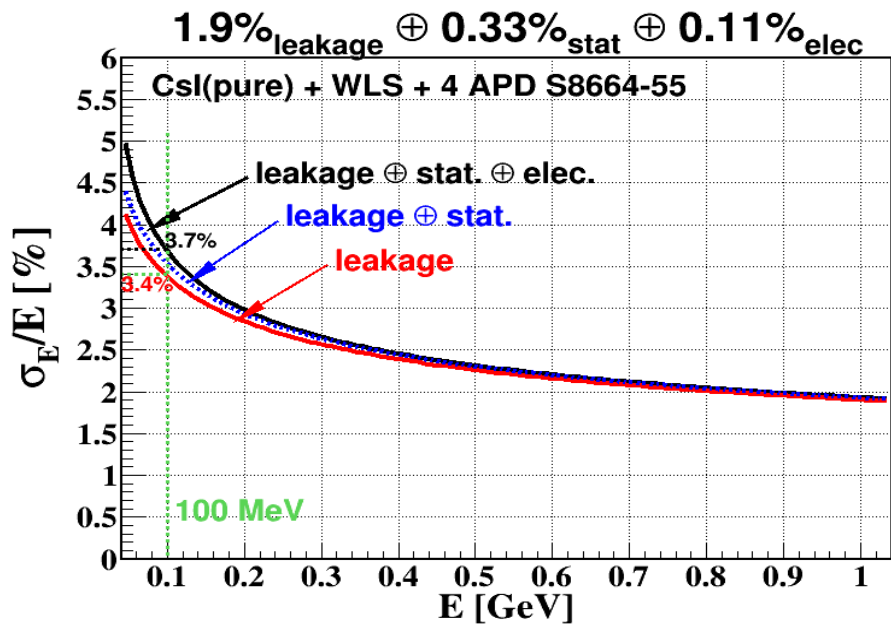
$$S \cdot N_{APD} = (160 \pm 9) \text{ ф.э./МэВ}$$

$$Elec = 100\% \cdot \frac{ENE [MeV] \cdot \sqrt{N_{crys}}}{1000}$$

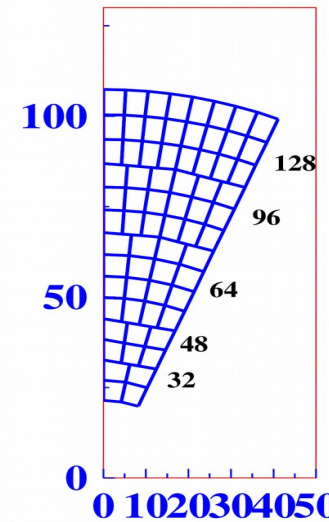
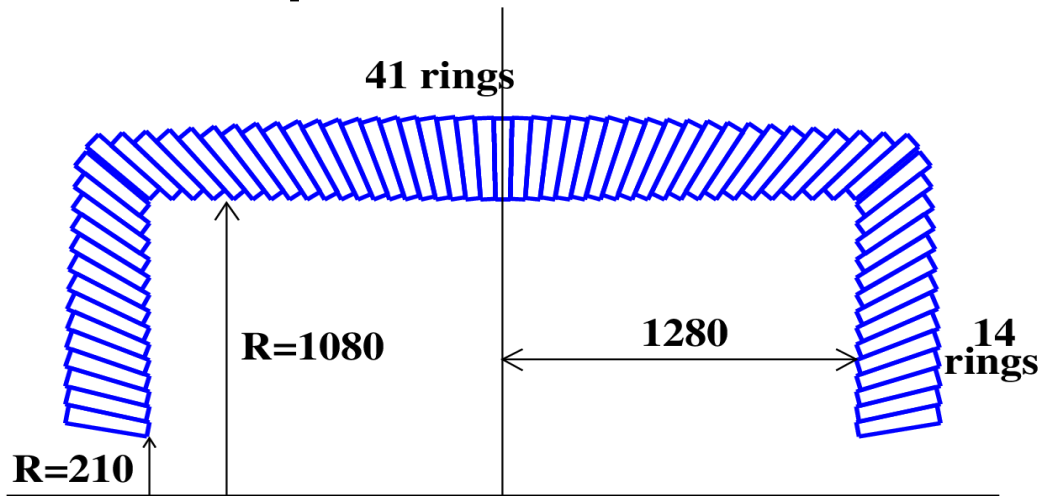
$$ENE = (0.33 \pm 0.03) \text{ МэВ}$$

$N_{crys} = 10$ – среднее число

кристаллов в 1 ГэВ-ном
кластере



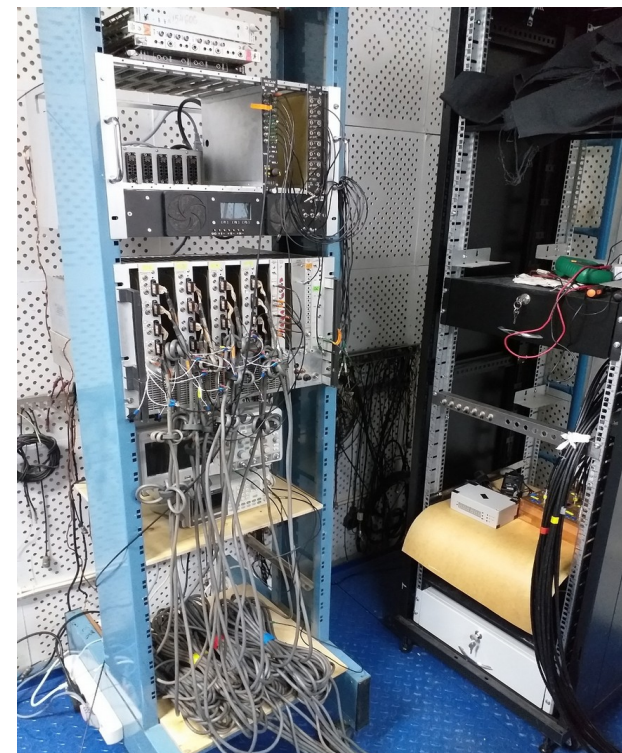
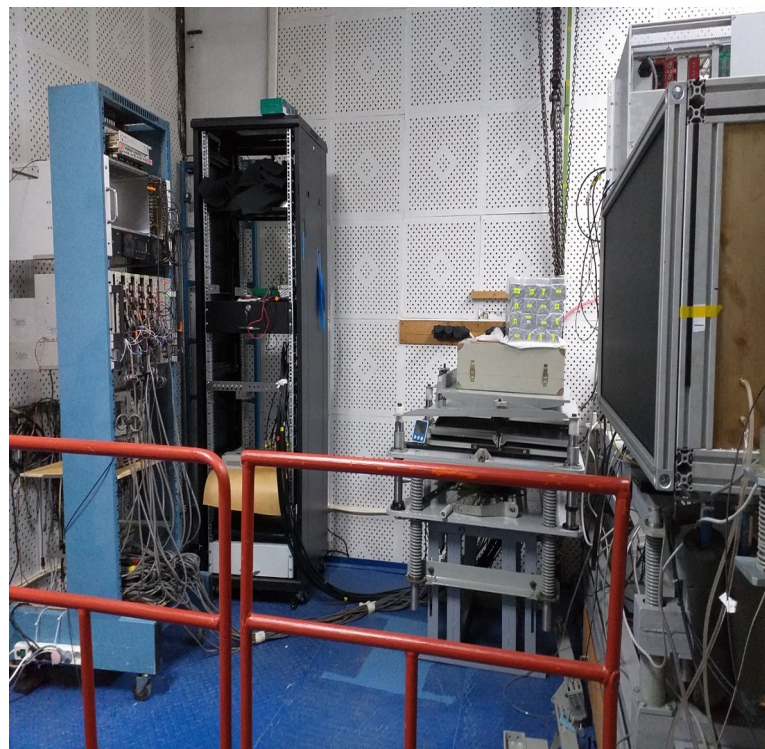
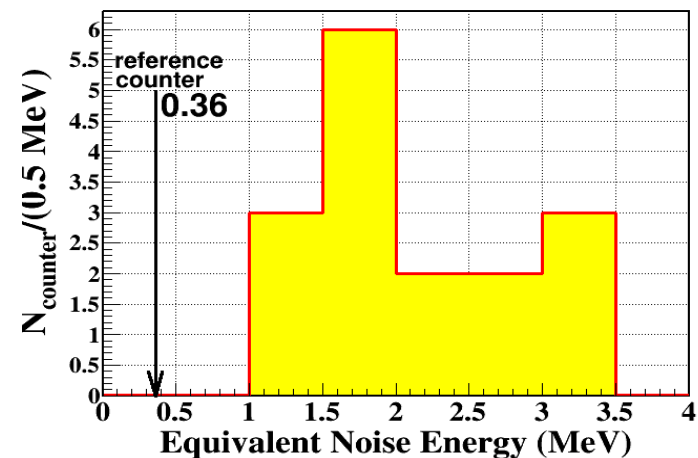
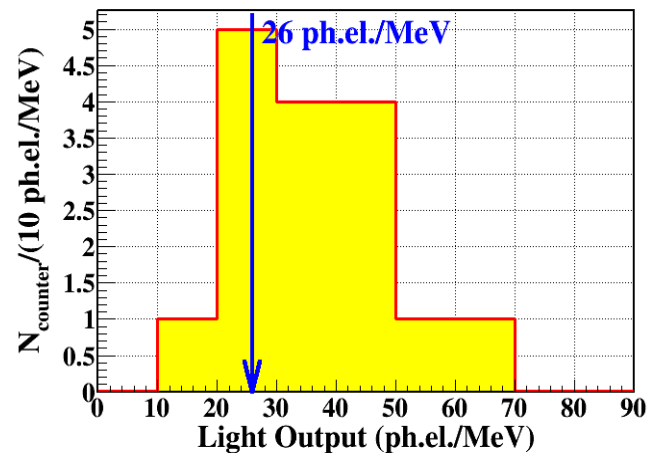
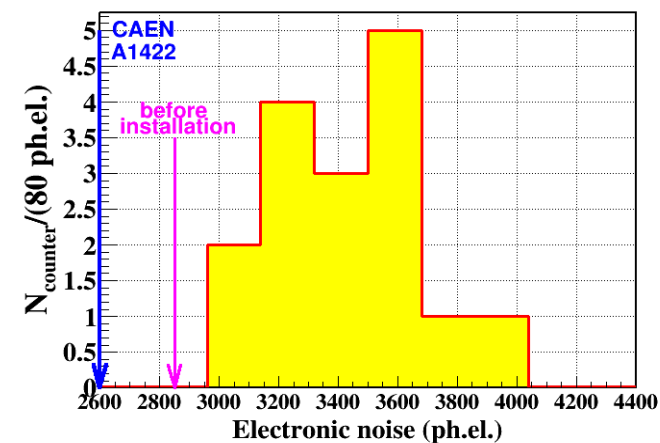
Приблизительная схема калориметра СЧТФ



**68 счётчиков
в 1-ом секторе**

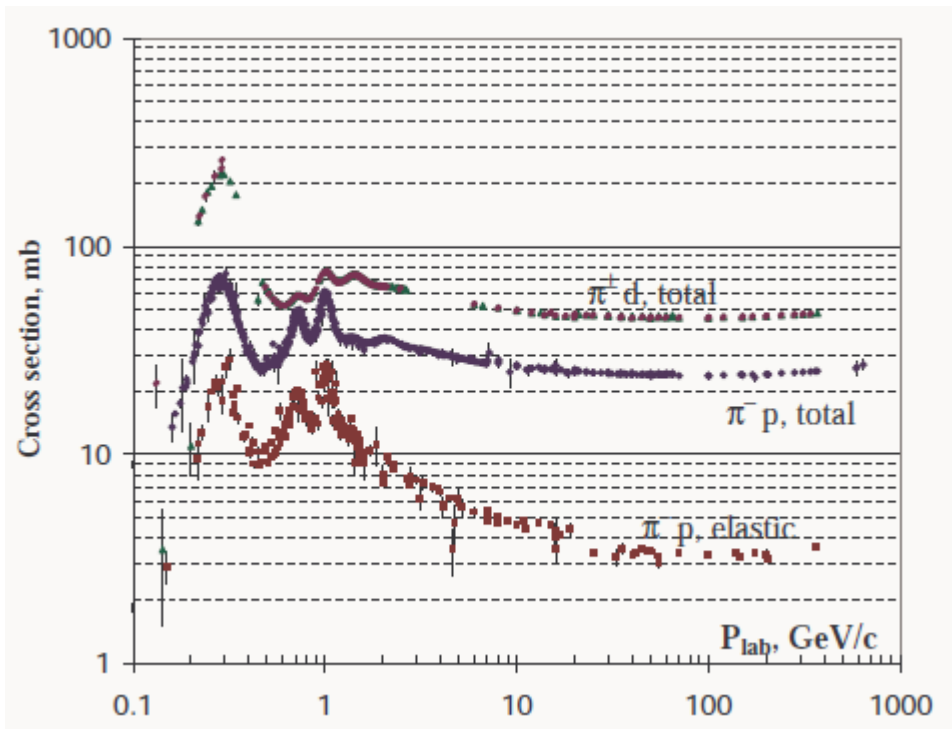
- Кристаллы пирамидальной формы (меньший торец $\sim(5.5 \times 5.5) \text{ см}^2$) длиной 30/34 см (16/18 X_0)
- Баррельная часть состоит из 5248 счётчиков = 41 θ -колец \times 128 счётчиков, с полной массой 26/31 тонн
- Две торцевые части: 2 \times 16 сектора \times 68 = 2 \times 1088 = 2176 счётчика, с полной массой 10/12 tons
- Весь калориметр: 7424 счётчика с полной массой
36/43 тонн \rightarrow 40/47 M\$
- Фотодиоды: 7424 \times 4 \rightarrow 3 M\$
- Электроника: 7424 \rightarrow 4 M\$
- Полная стоимость (16 X_0 / 18 X_0): 47/54 M\$

Текущие работы с прототипом калориметра



Тесты прототипа на пучке в декабре 2021 года на установке РОКК-1М ИЯФ

Адронная калориметрия, адронный ливень (I)



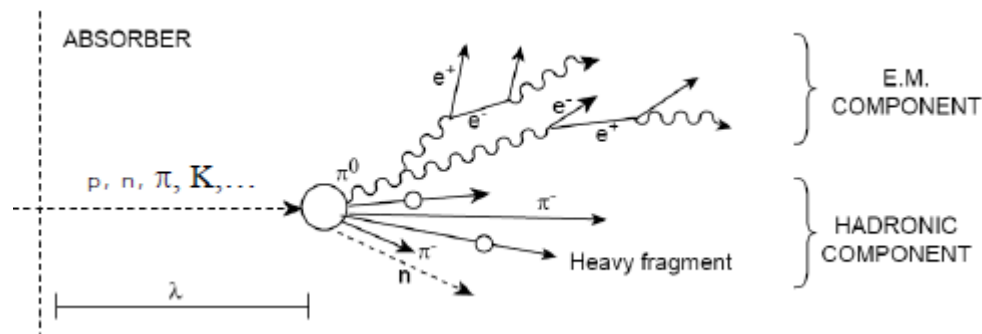
$$\sigma_{\text{яд}} \sim A^{2/3}$$

Для адронов с энергией больше нескольких сот МэВ взаимодействие уже становится неупругим, рождаются вторичные частицы - если энергия начального адрона достаточно (E > ~10 ГэВ) происходит развитие адронного каскада.

Продольное развитие адронного ливня определяется длиной яд. взаимодействия:

$$\lambda_1 \approx 35 \text{ г/см}^2 \cdot A^{1/3} \gg X_0 \quad \lambda_1 \approx 17 \text{ см в железе}$$

В адронных каскадах рождаются в основном заряженные и **нейтральные** пионы, доля каонов, нуклонов и других адронов заметно меньше. Средняя множественность вторичных частиц $\sim \ln(E)$, средний поперечный импульс $\langle p_T \rangle \sim 0.35$ ГэВ/с, средняя доля энергии передающаяся вторичным частицам (неупругость) $\sim 50\%$.

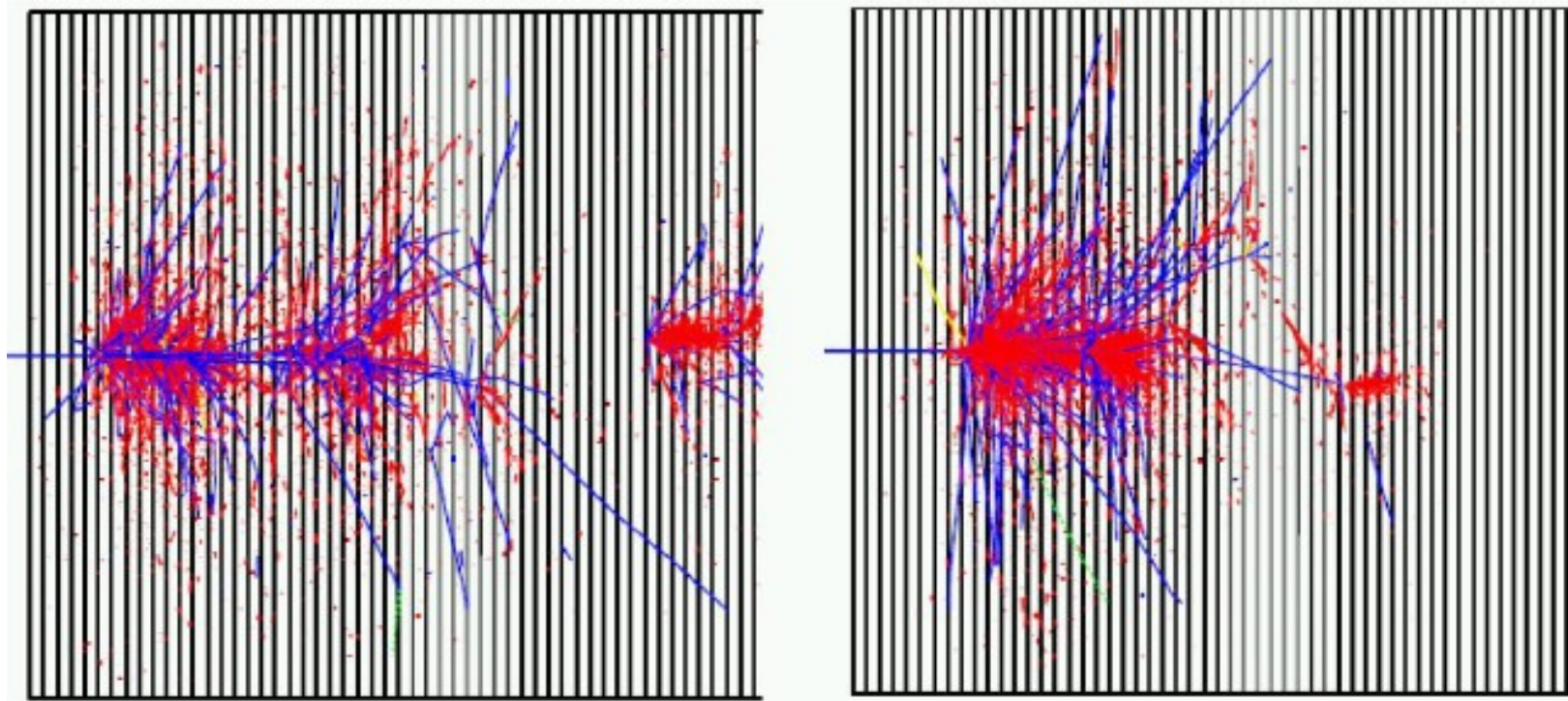


Доля π^0 , $F_0 = 1/3$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ($\tau = 10^{-16}$ с)

Адронный ливень имеет две компоненты: электромагнитную (γ) и адронную (π^\pm , тяжёлые фрагменты ядер, возбуж. ядра, Нейтроны): $F_0 + F_h = 1$

Адронный ливень (II)

Моделирование адронных ливней



Красным – электромагнитная компонента, **синим** - адронная

Значительная доля ($\sim 35\%$) адронной компоненты ливня F_h является невидимой. Часть энергии уходит на разрыв связей нуклонов в ядре (не даёт вклада в энерговыделение), n и K_L могут покинуть калориметр без взаимодействия с ним, заряженные пионы могут распасться ($\pi \rightarrow \mu\nu$), нейтрино улетает.

Адронный ливень (III)

Продольный профиль ливня характеризуется максимумом вблизи первого яд. взаимодействия:

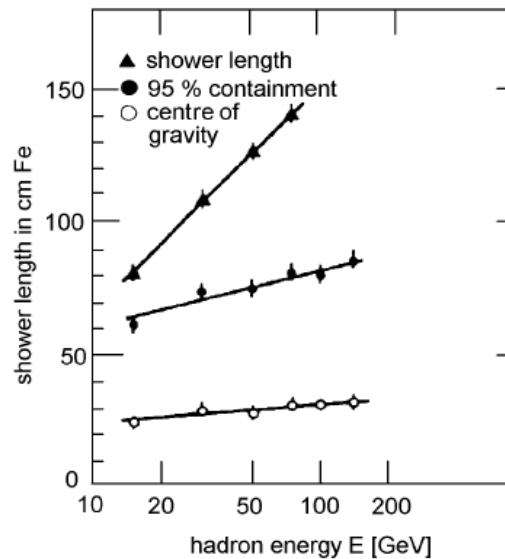
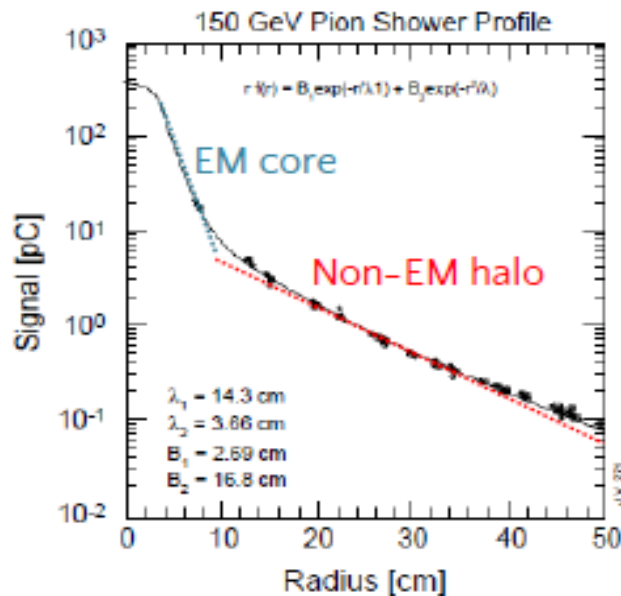
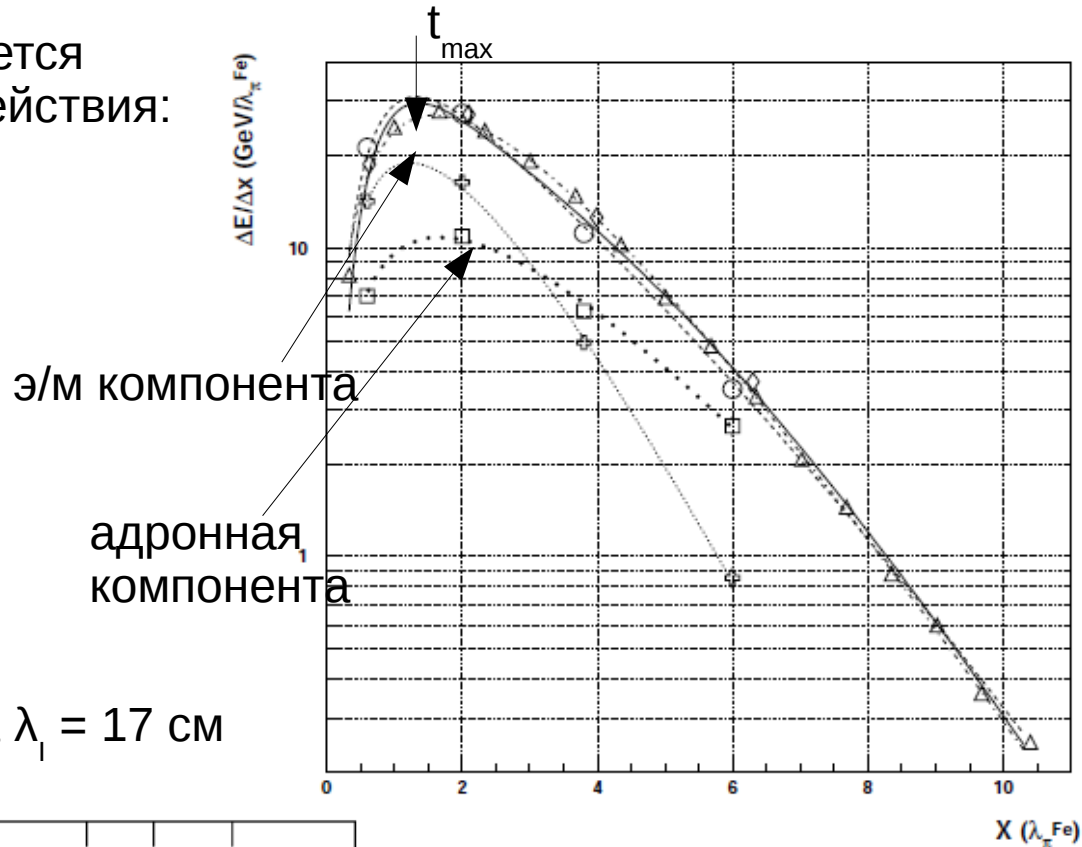
$$t_{\max}(\lambda_1) = 0.2 \ln(E[\text{ГэВ}]) + 0.7,$$

а потом эксп. спадом с показателем λ_1

$$t_{95\%} = a \ln(E) + b$$

В железе $a=9.4$, $b = 30$, для 100 ГэВ-ного адрона $t_{95\%} = 80$ см.

В железе 95% ливня в цилиндре радиуса $\lambda_1 = 17$ см



Факторы влияющие на линейность отклика, разрешение, e/π

Доля $F_0(E)$ э/м компоненты растёт с энергией, а доля адронной компоненты падает, причём: $F_0(E) + F_h(E) = 1$

Регистрируемые сигналы от электромагнитной и адронной компонент ливня:

$$E_{vis}(e) = \varepsilon_e F_0(E)E, \quad E_{vis}(h) = \varepsilon_h F_h(E)E$$

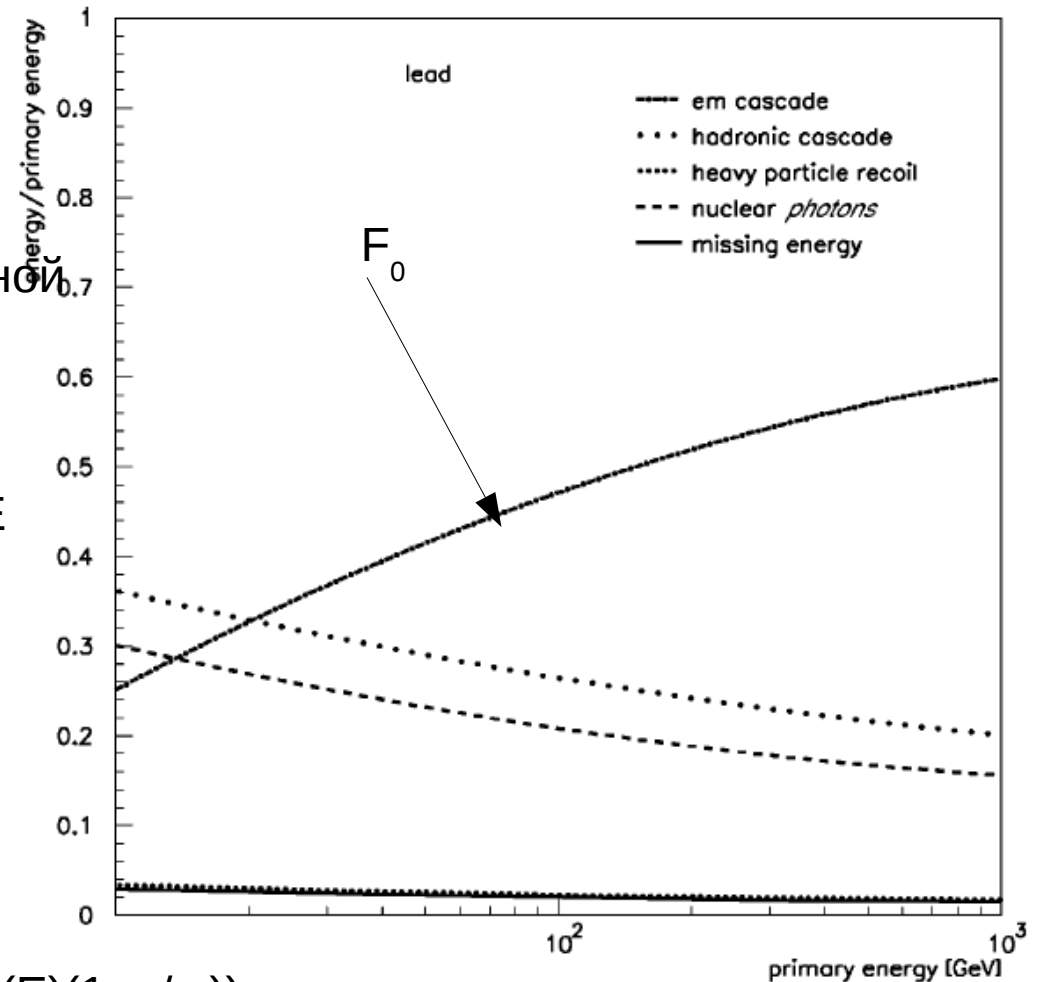
$$E_{vis}(tot) = E_{vis}(e) + E_{vis}(h) = (\varepsilon_e F_0(E) + \varepsilon_h F_h(E))E$$

Видно, что если $\varepsilon_e = \varepsilon_h = \varepsilon$, то:

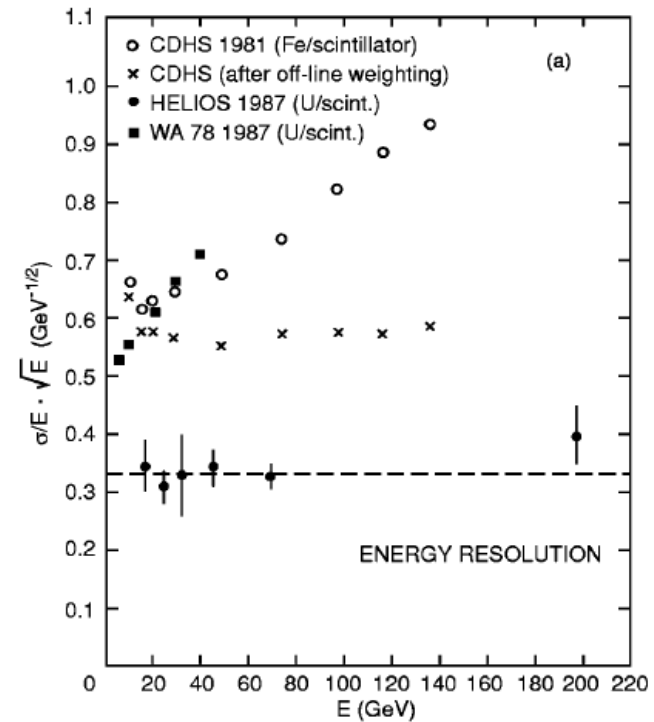
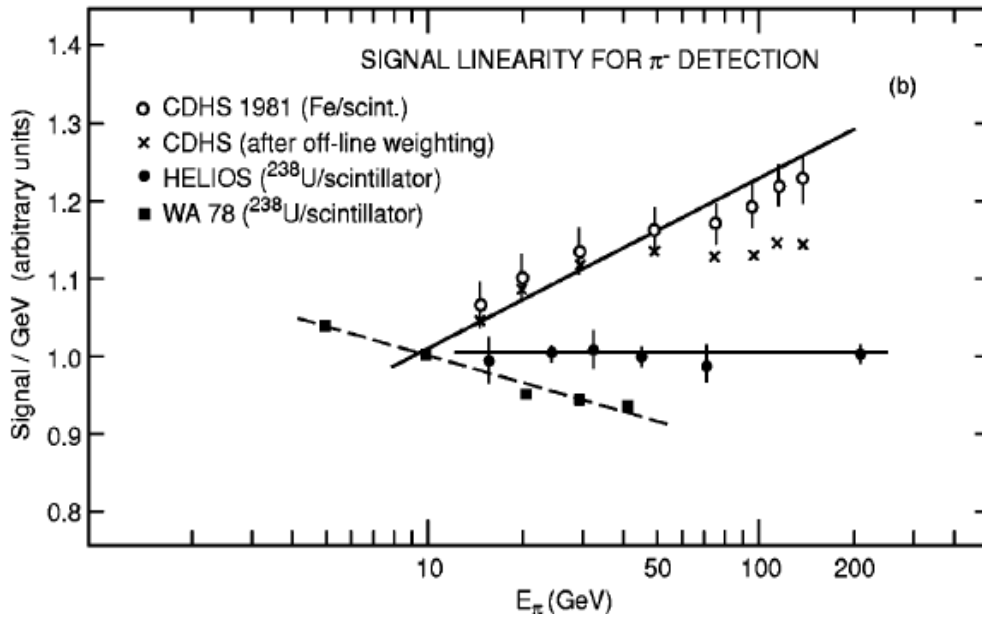
$E_{vis}(tot) = \varepsilon E$, т.е. регистрируемый сигнал пропорционален энергии начального адрона E . Такой калориметр называется **скомпенсированным**.

Вводят параметр $e/\pi = \varepsilon_e E/E_{vis}(tot) = 1/(1-F_h(E)(1-\varepsilon_h/\varepsilon_e))$

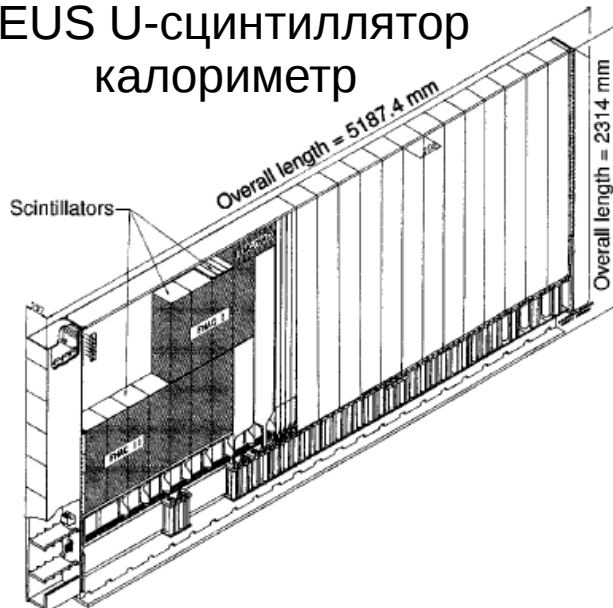
Для скомпенсированного калориметра $\varepsilon_h/\varepsilon_e = 1$, поэтому $e/\pi = 1$



Компенсация адронных калориметров (I)



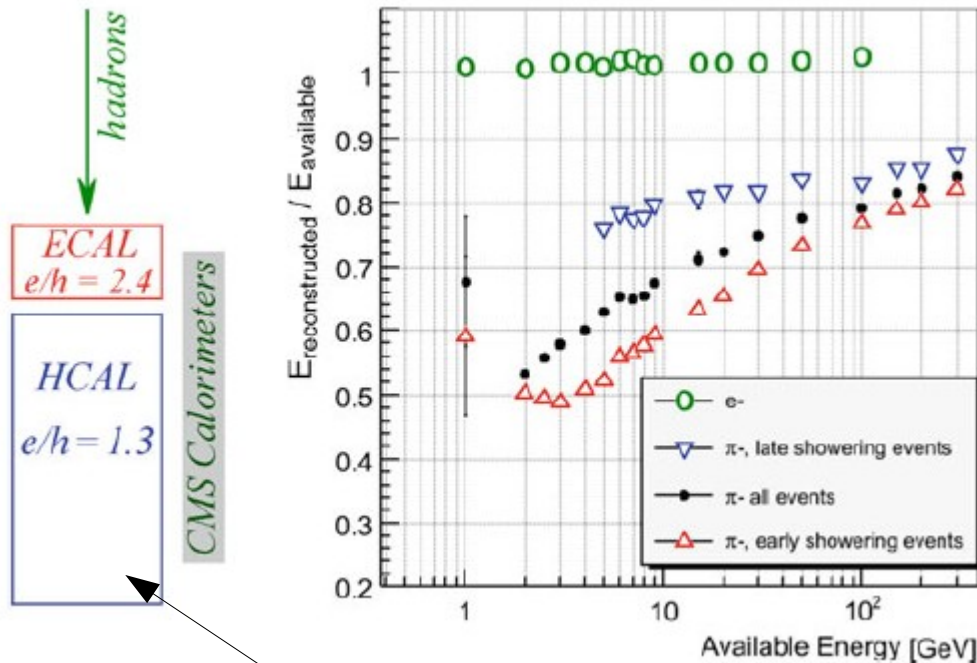
ZEUS U-сцинтиллятор
калориметр



Пластины из обеднённого урана увеличивают нейтронную компоненту адронного ливня, далее эти нейтроны эффективно регистрируются в пластинах из сцинтилляционной пластмассы. Варьируя толщину урановых пластин и сц. пластин можно варьировать ϵ_h и добиться компенсации $\epsilon_h / \epsilon_e = 1$. Однако адронная компенсация делает такой калориметр неоптимальным для регистрации э/м ливней:

$$\sigma/E(\text{hadrons}) = 0.35/\sqrt{E(\text{GeV})}, \quad \sigma/E(\text{electrons}) = 0.18/\sqrt{E(\text{GeV})}.$$

Компенсация адронных калориметров (II)

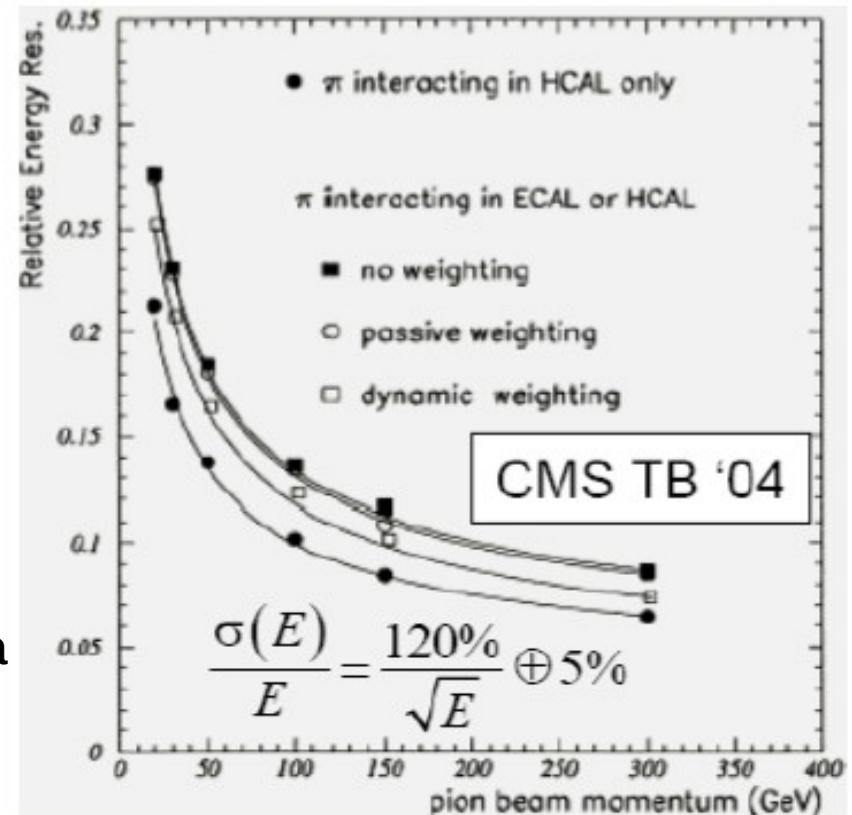


латунь-сцинт.

Современное развитие адронной калориметрии идёт по пути более детальной реконструкции каждой частицы ливня (particle-flow), что открывает широкие возможности offline-компенсации отклика калориметрической системы. Также актуальна методика dual-readout, когда регистрируется черенковский свет э/м компоненты адронного ливня и также делается offline-компенсация.

Компенсация адронного калориметра и оптимизация электромагнитного калориметра в одном и том же детекторе обычно просто невозможны.

В результате отклик адронного калориметра CMS нелинеен и энергетическое разрешение плохое:



Заключение по калориметру СЧТФ

- Калориметр является важной подсистемой современного детектора элементарных частиц
- Для детектора СЧТФ нужен э/м калориметр с высоким энергетическим, координатным и временным разрешением
- Кристалл чистого CsI является подходящим материалом для калориметра СЧТФ.
- Пучковые тесты прототипа на основе кристаллов чистого CsI и вакуумных фотопентодов продемонстрировали хорошее энергетическое, пространственное и временное разрешение. Также была продемонстрирована возможность существенного подавления шумов наложения.
- В настоящее время развивается вариант CsI(pure)+NOL-9+4ЛФД. Был изготовлен прототип из 16-ти счётчиков. Проводится изучение стабильности отклика электроники прототипа с космическими событиями и с помощью сигналов калибровочного генератора.
- Ведутся работы по улучшению характеристик прототипа.
- Осенью планируется тестирование прототипа на пучке γ квантов на установке РОКК-1М ИЯФ.