

# Измерение основных характеристик кристалла GAGG

Б. Сикач, Д. Павлюченко, Д. Епифанов

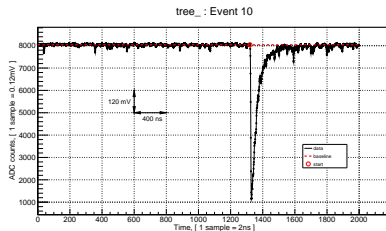
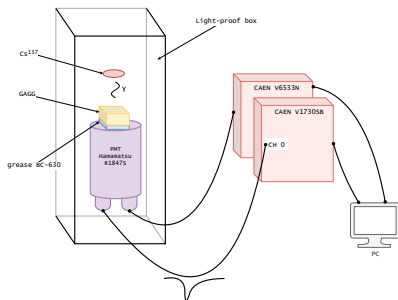
ИЯФ СО РАН

4 ноября, 2022

# Введение

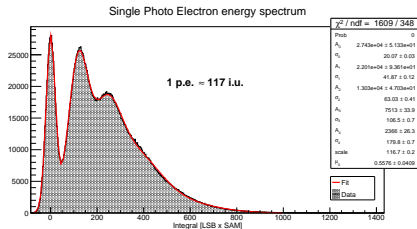
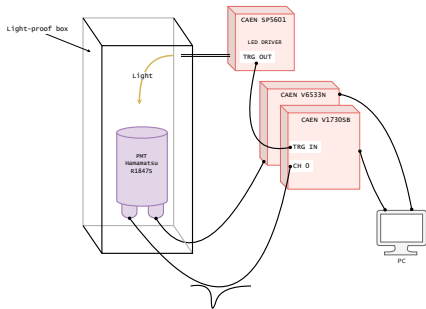
- В настоящее время в ИЯФ СО РАН и НЦФМ (Саров) развивается проект по созданию Супер Чарм-тау Фабрики (СЧТФ), важной частью детектора СЧТФ является электромагнитный калориметр. В текущем проекте предполагается калориметр на основе быстрых ( $\tau = 30$  нс) сцинтилляционных кристаллов чистого CsI. Из-за их относительно малого световыхода ( $2000 \div 5000$  фот./МэВ) в счётчике калориметра приходится использовать специальные концентраторы сцинтилляционного света и полупроводниковые фотодетекторы с усилением (лавинные фотодиоды). Это усложняет конструкцию счётчика калориметра и его электронику.
- Актуальной задачей является поиск других сцинтилляционных кристаллов, имеющих: малую рад. длину ( $X_0 < 2$  см), короткое время высвечивания сц. света ( $< 100$  нс), высокий световыход ( $> 15000$  фот./МэВ), высокую радстойкость, приемлемую стоимость ( $< 10$  \$/см<sup>3</sup>) при массовом производстве (30 – 40 тонн).
- Хорошим кандидатом на использование в современном электромагнитном калориметре является кристалл  $Gd_3 Al_2 Ga_3 O_{12}$  (GAGG). Он обладает подходящими для этой задачи характеристиками:  $X_0 = 1.61$  см,  $R_M = 2.40$  см,  $\rho = 6.63$  г/см<sup>3</sup>,  $LY = (30 \div 60) \times 10^3$  фот./МэВ,  $\tau = 50 \div 150$  нс, пик сц. света при  $\lambda = 520$  нм, негигроскопичен, обладает высокой радстойкостью. Для калориметра нужны кристаллы GAGG с размерами  $4 \times 4 \times 26$  см<sup>3</sup> в количестве 10-12 тысяч штук.
- Несмотря на то, что стоимость компонент кристалла GAGG невысокая (опр. в основном стоимостью Gd и Ga), цена кристалла у различных производителей является пока довольно высокой. Также не выращиваются були GAGG с длиной  $> 20$  см. Для развития сцинтилляционной калориметрии актуальной задачей является оптимизация выращивания больших кристаллов GAGG, снижение стоимости и освоение возможности массового производства этих кристаллов.
- В данной работе измерены характеристики кристаллика GAGG(Ce) с размерами  $17 \times 17 \times 20$  мм<sup>3</sup> производства АО “Фомос-Материалы”.

# Стенд, схема измерения



- Кристаллик, обёрнутый пористым тефлоном, открытой гранью  $17 \times 17 \text{ мм}^2$  устанавливался (с оптической смазкой BC-630 или без неё) на фотокатод ФЭУ (Hamamatsu R1847S) в светоизолированном коробе. Он облучался гамма-квантами с энергией  $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$  от источника  $\text{Cs}^{137}$ .
- Сигнал с ФЭУ обрабатывался оцифровщиком CAEN V1730SB, по порогу записывалась амплитудная осциллограмма сигнала с ФЭУ с временным шагом 2 нс.
- При обработке данных проводилось интегрирование сигнала от его начала в течение 400 нс. (имитация ЗЦП с воротами 400 нс). В качестве амплитуды сигнала с ФЭУ далее рассматривается именно этот интеграл. Он измеряется в единицах (i.u.):  $1 \text{ i.u.} = 0.12 \text{ мВ} \times 2 \text{ нс}$

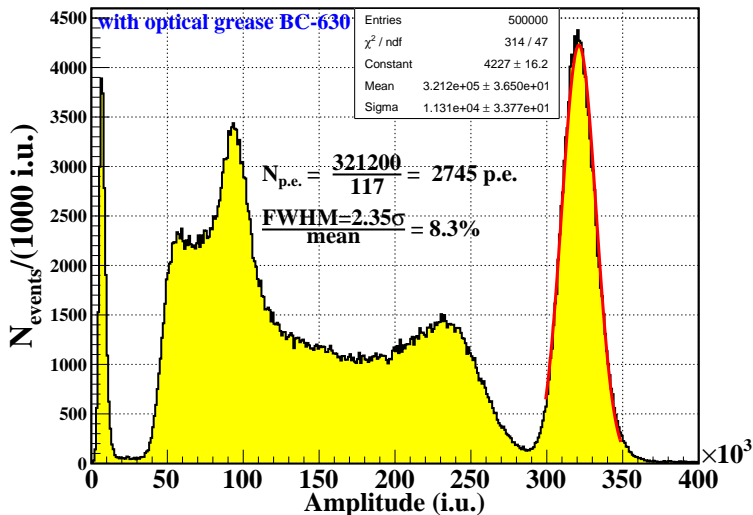
# Калибровка спектрометрического тракта в ф.э.



- Для калибровки спектрометрического тракта в фотоэлектронах (ф.э.) фотокатод ФЭУ освещался слабыми вспышками света (свет от светодиода заводился в короб через оптоволокно), такими, что в каждом импульсе света на фотокатод ФЭУ попадало в среднем около 1 фотона.
- События в оцифровке записывались по триггеру от источника питания светодиода.
- Одноэлектронный пик в амплитудном распределении хорошо идентифицируется: 1 ф.э. = 117 i.u.

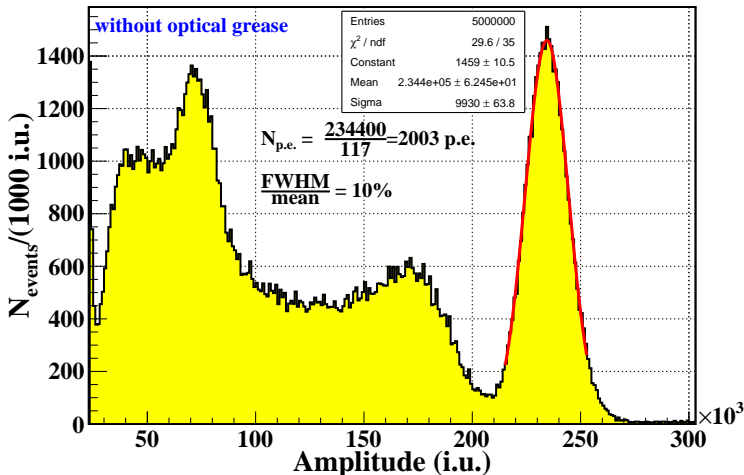
# Спектр энерговыведения с оптической смазкой BC-630

Energy spectrum of  $\gamma$  ( $\text{Cs}^{137}$ ) from the GAGG based counter

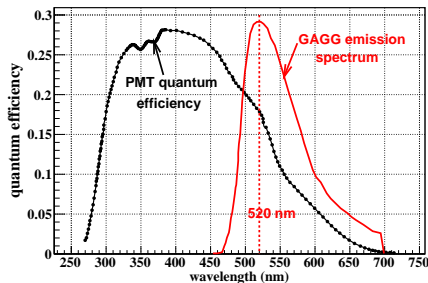
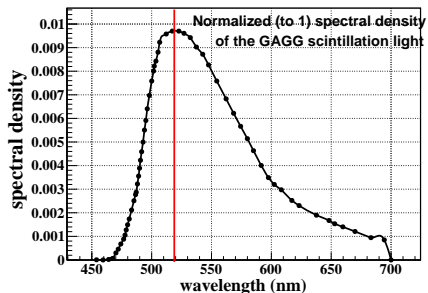


# Спектр энерговыведения без оптической смазки

Energy spectrum of  $\gamma$  ( $\text{Cs}^{137}$ ) from the GAGG based counter



# Квантовая эфф. фотокатода ФЭУ



- Спектр сцинтилляционного света GAGG,  $S(\lambda)$ , довольно широкий, с максимумом при  $\lambda = 520$  nm.
- Квантовая эффективность (кв.э.) ФЭУ вычислялась по формуле  $\kappa = \int K(\lambda)S(\lambda)d\lambda$ , где  $K(\lambda)$  - спектральная кв.э. ФЭУ, и  $\int S(\lambda)d\lambda = 1$ .
- $\kappa = 0.12 \pm 0.02$ .

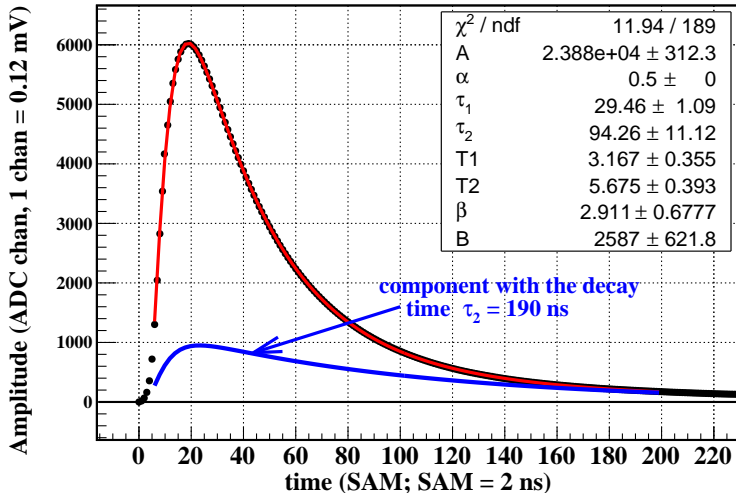
# Определение световыхода кристалла

- Измеренный световыход счётчика  $S$  (в ф.э.) связан со световыходом кристалла  $Y$  (в фотонах/МэВ) следующим образом:  $S = \kappa \eta Y E_\gamma (\text{МэВ})$ , где:
  - $\kappa = 0.12 \pm 0.02$  - квантовая эффективность фотокатода ФЭУ;
  - $\eta$  - коэффициент светосбора в счётчике;
  - $E_\gamma (\text{МэВ}) = 0.662$
- Для оценки  $\eta$  и проводились два измерения - со смазкой и без неё. Для небольшого кристаллика околочувствительной формы используется оценка для коэф. светосбора  $\eta = \frac{q \cdot (1 - \cos \alpha_c)}{q \cdot (1 - \cos \alpha_c) + \mu}$ , где:  $q = S_{\text{ПМТ}} / S_{\text{tot}} = 17 \cdot 17 / (2 \cdot 17 \cdot 17 + 4 \cdot 17 \cdot 20) = 0.15$ ,  $\mu < 1$  - коэффициент поглощения света в счётчике на длине  $d \sim 20$  мм,  $\alpha_c = \arcsin(n_1/n_0)$  - угол полного внутреннего отражения света в кристалле ( $n_0 = 1.9$  - показатель преломления света в кристалле,  $n_1 = 1/1.465$  для воздуха/смазки). Отношение амплитуд фотопиков со смазкой ( $A_1 = 2745$  ф.э.) и без смазки ( $A_0 = 2003$  ф.э.) равно отношению коэф. светосбора  $z = A_1/A_0 = \eta_1/\eta_0$ . Подставив выражения для  $\eta_{1,2}$ , разрешив уравнение отн.  $\mu$ , а потом подставив это выражение в формулу для  $\eta$  получим:  $\eta_1 = (1 - zx)/(1 - x)$ ,  $x = \frac{1 - \cos \alpha_{c0}}{1 - \cos \alpha_{c1}}$ ,  $\alpha_{c0} = \arcsin(\frac{1}{1.9})$ ,  $\alpha_{c1} = \arcsin(\frac{1.465}{1.9})$ ,  $\eta_2 = \eta_1/z$ .
- $\eta_1 = 0.74$  (со смазкой),  $\eta_2 = 0.54$  (без смазки). Нужно отметить, что точность оценки коэф. светосбора невелика ( $\sim 15\%$ ). В результате получим световыход кристалла:  $Y = \frac{2745}{0.12 \cdot 0.74 \cdot 0.662} = (47000 \pm 9000)$  фотонов/МэВ.
- $\mu = 0.019$ , коэффициент  $\mu = \mu_1 + \mu_2$  включает в себя как эффект поглощения света в самом кристалле ( $\mu_1$ ), так и поглощение света (с вероятностью около 1.5%) при взаимодействии с пористым тефлоном, которым обёрнут кристаллик, ( $\mu_2$ ). Для кристалла прямоугольной формы доля света из  $\alpha_{c0}$ -конусов, выходящего из кристалла и отражающегося от тефлона составляет около  $2/3$ , соответственно  $\mu_2 = 0.015 \cdot (2/3) = 0.01$ . Т.о. поглощение в самом кристалле  $\mu_1 = \mu - \mu_2 = 0.019 - 0.01 = 0.009$ , соответственно длина поглощения собственного сц. света  $\Lambda = d/\mu_1 = 20/0.009 \gtrsim 2$  метров.



# Анализ формы импульса (I)

The digitized pulse shape from the GAGG based counter



## Анализ формы импульса (II)

- Записанная форма импульса фитировалась свёрткой суммы двух экспоненциальных распределений (с постоянными времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ), которые моделируют высвечивание в сц. кристалле, и импульсной характеристики спектрометрического тракта, которая моделировалась двумя интегрирующими цепочками с временами  $T_1$  и  $T_2$ . Нужно отметить, что полоса частот тракта (ФЭУ + оцифровщик) велика и составляет  $\sim 250$  МГц, т.е. характерные времена  $T_1$  и  $T_2$  порядка нескольких наносекунд и д.б.  $T_{1,2} \ll \tau_{1,2}$ . Т.е. изучаемый спектр сигнала высвечивания лежит глубоко внутри полосы пропускания, вдали от края полосы при высоких частотах. Это позволяет извлечь  $\tau_1$  и  $\tau_2$  путём фитирования формы импульсов описанной функцией, причём  $T_1$  и  $T_2$  - тоже свободные параметры фита.
- Аппроксимация формы импульса довольно хорошая. Тем не менее априорное незнание  $T_{1,2}$  и извлечение их из фита вносит значительную систематическую погрешность в  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Консервативная оценка систематики заключалась в варьировании  $T_1$  и  $T_2$  на 50%(!!) их оптимальных значений, при этом  $\tau_1$  и  $\tau_2$  изменялись на величины вплоть до 30% от их оптимальных значений. Эти отклонения брались в качестве финальных погрешностей  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .
- $\tau_1 = (60 \pm 20)$  нс (с долей  $\sim 85\%$ ),  $\tau_2 = (190 \pm 60)$  нс (с долей  $\sim 15\%$ ).

# Заключение

- Световойход кристалла:  $Y = (47000 \pm 9000)$  фотонов/МэВ
- Длина поглощения собственного сц. света:  $\Lambda \gtrsim 2$  метров
- Две компоненты высвечивания с временами:  
 $\tau_1 = (60 \pm 20)$  нс (с долей  $\sim 85\%$ ),  $\tau_2 = (190 \pm 60)$  нс (с долей  $\sim 15\%$ ).