

# 1 Электромагнитный калориметр

Важным элементом детектора для экспериментов на Супер  $\sigma\tau$ -фабрике является электромагнитный калориметр. Он предназначен для решения следующих задач:

- регистрация и измерение энергии  $\gamma$ -квантов в широком диапазоне от 1 МэВ до 2 ГэВ;
- определение координат фотонов;
- разделение электронов и адронов;
- формирование сигнала для нейтрального триггера детектора.

Так как основная доля фотонов, возникающих в распадах адронов в этих экспериментах, имеет энергию несколько сот МэВ, важной характеристикой калориметра является энергетическое разрешение в этой области энергии.

Одной из важных задач для Супер  $\sigma\tau$ -фабрики является поиск распада  $\tau \rightarrow \mu\gamma$ , в котором не сохраняется число лептонных ароматов. Этот распад должен давать узкий пик в спектре инвариантных масс  $\mu\gamma$ , ширина которого определяется энергетическим разрешением калориметра. Соответственно, чувствительность к этому распаду определяется энергетическим и пространственным разрешением калориметра.

В настоящее время лучшее энергетическое разрешение для фотонов с энергией до 1 ГэВ получено с калориметрами на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) [1, 2],  $\sigma_E/E \approx 1.8\%$  при энергии 1 ГэВ и около 3% при энергии фотона 100 МэВ. Пространственное разрешение этих калориметров составляет около  $6 \text{ мм}/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$ . Следует также отметить, что в ИЯФ накоплен большой опыт работ по методике калориметров на основе сцинтилляционных щелочно-галогидных кристаллов.

Достоинством сцинтилляционных калориметров является их высокая стабильность и небольшие эксплуатационные расходы. Кристаллы CsI(Tl) имеют высокий световыход (до 50000 фотонов/МэВ) и спектр высвечивания с максимумом около 550 нм, хорошо согласующийся с областью чувствительности кремниевых фотоприемников. Примером такого калориметра является калориметр детектора Belle, который включает 8736 счетчиков на основе кристаллов CsI(Tl) длиной 30 см ( $16.1 X_0$ ) со считыванием света двумя полупроводниковыми фотодиодами размером  $20 \times 10 \text{ мм}^2$ . Сигналы с фотодиодов поступают на входы зарядочувствительных предусилителей, расположенных на счетчике. Выходные сигналы предусилителей передаются на платы усилителей-формирователей, расположенные вблизи детектора. В них поступающий импульс формируется, проходя каскад дифференцирования и 4 каскада интегрирования с временем формирования  $\tau = 1 \mu\text{s}$ . Оцифровка сигналов выполняется с помощью модулей, расположенных в крейтах типа FUSTBUS. Полная величина сигнала на входе предусилителя составляет приблизительно 5000 фотоэлектронов на 1 МэВ выделенной в кристалле энергии при неоднородности коэффициента светосбора лучше 10%. Уровень шумов электронного тракта канала калориметра – около 1000 электронов, что соответствует 200 кэВ.

Энергетическое разрешение калориметра, измеренное с прототипом на тестовом пучке меченых фотонов [3], представлено на Рис. 1.

Десятилетний опыт эксплуатации калориметров на основе кристаллов CsI(Tl) в экспериментах на В-фабриках показал их высокую надежность и стабильность характеристик. Радиационная стойкость кристаллов достаточно высока для работы на  $e^+e^-$ -коллайдерах. Так например, на детекторе BELLE общая поглощенная доза для кристаллов, расположенных

5 x 5 matrix with 0.5 MeV threshold

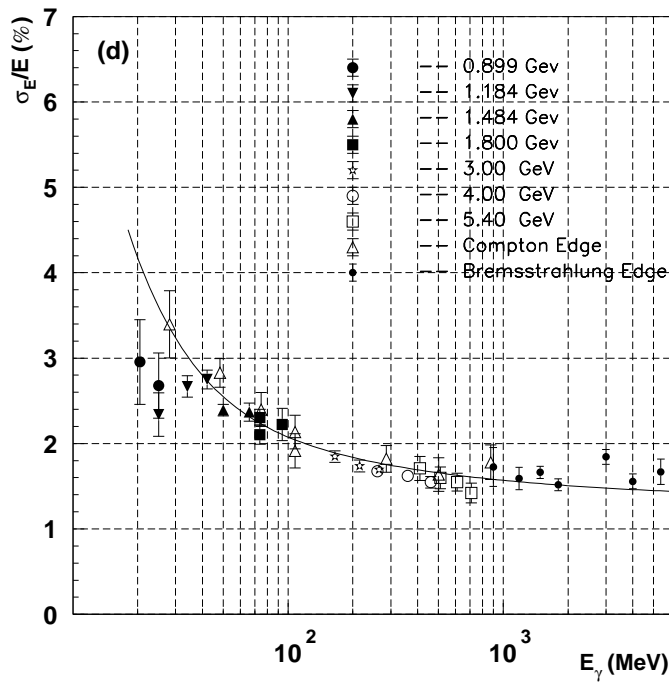


Рис. 1: Энергетическое разрешение калориметра детектора Belle, измеренное с прототипом калориметра (5×5) счетчиков [3].

ближе всего к вакуумной камере, составила около 500 рад за 10 лет работы. На Супер  $ст$ -фабрике при светимости  $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  поглощенная доза может составить порядка 1 крад за 5 лет экспериментов, при этом, согласно измерениям, выполненным в [4], кристаллы CsI(Tl) теряют лишь около 20% световыхода.

Однако время высвечивания этих кристаллов составляет около 1 мкс, что при высоких фоновых нагрузках (порядка 100 кГц и более на кристалл) приводит к высокой вероятности наложения фонового и полезного импульсов. Естественным решением этой проблемы является использование более быстрых кристаллов. В качестве такого сцинтиллятора, может быть использован чистый CsI, материал достаточно хорошо известный в экспериментах по физике частиц. Время высвечивания быстрой компоненты сцинтилляций этих кристаллов составляет около 30 нс. Именно этот материал, чистый CsI, предполагается использовать в торцевых калориметрах детектора Belle-2 [5], разработка которого активно ведется в последние годы группой физиков ИЯФ СО РАН [6]. Следует однако отметить, что световыход этих кристаллов на порядок ниже чем кристаллов CsI(Tl), что приводит к необходимости использования фотоприемников с усилением, работающих в магнитном поле. Максимум спектра высвечивания чистого CsI находится на длине волны 310 нм, что накладывает дополнительные требования на фотоприемник. Помимо быстрой компоненты, имеется и медленная компонента сцинтилляций чистого CsI с временем высвечивания более 1 мкс. При использовании этих кристаллов в экспериментах по физике высоких энергий обычно накладывалось требование, чтобы доля света в быстрой компоненте составляла не менее 70-80%.

Учитывая большой опыт работы с чистым CsI, накопленный группой ИЯФ, вариант калориметра на основе таких кристаллов принят в качестве базового для данного проекта и ему посвящено дальнейшее описание. Технология роста таких кристаллов имеется у нескольких крупных производителей, таких как Amcryst (Украина), Saint Goban (США), НРК(Япония-

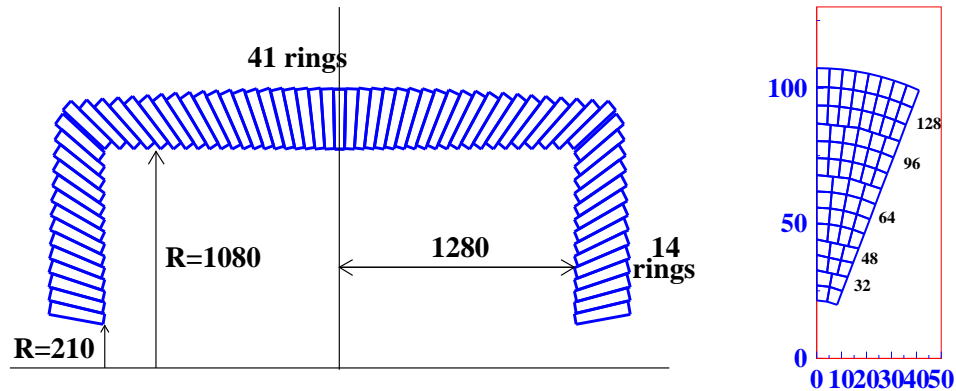
Китай), и, таким образом, имеется возможность в течении 2-3 лет организовать производство необходимого числа кристаллов.

Следует отметить, что в последние годы активно разрабатываются новые кристаллические сцинтилляторы с высоким световыходом и коротким временем высвечивания [7], такие как ортосиликат лютеция (LSO), алюминат лютеция (LuAP), бромид лантана (LaBr<sub>3</sub>), активированные церием, и другие. Однако, несмотря на высокую перспективность этих кристаллов, стоимость их в настоящее время весьма высока (в 5–10 раз выше, чем CsI(Tl)), что делает проблематичным их использование в больших объемах. В то же время, активные работы по изучению возможности использования новых кристаллов в экспериментах по физике высоких энергий и тесное взаимодействие с производителями таких сцинтилляторов может привести к усовершенствованию и удешевлению технологии их выращивания, как это произошло в свое время с кристаллами CsI и NaI.

## 1.1 Элементы калориметра

Так как калориметр для Супер  $\sigma\tau$ -фабрики должен иметь высокое энергетическое разрешение для фотонов ( $\sim 1.5\%$  при  $E_\gamma=1$  ГэВ), в активном веществе калориметра должно выделяться не менее 95% энергии фотона. Для этого толщина калориметра должна составлять 16-18 радиационных длин или 30–34 см. Поперечные размеры элемента калориметра определяются поперечными размерами ливня и выбираются обычно для CsI в пределах от 4 до 7 см. Меньшие поперечные размеры кристаллов позволяют улучшить пространственное разрешение, но приводят к увеличению числа каналов электроники и большему суммарному пространству зазоров между кристаллами.

Вариант компоновки калориметра показан на Рис. 2. Калориметр состоит из цилиндри-



*Рис. 2: Расположение счетчиков в калориметре: Z-проекция (слева), сектор торцевого калориметра (справа).*

ческой части и двух торцевых калориметров. Цилиндрическая часть состоит из 128 секторов в азимутальной проекции, каждый из которых включает 41 кристалл 21-го типо-размера. Общее число счетчиков в такой компоновке – 5248, а полная масса кристаллов составляет 26 или 31 т в случае, когда длина кристаллов 30 или 34 см, соответственно.

Торцевой калориметр состоит из 16 секторов, каждый из которых включает 68 кристаллов, расположенных в 14 дуговых слоях, как показано на Рис. 2. Число кристаллов в каждом

слое приведено в таблице 1. Полный вес CsI в каждом торцевом калориметре составляет 5(6) т в случае, когда длина кристаллов 30(34) см.

*Таблица 1: Распределение кристаллов в торцевом калориметре*

номер слоя	число кр-в в секторе	число кр-в в калориметре	число типоразмеров
1	2	32	1
2	2	32	2
3	3	48	3
4	3	48	3
5	4	64	4
6	4	64	1
7	4	64	1
8	4	64	2
9	6	96	3
10	6	96	1
11	6	96	3
12	8	128	4
13	8	128	1
14	8	128	1
всего	68	1088	30

Элемент калориметра представляет собой кристалл, покрытый диффузным отражателем – слоем пористого тефлона толщиной 200 мкм и внешней оболочкой из алюминизированного полиэтилена толщиной 25+25 мкм. Такая упаковка обеспечивает хорошую свето- и электро-изоляцию счетчиков друг от друга и позволяет получить высокий коэффициент светосбора и хорошую однородность светосбора счетчиков.

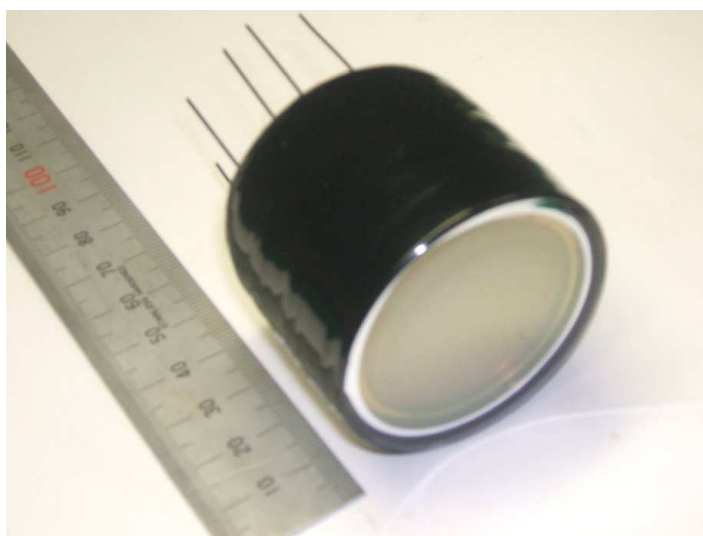
Световыход кристаллов CsI имеет заметную зависимость от температуры: -1.5%/градус. Для получения разрешения на процентном уровне потребуются обеспечение измерение карты температуры внутри калориметра с точностью 0.1 градусов и обеспечения термостабилизации внутри объема калориметра.

## 1.2 Фотоприемники

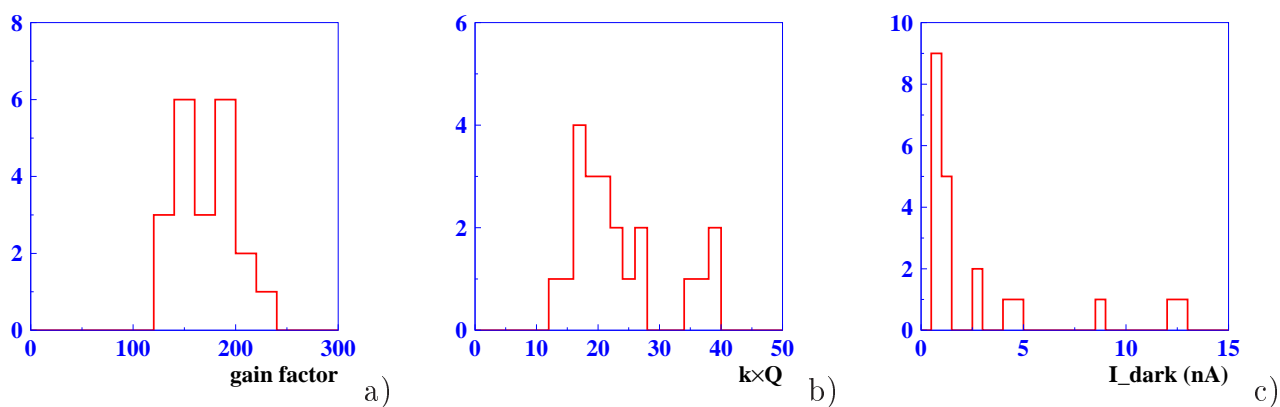
В качестве фотоприемников, обеспечивающих работу в магнитном поле, могут быть использованы вакуумные фотопентоды (ВФП) диаметром 50 мм, разработанные Hamamatsu Photonics. Фотография такого фотоприемника показана на Рис. 3. Такие фотоприемники имеют малую выходную емкость (10 пФ), коэффициент усиления без магнитного поля 150-250, квантовую чувствительность в области 310 нм 15-25 %, как показано на Рис. 4.

Зависимость коэффициента усиления фотопентодов от приложенного напряжения близка к линейной, как показано на Рис. 5 а).

Зависимость коэффициента усиления от величины магнитного поля, направленного вдоль оси ВФП, показана на Рис. 5 б). Как видно из рисунка, в магнитном поле 1.5 Т усиление ВФП падает приблизительно в 3.5 раза. Как видно из рисунка 5 с), фотоприемник остается работоспособным при углах между направлением магнитного поля и осью фотоприемника до 45°, при этом при углах 20-30° сигнал с фотоприемника увеличивается приблизительно

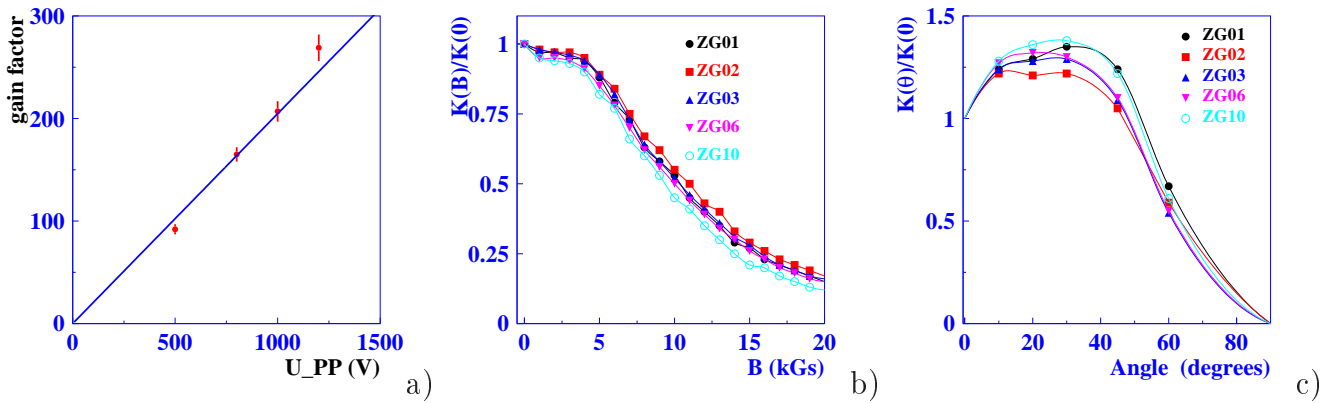


*Рис. 3: Вакуумный фотопентод типа R2185UV-MOD2 диаметром 2", производства (Hamamatsu Photonics).*



*Рис. 4: а) Коэффициент усиления; б) произведение квантовой чувствительности (%) на коэффициент усиления; в) темновой ток фотопентодов без магнитного поля.  $U=1000$  В.*

на 20 %. Счетчик, собранный на основе кристаллов чистого CsI и фотопентода позволяет



*Рис. 5: а) Зависимость коэффициента усиления фотопентодов от приложенного напряжения. б) Коэффициент усиления в зависимости от магнитного поля, параллельного оси фотопентода. в) Сигнал с фотопентода в зависимости от угла между направлением магнитного поля и осью фотоприемника.  $B=1.5$  Т.  $U=1000$  В.*

получить энергетический эквивалент шумов около 50 кэВ без магнитного поля, что согласно нашим измерениям, в магнитном поле 1.5 Т даст 170 кэВ.

Калориметр будет работать в условиях высокой радиационной загрузки. Поэтому очень важным является сохранение работоспособности фотоприемников в течение всего эксперимента, который будет длиться около 10 лет. Наиболее существенными характеристиками являются долговременная стабильность фотоприемников и зависимость квантовой чувствительности и коэффициента усиления от полного заряда прошедшего через прибор. Для изучения стабильности было собрано 2 счетчика на основе кристаллов чистого CsI и фотопентодов. В течение 3 лет с этими счетчиками периодически измерялся спектр энерговыделения космических частиц. С точностью лучше 3 % не наблюдалось изменения сигналов. Кроме того на специальном стенде изучалась стабильность квантовой эффективности и коэффициента усиления фотопентодов. Для этого в течение продолжительного времени измерялась величина произведения квантовой эффективности на коэффициент усиления ВФП при засветке фотокатода прибора с помощью светодиода. Измерение показали небольшой (около 10 %) рост этой величины по мере накопления анодного заряда, который прекращается после прохождения полного заряда 15 Кл. В дальнейшем не наблюдалось видимых изменений чувствительности. Измерения проводились до заряда 140 Кл, что в 5 раз больше величины, ожидаемой на  $c - \tau$ -фабрике.

Недостатком использования вакуумных фотоприемников является необходимость расположения фотоприемников под небольшим ( $< 45^\circ$ ) углом к магнитному полю. Возможное решение этой проблемы в цилиндрической части калориметра состоит в использовании призматических световодов, что приведет к некоторому падению световыходов и значительному усложнению конструкции счетчика и калориметра.

Другой возможный фотоприемник для рассматриваемого калориметра – это полупроводниковый лавинный фотодиод (ЛФД). Коэффициент усиления таких диодов составляет 50-100 и не зависит от величины магнитного поля. Однако емкость ЛФД значительно больше чем у ВФП. Для приборов площадью  $5 \times 5$  мм она составляет около 80 пФ, что приводит к значительно большим электронным шумам. Квантовая чувствительность существующих ЛФД в области 310 нм составляет около 15 %, но в настоящее время ведутся разработки

ЛФД чувствительных в ультрафиолетовой области. Для оценки параметров калориметра с использованием ЛФД в качестве фотоприемников необходима значительная работа по моделированию и измерению характеристик счетчиков с использованием прототипов.

### 1.3 Электроника калориметра

Схема электронного тракта калориметра показана на Рис. 6 [8]. Сигнал с фотоприемника

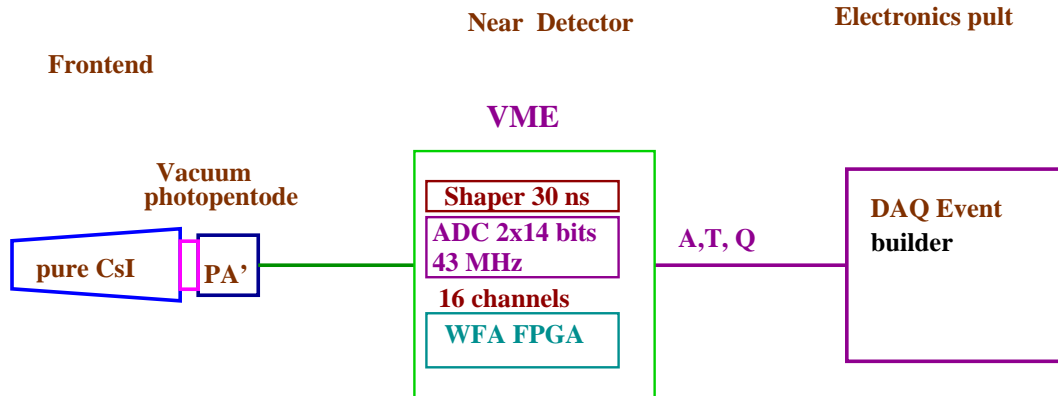


Рис. 6: Схема электронного тракта калориметра.

поступает на зарядо-чувствительный предусилитель, на выходе которого преобразуется в парафазный сигнал и поступает на плату формирователя-оцифровщика-анализатора (ФОА), находящуюся в крейте, расположенном вблизи детектора. Каждый из 16 каналов, размещенных на плате, содержит формирователь, включающий каскад дифференцирования и 4 каскада интегрирования со временем формирования 30 нс каждый, а также оцифровщик – "Flash ADC". Оцифровка проводится непрерывно с частотой 40 МГц с использованием 14-ти разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Для увеличения динамического диапазона оцифровка ведется на двух АЦП: с каждого канала оцифровывается прямой и в 8 раз ослабленный сигналы. Такая схема позволяет получить цену канала 50 кэВ при максимально регистрируемом энерговыделении 2 ГэВ.

По приходу сигнала триггера данные с 16-ти каналов АЦП считываются в буфер программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Для каждого канала записывается 31 измерение по времени. В ПЛИС производится отбраковка сигналов с амплитудой ниже порога обработки и анализ формы импульса с помощью аппроксимации измеренных значений стандартной кривой со свободными параметрами. Подгонка выполняется в 3 итерации в целочисленной арифметике в соответствии с алгоритмом, представленным на Рис. 7. На последней итерации определяется качество подгонки.

В результате подгонки определяются уровень подложки, амплитуда импульса, время его появления и качество подгонки. Вместе с номером соответствующего канала калориметра эти данные упаковываются и передаются в систему сбора данных в том случае, если амплитуда сигнала превышает определенный порог. Такая система позволяет проводить обработку событий при частоте первичного триггера 30 кГц в случае 30 %-й загрузке каналов.

### 1.4 Радиационная стойкость кристаллов

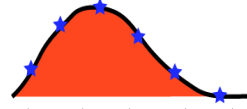
Радиационная стойкость сцинтиллятора является важной характеристикой с точки зрения работоспособности калориметра в течение всего времени экспериментов. Поэтому было про-

## Algorithm details

$$\chi^2(A, p, t_0) = \sum_{i,j} (y_i - Af(t_i - t_0) - p) S_{ij}^{-1} (y_j - Af(t_j - t_0) - p) \rightarrow \min$$

$$S_{ij} = \sqrt{(y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}$$

$f(t)$  – counter response



$$Af(t_i - t_1 - \Delta t) = Af(t_i - t_1) - A\Delta t f'(t_i - t_1) = Af(t_i - t_1) + Bf'(t_i - t_1)$$

where  $t_1$  – initial time (trigger time)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i,j} f_i S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 \\ \sum_{i,j} f'_i S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 \\ \sum_{i,j} S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} A = \sum_i \alpha_i y_i \\ B = \sum_i \beta_i y_i \Rightarrow \Delta t = -B/A \\ p = \sum_i \gamma_i y_i \end{array}$$

*Рис. 7: Алгоритм восстановления амплитуды и времени прихода сигналов*

ведено изучение радиационной стойкости полноразмерных кристаллов чистого CsI [9]. Для облучения образцов использовался широкий пучок тормозных  $\gamma$ -квантов ускорителя электронов ЭЛВ-6 в ИЯФ СО РАН с максимальной энергией 1.4 МэВ. Еще одной особенностью данной работы является использование сцинтилляционного детектора поглощенной дозы, изготовленного из того же материала, CsI, что исключает необходимость пересчета при определении дозы и ее зависимости от реального спектра излучения.

Относительная величина световыхода определялась с использованием гамма-квантов коллимированного радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  с возможностью сканирования вдоль оси кристалла. Амплитудный спектр измерялся с помощью ФЭУ. Стабильность схемы контролировалась по амплитуде сигнала от эталонного кристалла, который не подвергался облучениям.

Как было отмечено выше, световыход кристаллов существенно зависит от температуры. Чтобы обеспечить точность и повторяемость измерений в пределах 1-2%, вводилась поправка для величины световыхода на температуру кристалла в соответствии с формулой:

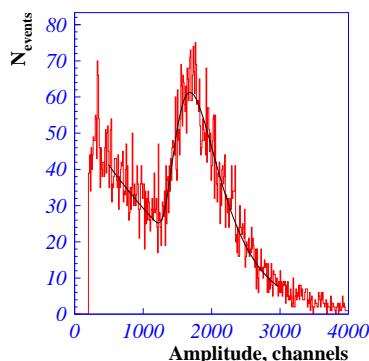
$$L = L_m(1 - 0.013(t - t_0)), \quad (1)$$

где  $t$  – температура кристалла,  $t_0$  – эталонная температура, выбранная равной 17°C,  $L_m$  – измеренный световыход. После введения температурной поправки точность измерений составляет 1.5-2%.

В дополнение к четырем испытуемым кристаллам, облучению подвергался и счетчик, собранный на основе кристалла чистого CsI и вакуумного фототетрода. Для определения световыхода счетчика использовался спектр энерговыделения космических частиц (Рис. 8) при горизонтальном расположении счетчика. В спектре виден пик, соответствующий прохождению частицы с пересечением верхней и нижней граней счетчика, и спадающая функция, соответствующая пересечению частицей одной из боковых граней. Спектр вблизи пика аппроксимировался суммой логарифмического-нормального распределения и подложки, представленной полиномом третьей степени. Световыход определялся по положению пика.

Световыход счетчика определялся с применением температурной поправки, вычисляемой также по формуле 1. Всего было собрано два таких счетчика, один из которых не подвергался облучениям и служил эталонным. Повторяемость измерений с ним оказалась лучше 1.5%.





*Рис. 8: Спектр энерговыделений космических частиц, в кристалле.*

Мощность дозы облучения задавалась током ускорителя и полная доза – временем облучения. Мощность дозы измерялась специальным датчиком дозы, собранным на основе кристалла CsI(Tl), чтобы минимизировать пересчет при определении дозы. Датчик представлял собой кристалл CsI(Tl)  $1 \times 2 \times 2^3$ , на одной из граней которого располагался полупроводниковый фотодиод в оптическом контакте с торцевой гранью кристалла. Ток, возникающий в фотодиоде, пропорционален частоте и интенсивности сцинтилляций, т. е. энерговыделению в кристалле, которое в свою очередь пропорционально мощности дозы.

Была проведена серия облучений дозами от 250 до 30000 рад. До и после каждого облучения проводились ежедневные измерения световыходов кристаллов и счетчика. Полученные зависимости световыходов исследованных образцов от времени представлены на Рис. 9(a,b,c,d). На графиках видно существенное уменьшение световыхода непосредственно после облучения и его частичное восстановление в течение нескольких дней. Установившиеся значения световыходов использовались для построения зависимостей световыходов кристаллов от дозы облучения (Рис. 9(e,f)).

Как видно из графиков, при дозе облучения 15 крад уменьшение световыхода изученных образцов составило менее 15%. Радиационная стойкость одного из кристаллов оказалась недостаточно высокой. Наличие кристаллов со низкой радиационной стойкостью требует разработки процедуры для выявления таких кристаллов при входном контроле. Изменений в соотношении амплитуд короткой и длинной компонент обнаружено не было в пределах точности измерений порядка 3%

## 1.5 Измерения с прототипом торцевого калориметра

Для измерения характеристик калориметра был изготовлен прототип из 20 счетчиков на основе кристаллов CsI и вакуумных фототетродов. Кристаллы имели размеры блоков торцевого калориметра детектора Belle и были изготовлены компанией АМКРИС. Световыход кристаллов соответствовал 150-200 фотоэлектронам с фотокатода ВФП на 1 МэВ, доля света в быстрой компоненте составляла не менее 70%. Каждый счетчик был упакован как это было описано в разделе 1.1. К большому торцу кристалла присоединялся фототетрод. Для обеспечения оптического контакта использовалась оптическая смазка. На торце кристалла также размещались делитель напряжения и предусилитель. Схема и внешний вид счетчика показаны на Рис. 10

Для считывания сигнала был разработан электронный модуль в стандарте САМАС. Схема модуля показана на Рис. 11. Концептуально модуль соответствует тракту электроники, описанному в разделе 1.3. Калибровка изготовленных счетчиков проводилась с помощью

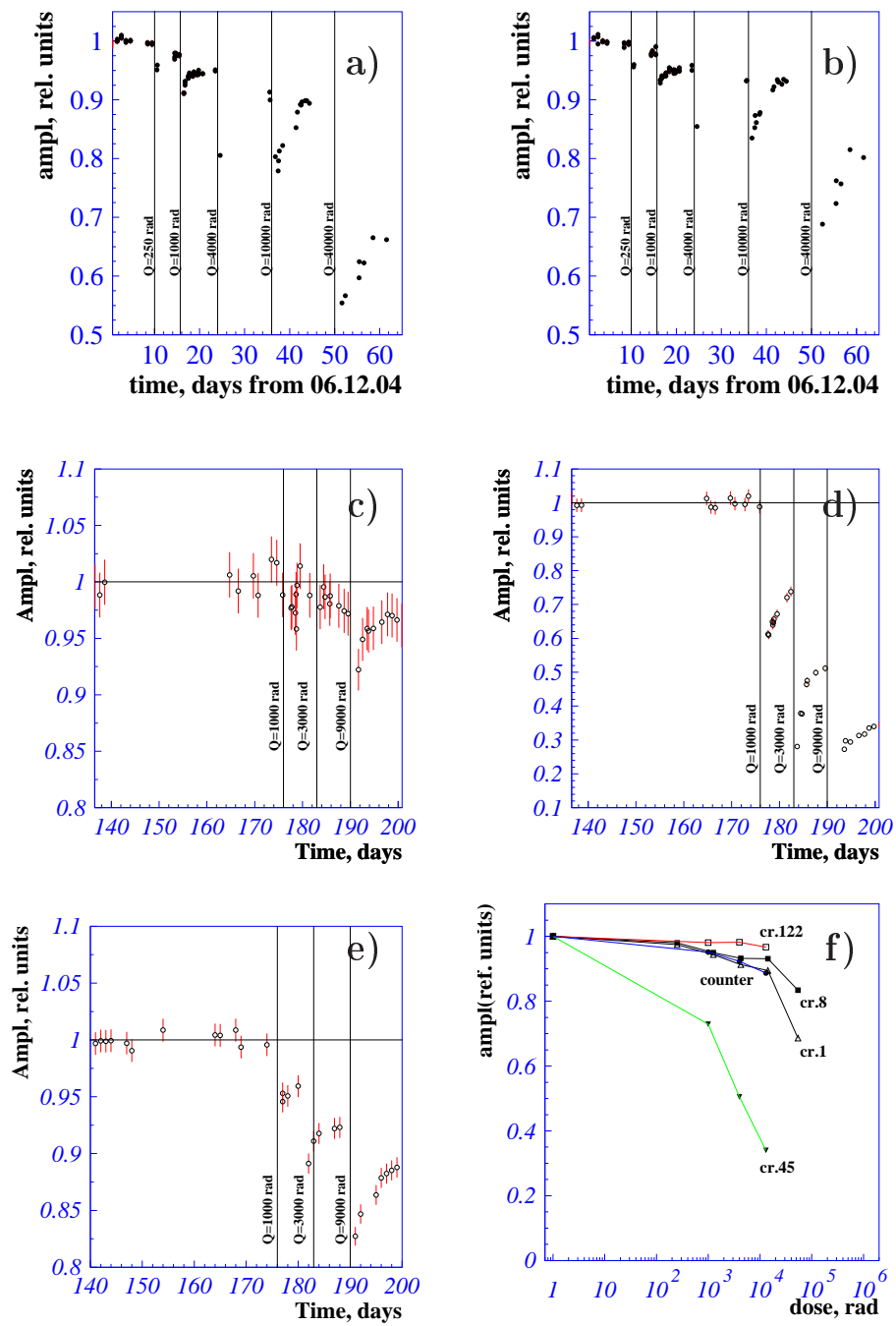


Рис. 9: Временные зависимости световыхода для различных кристаллов (a),(b), (c),(d) и собранного счетчика(e). Зависимости световыхода от поглощенной дозы(f).

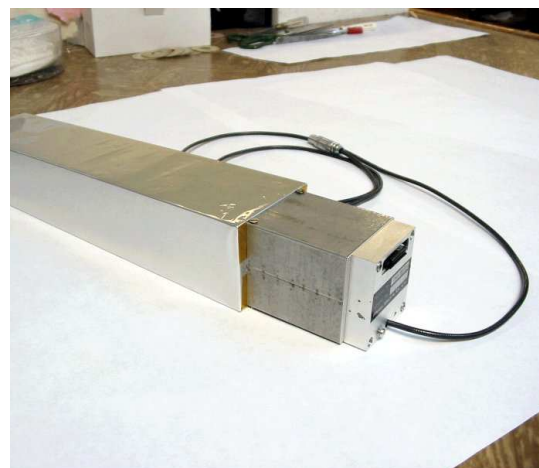
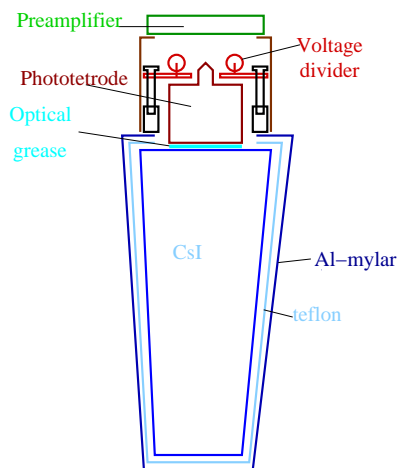


Рис. 10: Схема и внешний вид счетчика.

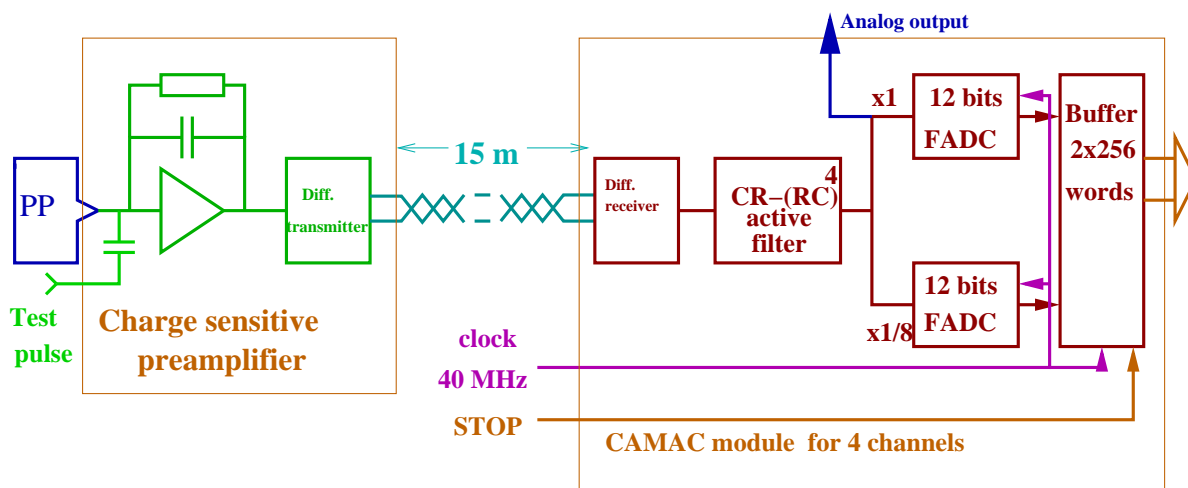


Рис. 11: Схема электронного тракта прототипа.

космических частиц, а энергетический эквивалент шумов, определенный по ширине распределения пьедестала, составил 43 кэВ.

Было проведено сравнение шумов наложения для собранных счѣтчиков и счѣтчиков калориметра детектора Belle на основе кристаллов CsI(Tl). Шум наложения имитировался  $\gamma$ -квантами от радиоактивного источника  $^{60}\text{Co}$  (1.17 МэВ и 1.33 МэВ). Частота фотонов, попадающих в счѣтчики, варьировалась изменением расстояния от радиоактивного источника до измеряемых счѣтчиков. На Рис. 12 показаны схема измерения и результаты измерения

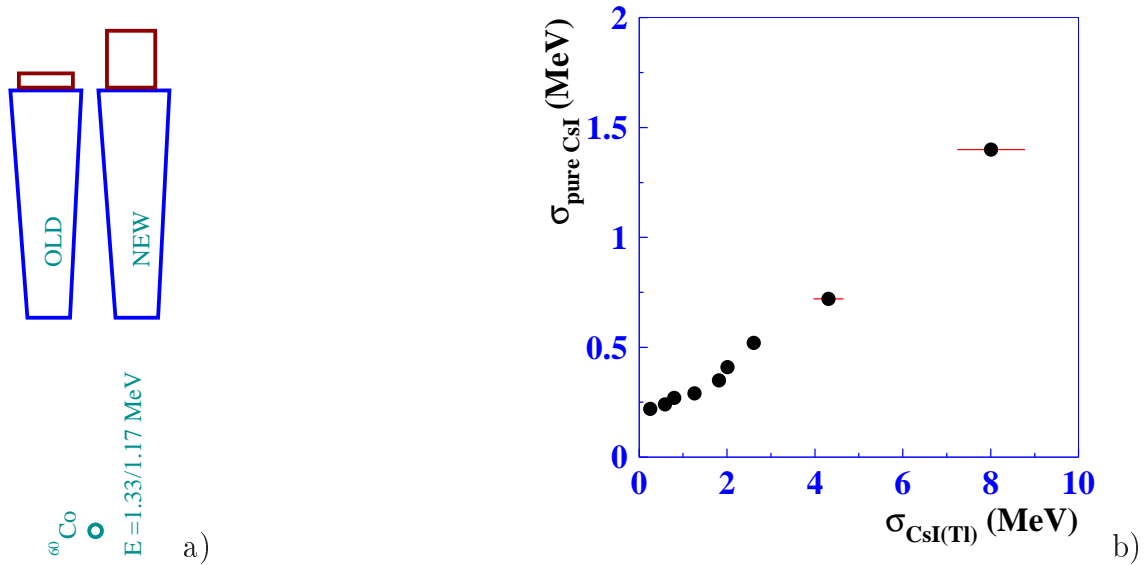


Рис. 12: Схема измерения а) и результаты измерения шумов наложения для счѣтчиков на основе чистого и активированного таллием кристаллов CsI б).

шумов наложения для счѣтчиков на основе чистого и активированного таллием кристаллов CsI. Результаты согласуются с оценкой, полученной из соотношения длительностей сцинтилляционных вспышек  $\sqrt{\tau_{Tl}/\tau_{pure}} = \sqrt{1000 \text{ ns}/30 \text{ ns}} \approx 5.5$ .

20 счѣтчиков были собраны в матрицу 4x5 имитирующую часть торцевого калориметра как показано на Рис. 13.

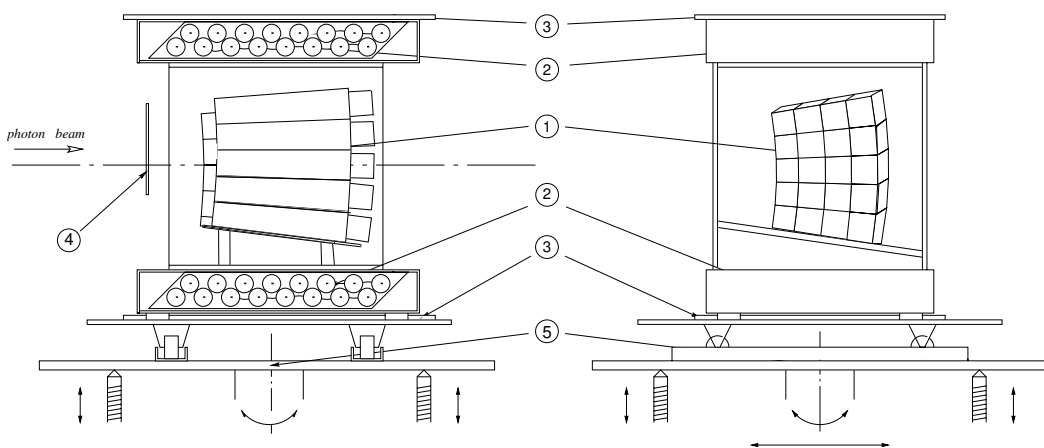


Рис. 13: Схема организации счѣтчиков прототипа

Прототип облучался на фотонном пучке установки РОКК-1М на накопительном кольце ВЭПП-4М в Институте ядерной физике в Новосибирске. Схема установки РОКК-1М показана на Рис. 14. Фотоны ультрафиолетового лазера с энергией  $\omega_0 = 2.34 \text{ eV}$ , рассеиваясь

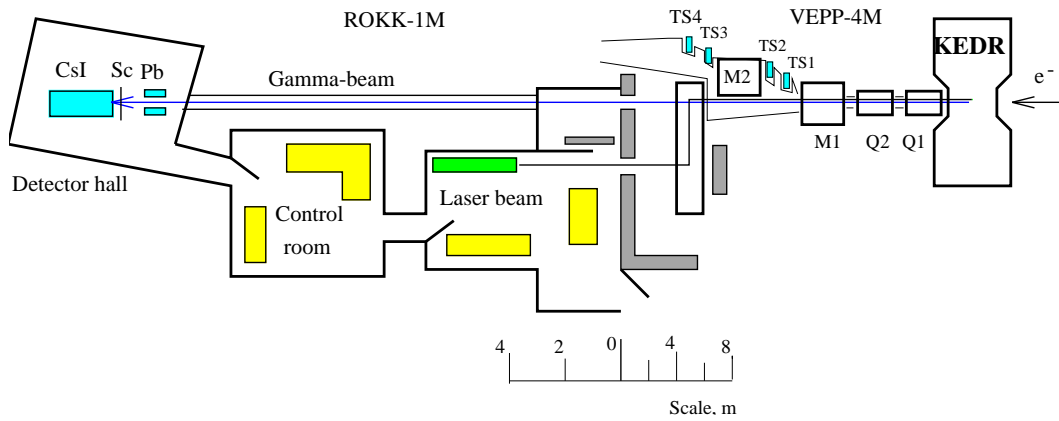


Рис. 14: Схема установки РОКК-М.

на пучке электронов накопителя ВЭПП-4М, создают пучок обратно-рассеянных фотонов. Энергия фотонов лежит в пределах от  $\omega_0$  до максимальной энергии  $\omega_{max} = \frac{4(E_{beam}/m_e)^2 \omega_0}{(1 + 4E_{beam}\omega_0/m_e^2)}$  с характерным спектром комптоновского рассеяния, показанным на Рис. 15(a). Такой спектр имеет характерный резкий правый край спектра при максимальной энергии. Для энергии электронов  $E_{beam} = 1.5 \sim 2.2 \text{ GeV}$  максимум спектра составляет  $\omega_{max} = 70 \sim 160 \text{ MeV}$ . Размытие реального спектра (см. Рис. 15(b)) энергии определяется энергетическим разрешением. Подгоняя измеренное распределение энергии сверткой комптоновского спектра и логарифмически-нормальной функцией, мы получаем величину энергетического разрешения. Полученное энергетическое разрешение показано на Рис. 16(a). Экспериментальные данные согласуются с результатами моделирования и данными полученными с прототипом калориметра Belle [3].

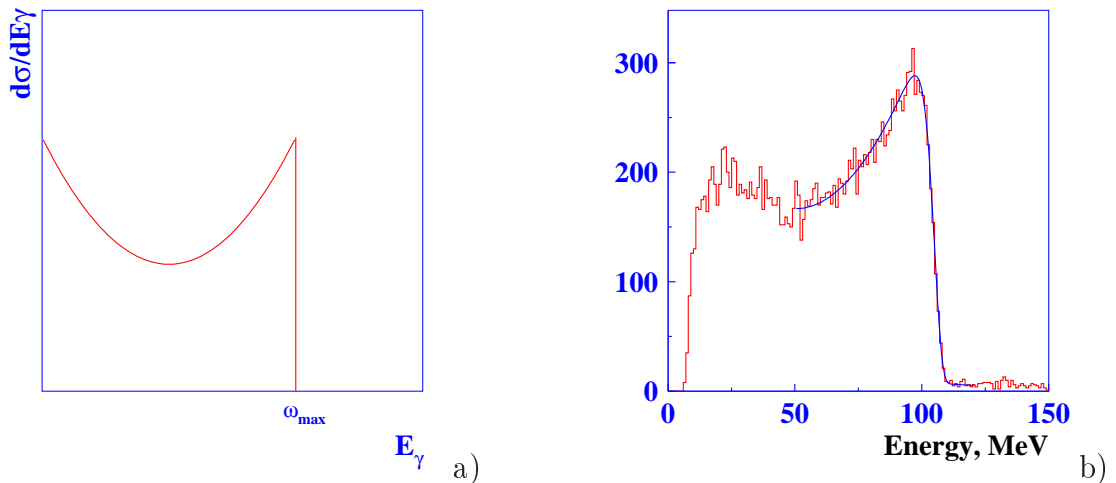


Рис. 15: а) Спектр фотонов обратного комптоновского рассеяния. б) Спектр энергии фотонов, измеренный с прототипом.

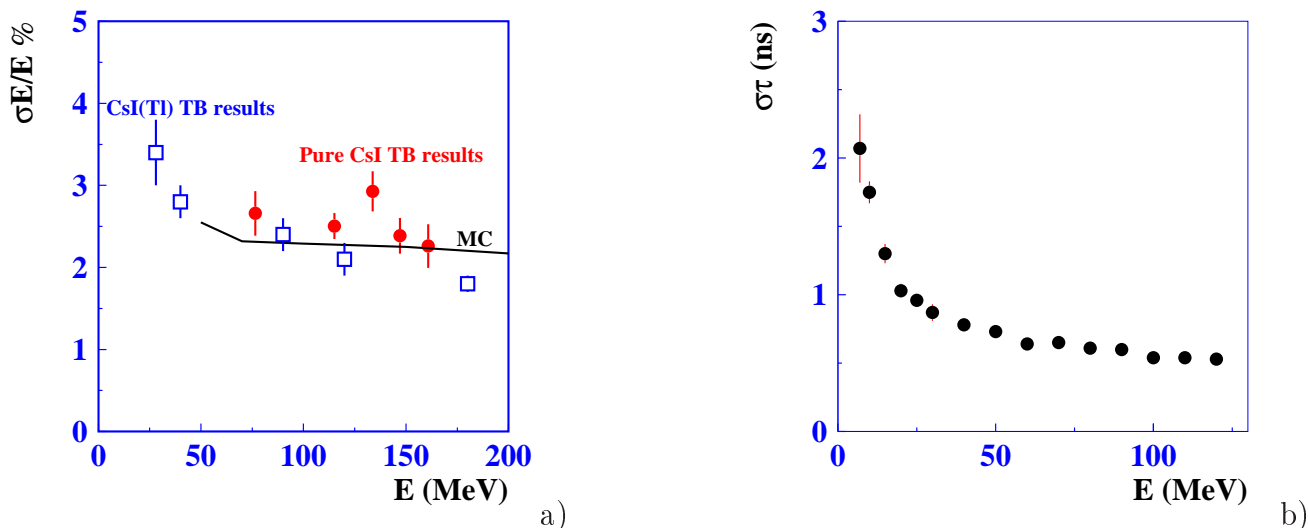


Рис. 16: а) Энергетическое разрешение, полученное с прототипом детектора на основе чистого CsI. б) Временное разрешение полученное с прототипом.

Временное разрешение калориметра в зависимости от энерговыделения в счетчике показано на Рис. 16(b). При энерговыделении более 20 МэВ полученное временное разрешение лучше 1 нс. В магнитном поле ожидаемый сигнал в 3.5 раза меньше и такое же разрешение будет достигаться при энергиях в 3.5 раза больше. Использование временной информации позволит существенно подавлять события пучкового фона.

## 1.6 Заключение

Калориметр на основе неактивированного CsI и вакуумных фотопентодов удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к электромагнитному калориметру детектора для экспериментов на Супер  $\sigma\tau$ -фабрике. Хотя стоимость рассмотренной системы достаточно высока, в настоящий момент нет другого, более дешевого и хорошо проработанного варианта, который гарантировал бы достижение необходимых параметров. Возможным компромиссом в варианте с CsI кристаллами является использование кристаллов неактивированного CsI в торцевых частях калориметра, где фоновая нагрузка высока и кристаллов CsI(Tl) в цилиндрической части, где фон на порядок ниже. При этом можно было бы увеличить длину кристаллов в цилиндрической части калориметра, что улучшило бы энергетическое разрешение в области энергии фотона 1-2 ГэВ. Разумеется, методические работы по другим вариантам калориметра (другие кристаллы и фотоприемники) также крайне желательны.

## 2 Список литературы

- [1] A. Abashian *et al.* Nucl. Instr. Meth. A **479** 117 (2002).
- [2] B. Aubert *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **479** 1 (2002).
- [3] H. Ikeda *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.* **A 441** (2000) 401.
- [4] D.M. Beylin *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.* **A541** (2005) 501.
- [5] T. Abe *et al.*, Belle II technical design report, KEK report 2010-1, Tsukuba, Japan (2010).
- [6] B. Shwartz, *Nucl. Inst. Meth.* **A598** (2009) 220.
- [7] C.L.Melcher and Schweitzer, *IEEE Trans on Nucl. Sci.* **39** (1992) 502,  
M. Balzerzyk *et al.*, *IEEE Trans on Nucl. Sci.* **47** (2000) 1319,  
E.V.D. van Loef *et al.*, *Nucl. Inst. & Meth.* **A 486** (2002) 254,  
BrilliantCe Scintillators Performance Summary, Scintillation Products Technical Note, Saint-Gobain Crystals, (2009).
- [8] A. Kuzmin, *Nucl. Inst. Meth.* **A623** (2010) 252.
- [9] I. Bedny *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.* **A598** (2009) 273.