



Работа ИЯФ СО РАН в коллаборации Belle II

А.Кузьмин

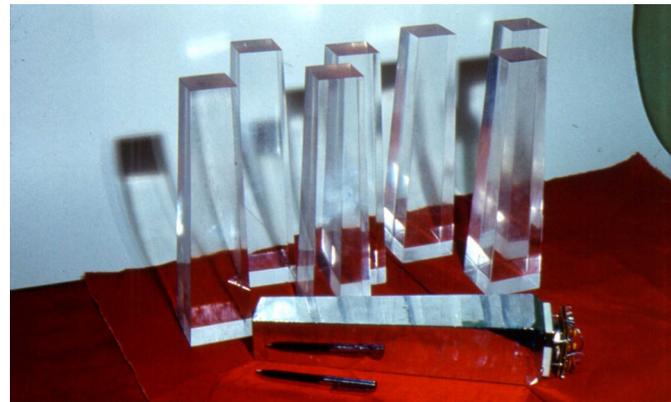
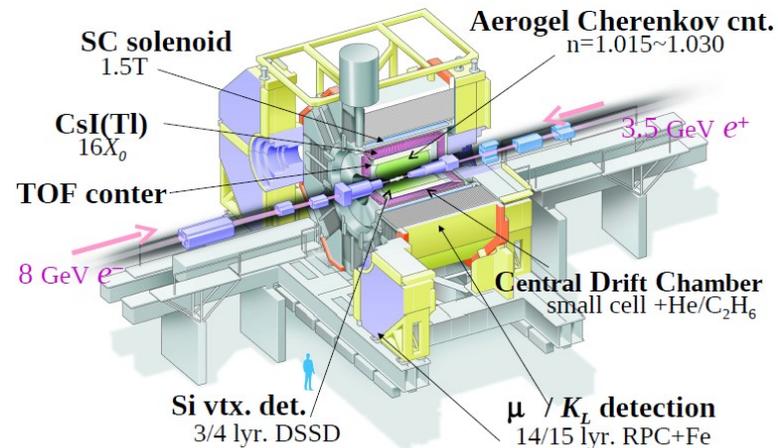
- История сотрудничества**
- SuperKEKB и детектор Belle II**
- Калориметр для Belle II**
- Текущие работы по калориметру**
- Физические результаты Belle II**

Научная сессия 26.02.2026

История сотрудничества

Команда ИЯФ начала сотрудничество с КЕК по проекту Belle с 1994 года. Проект эксперимента был готов в 1995 году, в 1999 году начал работу детектор. Команда ИЯФ работала в группе электромагнитного калориметра как на этапе разработки, так и на этапе изготовления.

Belle Detector



Более 6 тыс. счетчиков CsI(Tl) были изготовлены в ИЯФ в Новосибирске. Команда ИЯФ активно принимала участие в разработке электроники калориметра. Калориметр успешно проработал до 2010 года, сохранив рабочими все 8736 счетчиков

Belle II



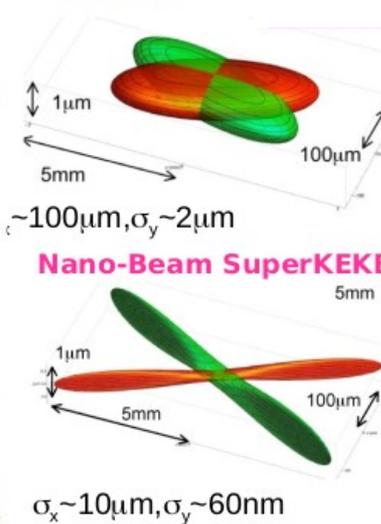
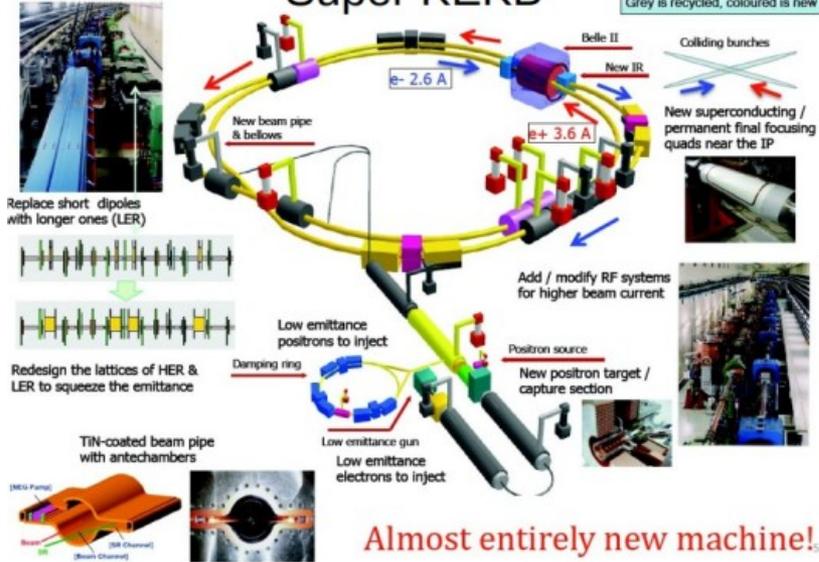
Super KEKB

Grey is recycled, coloured is new

KEKB

2010 закончен эксперимент Belle
2019 набор эксперимента Belle II

- Коллайдер $e^{-}(7\text{GeV}) - e^{+}(4\text{GeV})$
- Проектная светимость $6 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Достигнутая светимость $5.1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (World Record)
- Набранная светимость $\sim 600 \text{ fb}^{-1}$



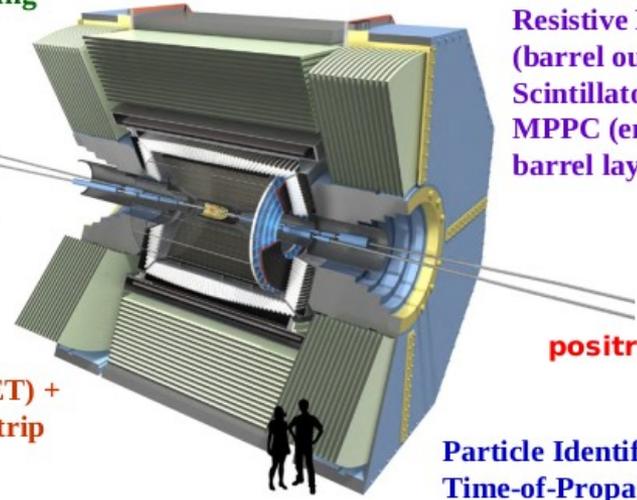
EM Calorimeter:
CsI(Tl), waveform sampling electronics

electrons (7GeV)

Central Drift Chamber
Smaller cell size, long lever arm

Vertex Detector
2 layers Si Pixels (DEPFET) +
4 layers Si double-sided strip DSSD

- + New software, improved tracking, ...
- + Optimization for low multiplicity trigger
- + Improved simulation, generators and GRID



KL and muon detector:
Resistive Plate Counter (barrel outer layers)
Scintillator + WLSF + MPPC (end-caps, inner 2 barrel layers)

positrons (4GeV)

Particle Identification
Time-of-Propagation counter (barrel)
Prox. focusing Aerogel RICH (forward)

Около 2 км вакуумных камер и 220 корректирующих магнитов было изготовлено в ИЯФ

- Изучение редких распадов B-, D- мезонов и τ .
- Измерение параметров CP-нарушения
- Поиск новой физики

Калориметр

- Измерение энергии, углов и времени прихода фотонов (30 МэВ - 7 ГэВ)
- Идентификация электронов
- Идентификация K_L
- Сигнал нейтрального триггера
- Оперативное измерение светимости



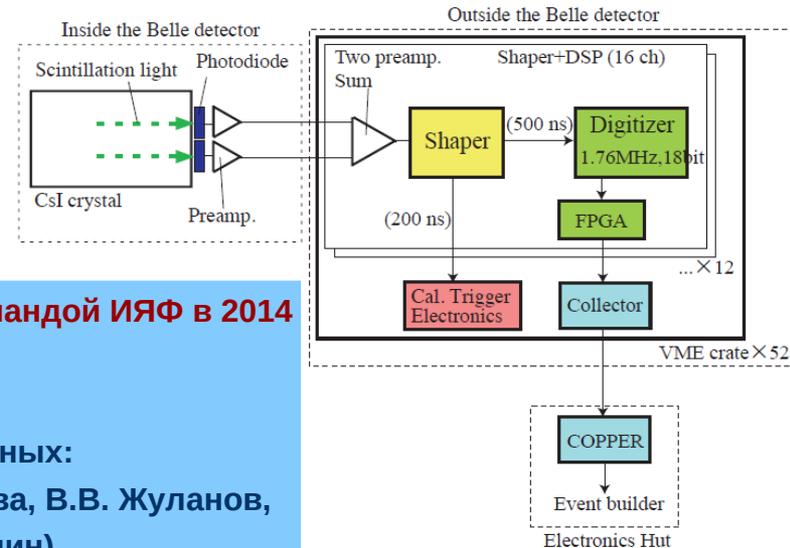
8736 счетчиков:

- 30cm CsI(Tl) (16.1X0)
- 2x 2cm² PIN диоды
- 2 предусилителя

- Все счетчики, PIN диоды и предусилители сохранены с детектора Belle
- Все счетчики работают (у 10 счетчиков один PIN отключен)
- Формирующая и оцифровывающая электроника модернизированы



Модули в формате 9U VME
 16 каналов на модуль
 Формировка (0.5мкс),
 оцифровка (2 MHz, 18 bit),
 подгонка формы
 Вывод А, Т, Q или/и 31 точка
 формы
 Быстрая сумма для триггера

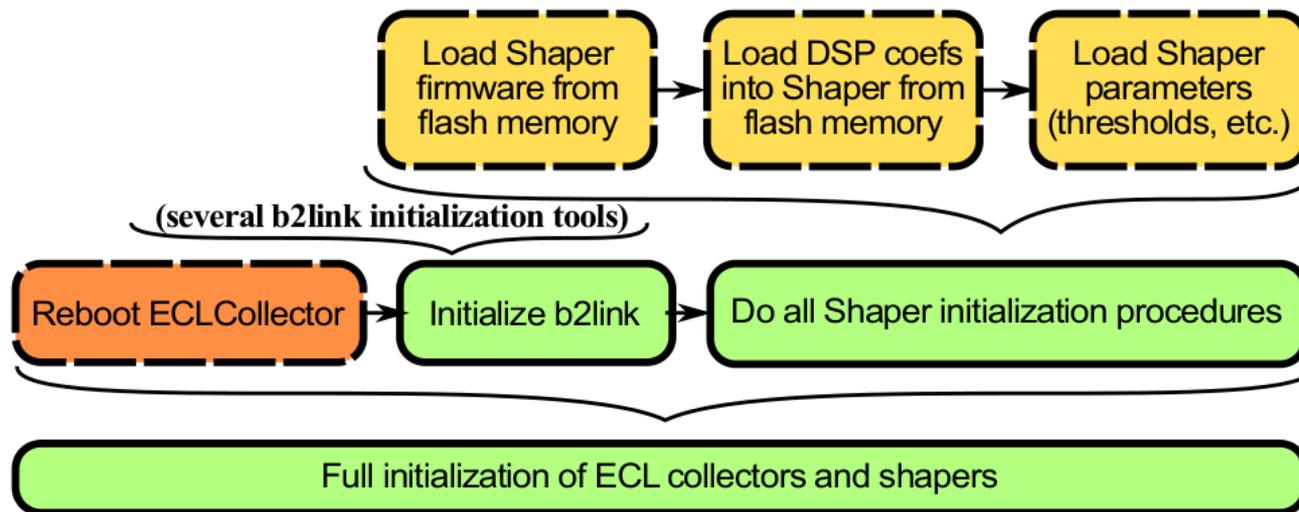


- Электроника для модернизации была разработана и настроена командой ИЯФ в 2014
- Проекты ПЛИС были разработаны и написаны командой ИЯФ (В.М.Аульченко, Ю.В.Усов, В.В.Жуланов)
- 2016-2018 проверка электроники и разработка системы сбора данных: (А.Ю.Гармаш, А.В.Бобров, Ю.В.Усов, П.П.Кроковный, А.Н.Винокурова, В.В. Жуланов, Д.В.Матвиенко, В.Е.Шебалин, Д.А.Епифанов, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

Система медленного контроля калориметра

ССД калориметра включает 576 модулей ShaperDSP , 52 коллектора и 5 серверов.

- Конфигурация включает ~80 000 параметров.
- 1 500 000 коэффициентов для алгоритма восстановления энергии/времени
- Была разработана система медленного контроля для быстрой конфигурации и инициализации ССД калориметра
- Система контроля качества непрерывно набирает гистограммы для дежурных



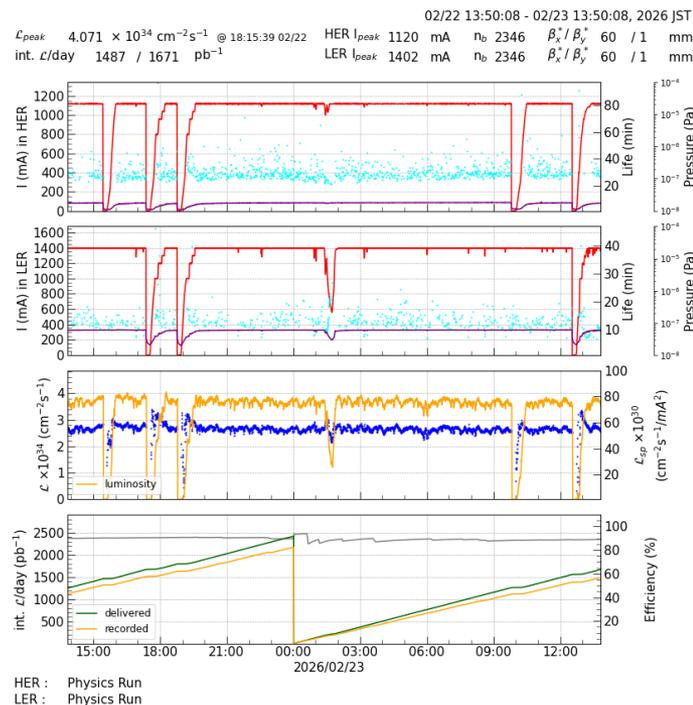
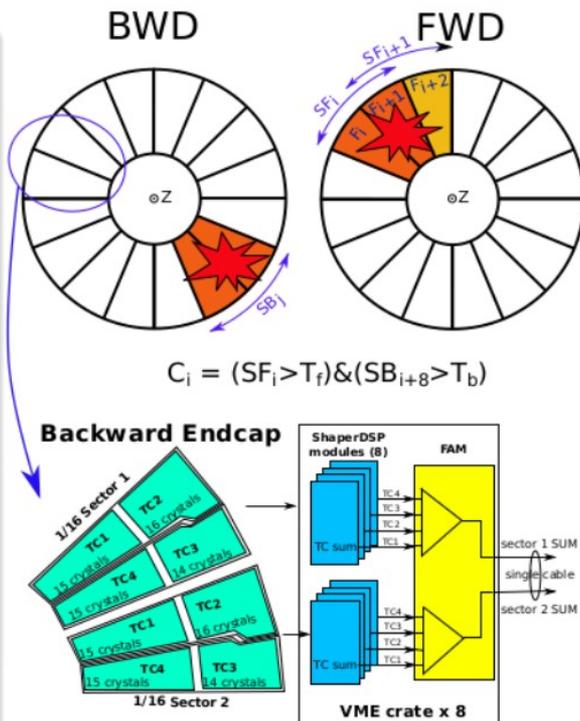
Вся инициализация занимает ~1 минуту.

Система медленного контроля была разработана и реализована командой ИЯФ

(М.А.Ремнев, К.О.Каня)

Система оперативного измерения светимости

- One endcap 1/16 sector (4 Trigger Cells)
- Each FAM module processes signals from 8 ShaperDSP boards (8 TC) signals and provides analog signals from two endcap sectors to LOM module
- Inner Forward Endcap sector is excluded (may be included)
- Coincidence rate of the signals in opposite sectors is counted and luminosity is calculated

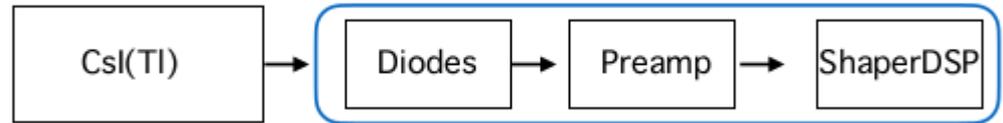
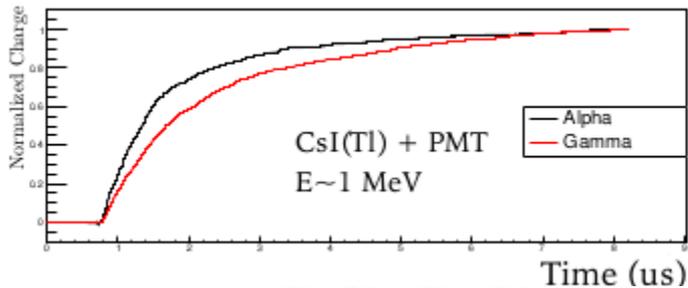


-Разработка системы оперативного измерения светимости и изготовление модуля были проведены в ИЯФ (Б.А.Шварц, В.Н.Жилич, А.С.Кузьмин, В.Е.Шебалин, Ю.В.Усов, М.А.Ремнев, Н.И.Габышев)
 - В настоящее время поддержка и развитие системы оперативного измерения светимости ведется командой ИЯФ (Е.А.Коваленко, А.Ю.Гармаш, В.Е.Шебалин, К.О.Каня)

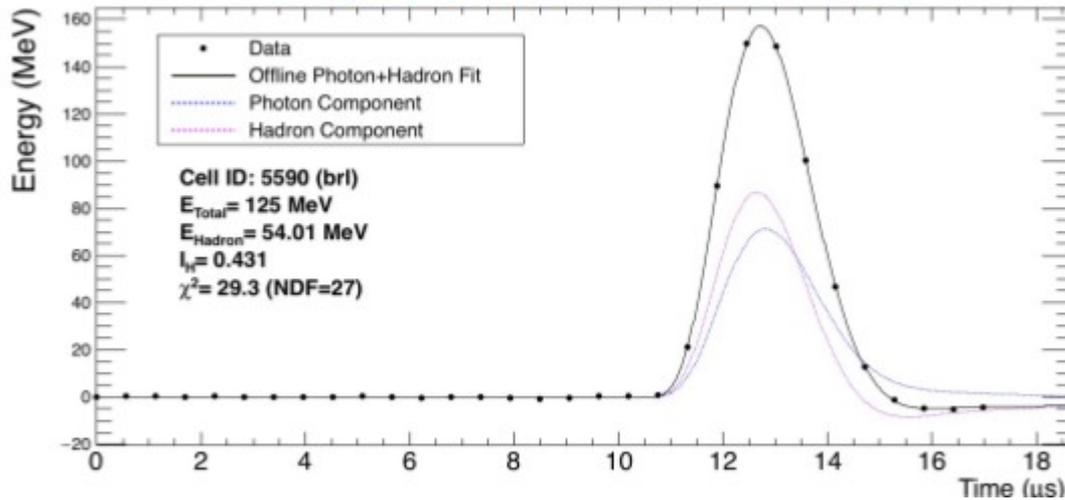
Идентификация адронов

В CsI(Tl) наблюдается разница времени высвечивания для МIP и частиц с высокой плотностью ионизации.

При взаимодействии адронов рождаются p и другие ядра.



Sample Fit of Hadron Pulse in Collision Data



Анализируя данные формы сигнала после формирователя, можно оценить вклад частиц с высокой плотностью ионизации

$$E_{Total} = E_{Photon} + E_{Hadron}$$

$$N_H = \frac{E_{Hadron}}{E_{Total}}$$

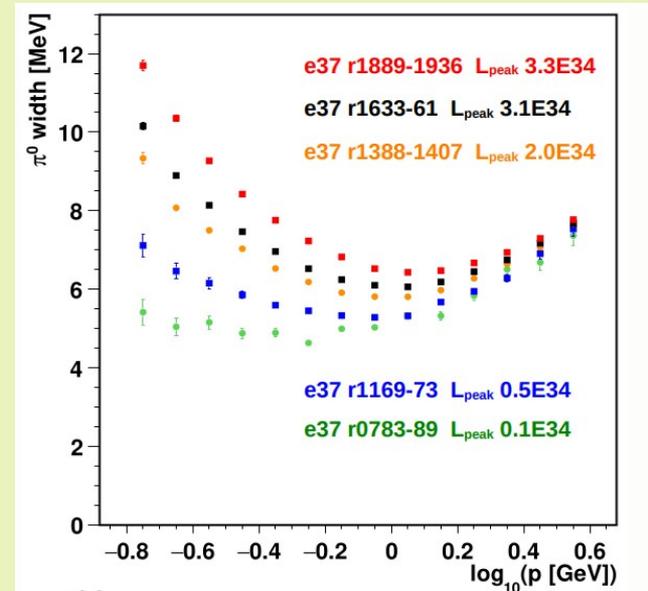
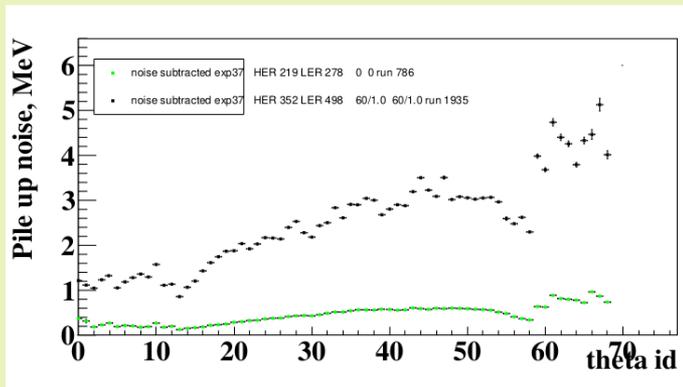
Сохраняются формы сигналов $E > 50$ МэВ для анализа off-line.

Текущие работы по калориметру

-Организация дежурств на калориметре (А.В.Бобров)
(А.Н.Винокурова, Д.В.Матвиенко, К.О.Каня, В.Н.Жилич, К.С.Гудкова, К.А.Чиликин,
Д.А.Штоль, Е.А.Коваленко, М.А.Ремнев, Д.А.Епифанов, О.В.Радченко, А.А.Коробов
А.В.Бобров, С.Привалов)

-Поддержка, профилактика и ремонт электроники
(Ю.В.Усов, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

-Мониторирование влияния пучкового фона на разрешение калориметра
(А.А.Коробов, А.С.Кузьмин)



Текущие работы по калориметру

-Разработка проекта ПЛИС для формирователя и коллектора для вычисления вклада адронной компоненты

(В.В.Жуланов, О.В.Радченко, М.А.Ремнев)

-Разработка проекта ПЛИС для формирователя и коллектора для подавления вклада инжекции

(В.В.Жуланов, К.О.Каня, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

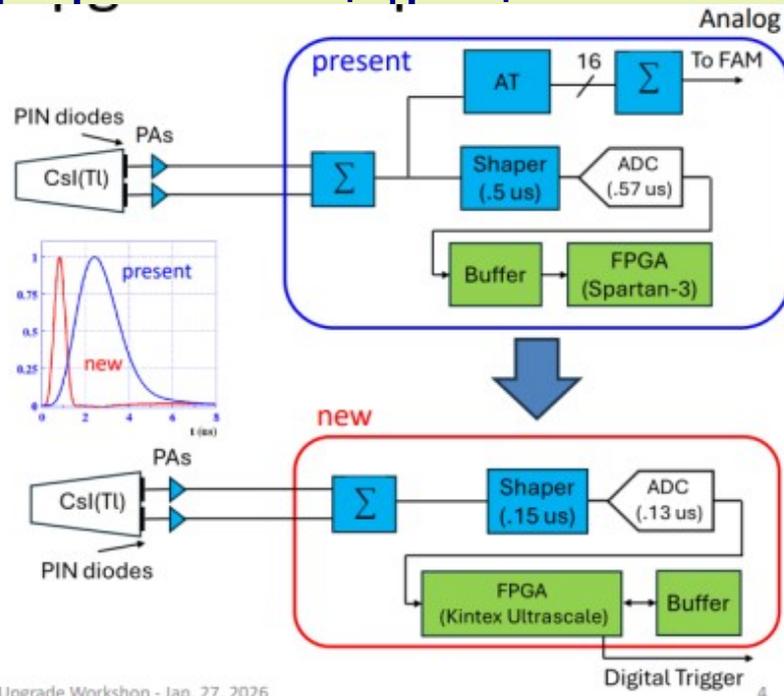
-Разработка отдельного, параллельного монитора качества данных для калориметра, для увеличения ресурсов оперативной памяти и скорости обработки

(К.О.Каня, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

Разработка новой электроники для модернизации 2032

- В 2032 году планируется остановка на модернизацию SuperKEKB и Belle II для достижения светимости $6 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
- Планируется модернизация электроники калориметра
- Разработан проект нового формирователя оцифровщика

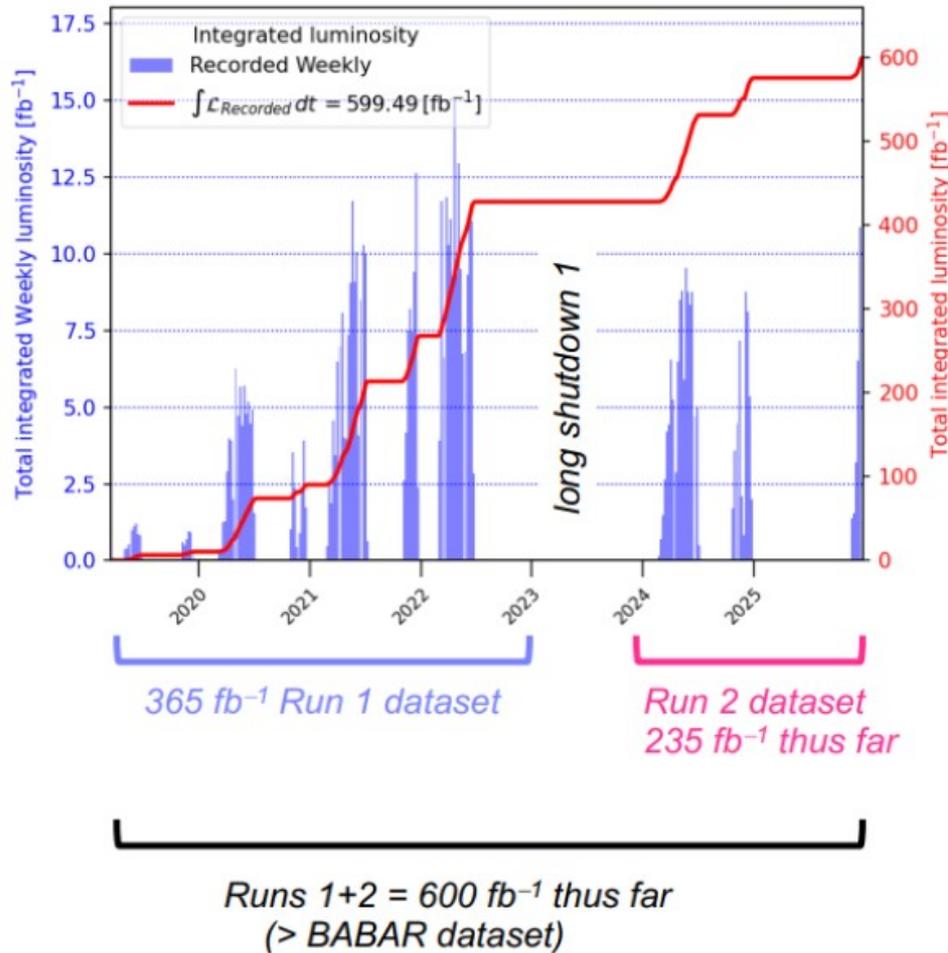
- ShaperDSP upgrade
 - faster shaping (500 ns \rightarrow 150 ns)
 - higher sample-rate ADC (1.7 MHz \rightarrow 7.9 MHz)
 - Higher-granularity trigger cell (4x4 \rightarrow 1x1)
 - New FPGA (Spartan-3 \rightarrow Kintex UltraScale) for better fitting and digital triggering
 - New optical trigger links at ~ 3.5 Gbps
- Digital trigger and higher data rate \rightarrow new electronics chain



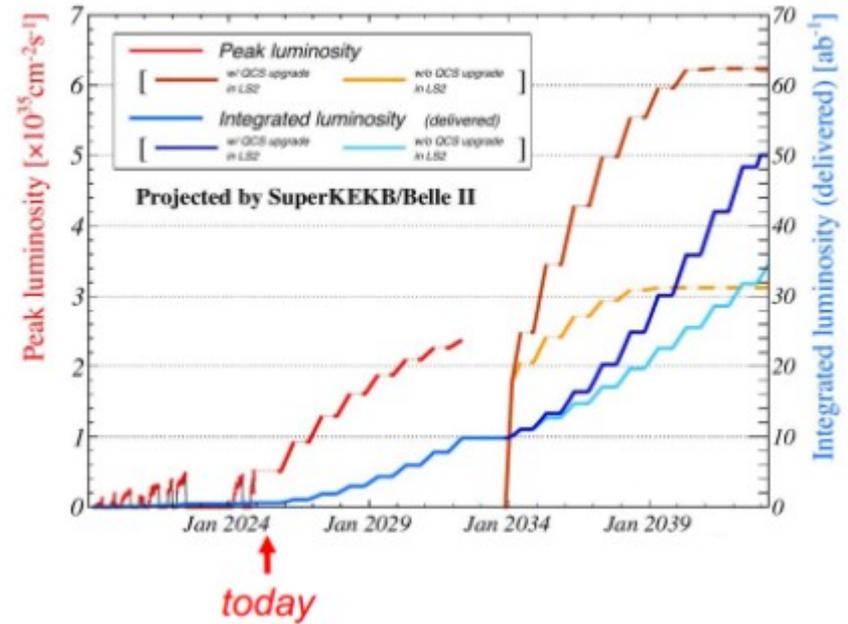
R. Giordano - Upgrade Workshop - Jan. 27, 2026

- Ведется изготовление прототипа в Италии
- Ведется оптимизация алгоритма восстановления энергии и времени (Ю.В.Усов, А.С.Кузьмин, М.Г.Фурцев, С.Привалов)

Набор светимости на Belle II



Планы дальнейшего набора



- В-физика и изучение параметров нарушения CP
- физика очарованных мезонов и тау лептонов
- изучение спектроскопии адронов и поиск частиц темной материи
- Изучение процессов ISR
- поиск процессов с нарушением лептонного числа

Различные анализы:

- Измерение времен жизни, времязависимый анализ
- Недостающая энергия и недостающая масса

Recent results:

CP violation in B decays (6 papers)

Semileptonic/leptonic B decays (5 papers)

Electroweak penguin B decays (2 papers)

CP violation in D decays (6 papers)

Charm baryons (5 papers)

Tau decays (3 papers)

Searches for Exotica (ALP-like particles, dark matter, Higgs...) (6 papers)

Физиками ИЯФ получено много интересных результатов на Belle и Belle II

Изучение 3-х частичных распадов $B \rightarrow (KKK, K\pi\pi, KK\pi)$

Измерение полных вероятностей распада, Далитц анализ с выделением вкладов промежуточных состояний ρ, K^*, f_0, ϕ и других (А.Гармаш, А.Бондарь)

PRD 65, 092005 (2002), PRD 71, 092003 (2005), PRL 96, 251803 (2006), PRD 75, 012006 (2007)

Изучение рождения и распадов возбужденных состояний очарованных мезонов

Наблюдение P-волновых состояний нейтральных и заряженных D^{**} , исследование угловых зависимостей и определение квантовых чисел, масс и ширин, наблюдение новых мод распада $D^{**} \rightarrow D\pi\pi$, прецезионное измерение $D \rightarrow 3\pi$, наблюдение распадов $B \rightarrow DK^{(*)}$, $B \rightarrow D\bar{D}$ (А.Кузьмин, А.Бондарь, Д.Анипко, Д.Матвиенко, С.Эйдельман, К.Аринштейн, П.Кроковный, В.Воробьев) PRL 90, 141802 (2003), PRD 69, 112002 (2004), PRL 94, 221805 (2005), PL B 662, 102 (2008), PRD 77, 091101(R)(2008), PRD 92, 012013 (2015)

Изучение рождения и распадов возбужденных состояний Ds-мезонов

Наблюдение распадов B в состояния с Ds-мезонами, наблюдение возбужденных состояний $D_{sj}(2317) D_{sj}(2457)$, изучение их угловых зависимостей (А.Бондарь, П.Кроковный, А.Кузьмин, В.Воробьев, В.Мойборода) PRL 89, 231804 (2002), PRL 91, 262002 (2003)

Изучение рождения и распадов состояний чармония

Наблюдение распада $B \rightarrow \chi_{c0} K$, наблюдение рождения $\eta_c, \eta_c(2S)$ в распадах B и измерение их параметров (А.Гармаш, А.Бондарь, А.Винокурова, А.Кузьмин, С.Эйдельман, К.Гудкова) PRL 88, 031802 (2002), Phys. Lett. B 706, 139 (2011), JHEP 06, 132 (2015)

Изучение распадов B в состояния с барионами в конечном состоянии

Наблюдение распадов $B \rightarrow D^{(*)} p \bar{p}$, наблюдение и изучение распадов с Λ_c в конечном состоянии, наблюдение распадов $B \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$, модельнонезависимое определение полного бранчинга $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^+ \pi^0$ (А.Бондарь, П.Кроковный, Н.Габышев, С.Эйдельман) PRL 89, 151802 (2002), PRL 90, 121802 (2003), PRL 97, 242001 (2006), PRL 97, 202003 (2006), PRL 113, 042002 (2014)

Физические результаты, полученные физиками ИЯФ

Изучение рождения и распадов τ -лептона

Поиск нарушения лептонного и барионного числа в распадах $\tau \rightarrow \Lambda_c \Lambda_c \bar{c} b \bar{q}$ распадов, изучение распадов $\tau \rightarrow K_s^0 \Lambda \pi \nu_\tau$, изучение распадов $\tau \rightarrow h^+ h^- h^+ \nu_\tau$, наблюдение распадов $\tau \rightarrow \pi \nu_\tau e^+ e^-$, и поиск $\tau \rightarrow \pi \nu_\tau \mu^+ \mu^-$ (С.Эйдельман, Д.Епифанов, Б.Шварц, А.Бобров, Д.Штоль) *Phys. Lett. B* 632, 51 (2006), *Phys. Lett. B* 654, 65 (2007), *PRD* 81, 113007 (2010), *PRD* 100, 071101(R) (2019)

Изучение параметров нарушения CP и разработка нового метода измерения угла ϕ_3

Наблюдение CP — нарушения и измерение угла ϕ_3 из анализа Далитц распределения распада $B^{+} \rightarrow D^{(*)0} K^{+}$, ($D^0 \rightarrow K_s \pi^+ \pi^-$), первое модельнонезависимое измерение угла ϕ_3 , модельнонезависимое измерение угла ϕ_1 , при анализе временнзависимого распада $B^0 \rightarrow D^{(*)0} h^0$, ($D^0 \rightarrow K_s \pi^+ \pi^-$), (А.Бондарь, А.Полуэктов, В.Воробьев) *PRD* 70, 072003 (2004), *PRD* 81, 112002 (2010), *PRD* 85, 112014 (2012), *PRD* 94, 052004 (2016)

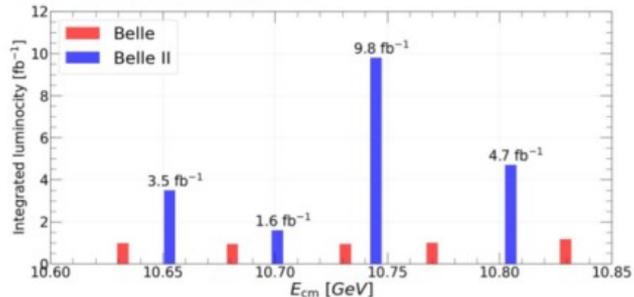
Изучение распадов $Y(5S)$, ботомониев и четырех-кварковых состояний с b-кварками

Наблюдение $h_b(1P)$, $h_b(2P)$, наблюдение заряженных ботомониеподобных состояний Z_b и Z_b'' , в распадах $Y(5S)$, признаки $\eta_b(2S)$ и наблюдение распадов $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)$, $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)$, Амплитудный анализ $e^+ e^- \rightarrow Y(nS) \pi^+ \pi^-$, наблюдение распадов Z_b в B-мезоны, сканирование $e^+ e^- \rightarrow h(nP) \pi^+ \pi^-$, и наблюдение $Y(11020)$, наблюдение новой структуры 10.75 ГэВ (А.Бондарь, П.Кроковный, А.Гармаш, А.Кузьмин, Е.Коваленко, Р.Мизюк) *PRL* 108, 032001 (2012), *PRL* 108, 122001 (2012), *PRL* 109, 232002 (2012), *PRD* 88, 052016 (2013), *PRD* 91, 072003 (R) (2015), *PRL* 117, 142001 (2016), *PRL* 116, 212001 (2016), *JHEP* 2019, 220 (2019)

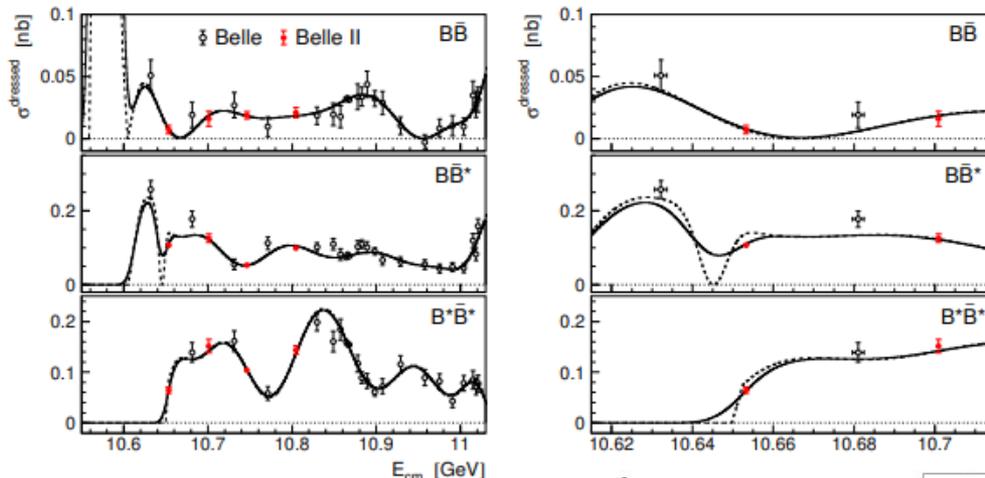
Недавние результаты, полученные на Belle II e⁺e⁻ сканирование выше Υ(4S)

● Belle II added scan points

● JHEP 07 (2024) 116

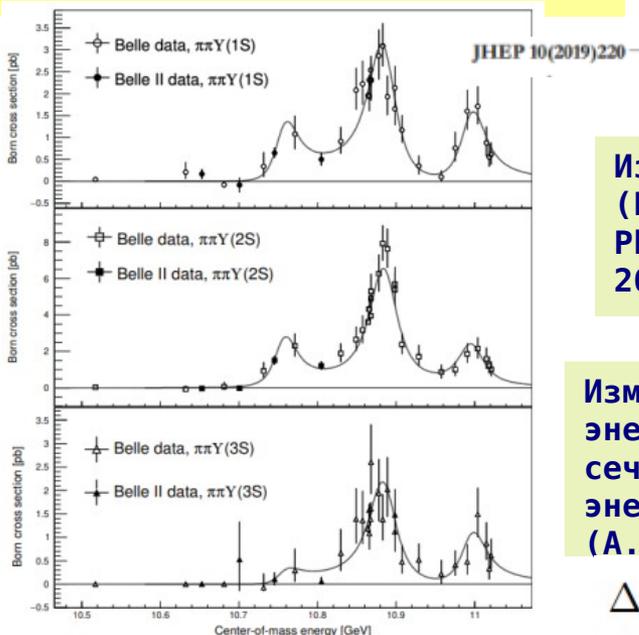


Измерение зависимости сечения рождения V^(*)V^(*)- мезонов от энергии в эксперименте Belle II (С.Привалов, А.Е.Бондарь) JHEP 10 (2024) 114



- Уникальные данные выше Υ(4S)

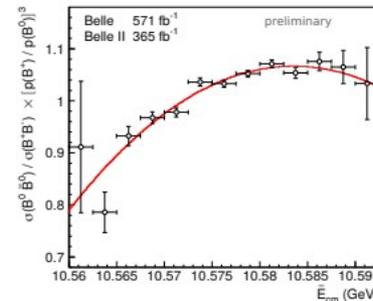
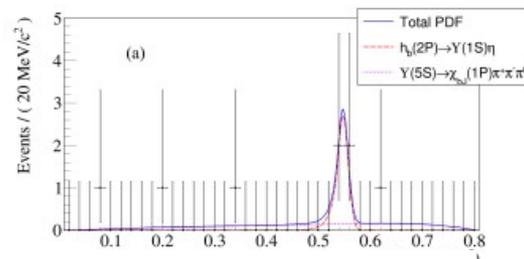
- Подтверждение Υ(10753)



Изучение распада $h_b(2P) \rightarrow \gamma(1S)\eta$ (Е.А.Коваленко, А.Ю.Гармаш) Phys.Rev.Lett. 133 (2024) 26, 261901

Измерение разницы масс $m(B^0) - m(B^+)$ и энергетическая зависимость отношения сечений $\sigma(e^+e^- \rightarrow V^0V^0) / \sigma(e^+e^- \rightarrow V^+V^-)$ от энергии на Belle и Belle II (А.Е.Бондарь) Принято в JHEP

$$\Delta m = (0.495 \pm 0.024 \pm 0.005) \text{ MeV}/c^2.$$



Текущие анализы данных

К.А.Чиликин "Амплитудный анализ распадов $B \rightarrow \psi(2S)\pi K$ "

К.С.Гудкова "Изучение распадов $B \rightarrow K(\pi)pp$ - на детекторах Belle и BelleII"

Д.В.Матвиенко "Анализ распада $B \rightarrow D\omega\pi$ на Belle и Belle II"

А.В.Бобров "Изучение распадов $\tau^- \rightarrow h^+h^-h^-\nu$ "

А.Н.Винокурова "Измерение отношения f_{+-}/f_{00} в распадах $\Upsilon(4S)$ "

С.Привалов "Измерение зависимости сечения рождения $B\bar{B}\pi$ от энергии выше $\Upsilon(4S)$ "

С.Привалов "Проверка изотопической инвариантности при рождении $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ "

Е.А.Коваленко "Измерение сечения рождения Y_{KK} выше $\Upsilon(4S)$ "

Заключение

- Эксперимент Belle II набирает данные с 2019 года
- Калориметр Belle II успешно работает, обеспечивая регистрацию и измерение параметров фотонов
- Команда ИЯФ поддерживает работоспособность, проводит необходимый ремонт оборудования и участвует в дальнейшей модернизации калориметра
- Эксперимент Belle II позволяет получать передовые результаты по физике высоких энергий
- Сотрудники ИЯФ участвуют в анализе данных и получают интересные результаты

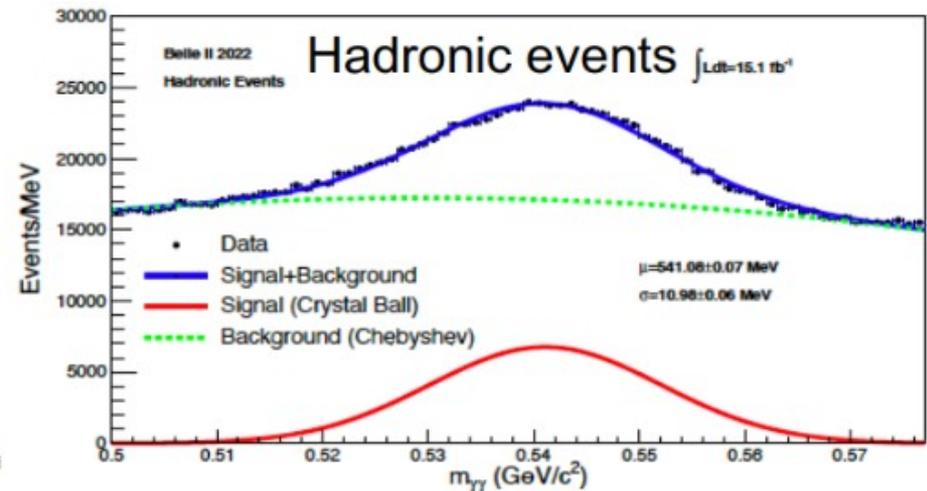
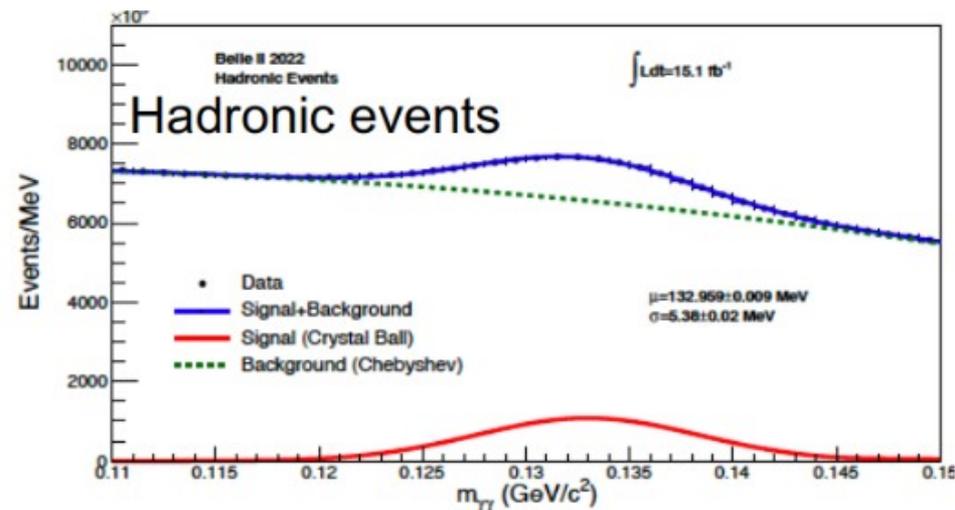
Backup slides

Характеристики калориметра

Энергетическое разрешение изучалось на событиях $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$
 На 1 ГэВ $\sigma_E/E=2.2\%$ σ_t несколько нс

По адронным событиям:

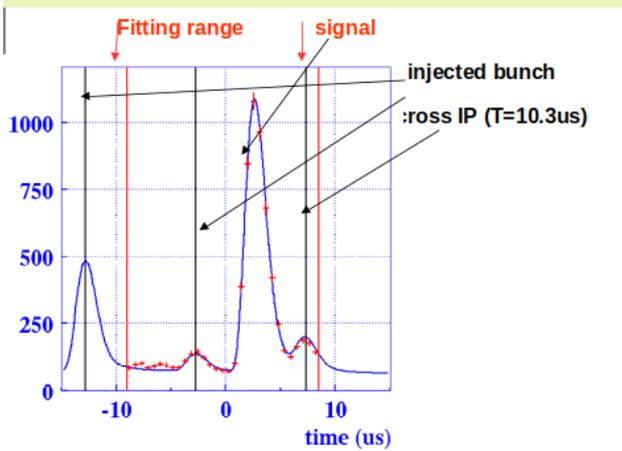
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ($E_\gamma > 25$ МэВ) $\sigma_{\mu\gamma} = 5.4$ МэВ/ c^2 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ ($E_\gamma > 400$ МэВ) $\sigma_{\mu\gamma} = 11$ МэВ/ c^2



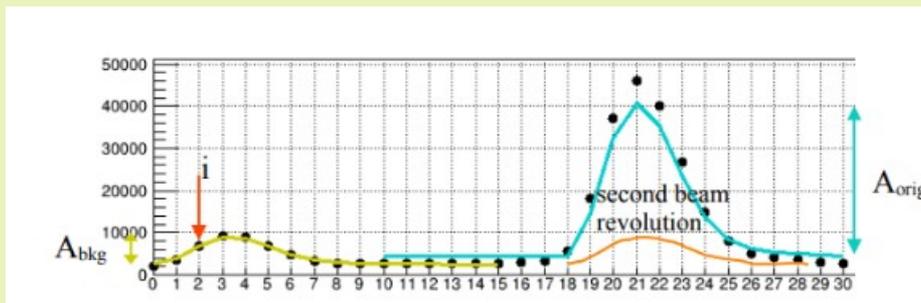
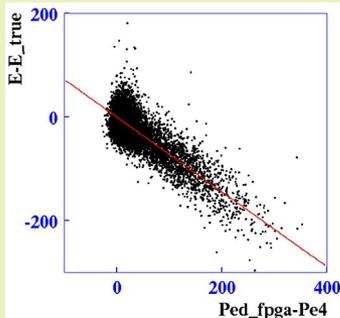
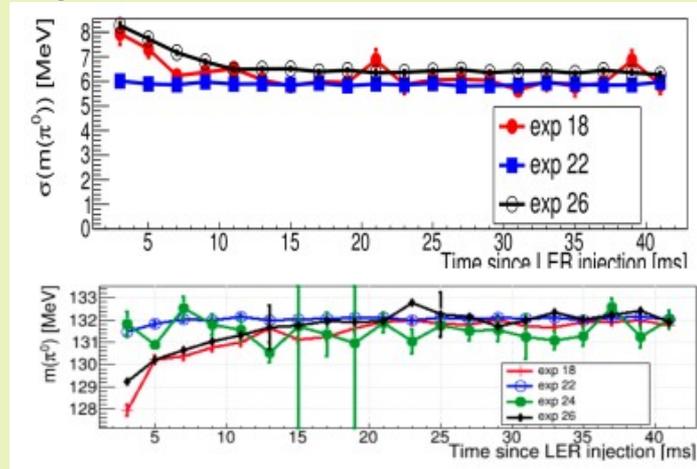
Текущие работы по калориметру

-Разработка проекта ПЛИС для формирователя и коллектора для подавления вклада инжекции

(В.В.Жуланов, К.О.Каня, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

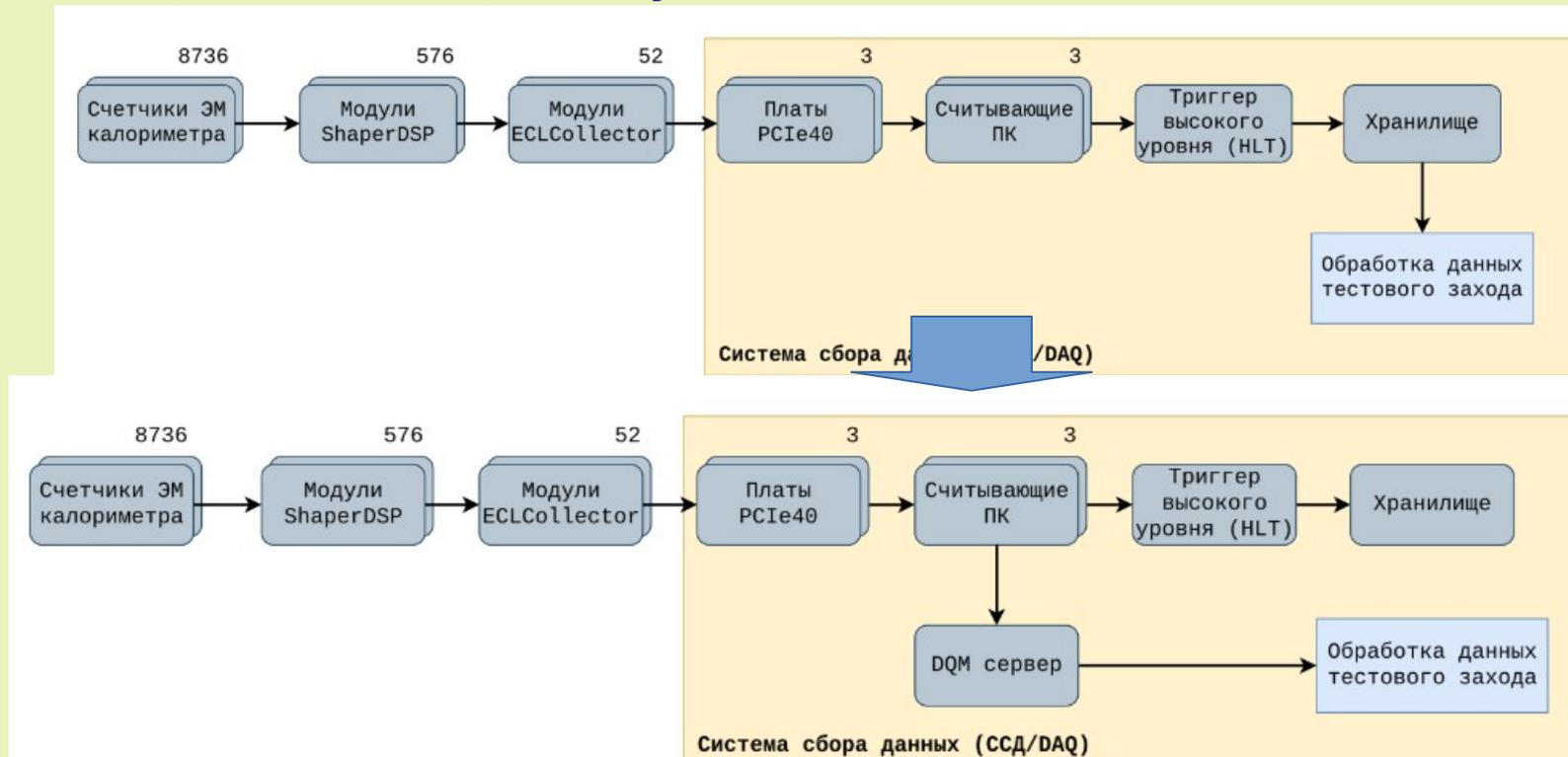


-The noisy injection signal both before and after pulse can result in pedestal increasing and amplitude reduction.
-Pedestal reconstruction allows to improve energy



Текущие работы по калориметру

-Разработка отдельного монитора качества данных для калориметра
(К.О.Каня, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)



- Мониторинг качества данных больше не зависит от ресурсов серверов HLT
- Обработка локального захода осуществляется сразу после получения данных с электроники ЭМ калориметра
- Долю отправляемых событий можно изменять

Текущие работы по калориметру

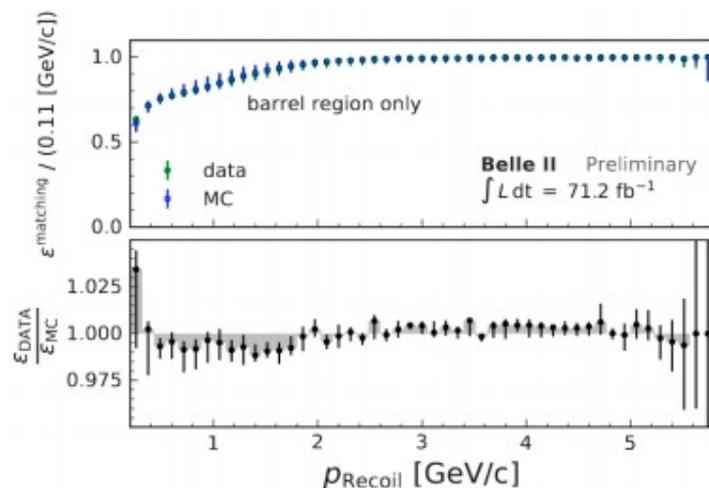
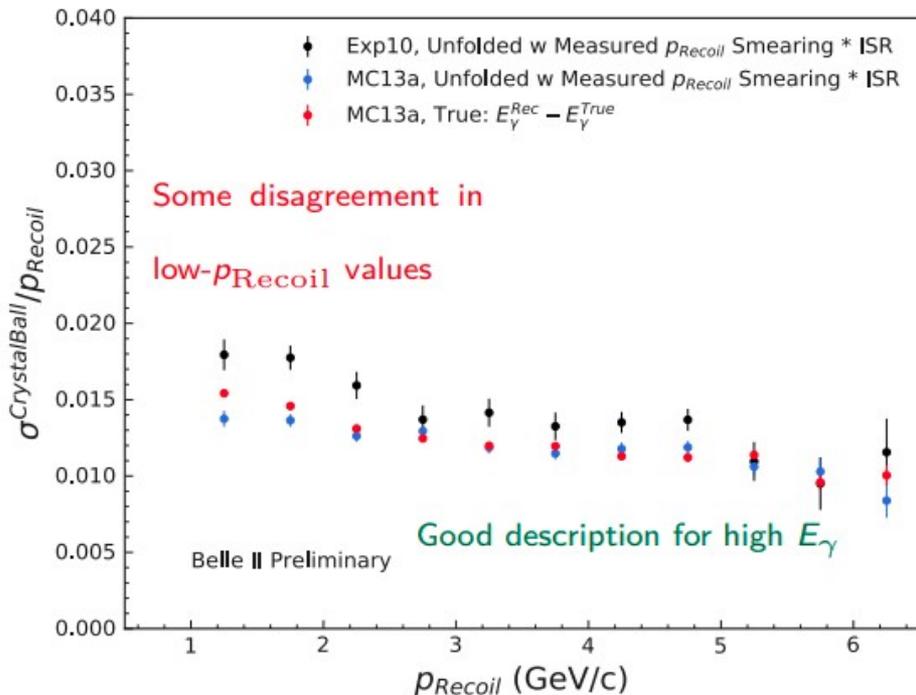
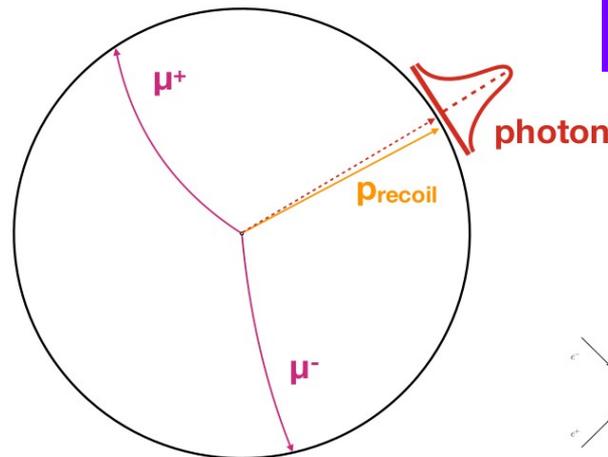
-Разработка проекта ПЛИС для формирователя и коллектора для подавления вклада инъекции

(В.В.Жуланов, К.О.Каня, М.А.Ремнев, А.С.Кузьмин)

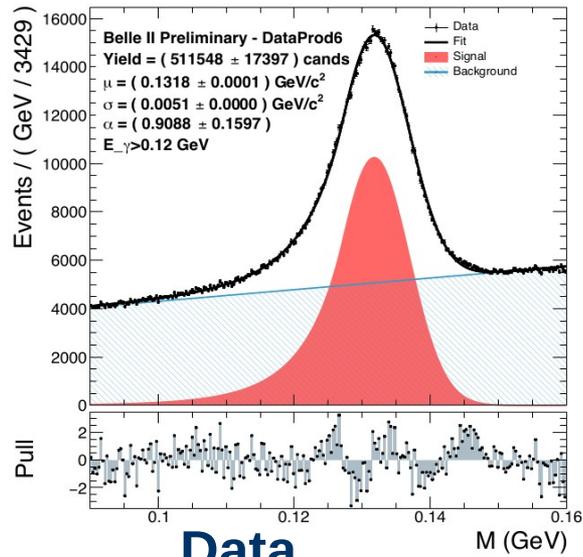
Разрешение и эффективность ECL $e e \rightarrow \mu \mu \gamma$



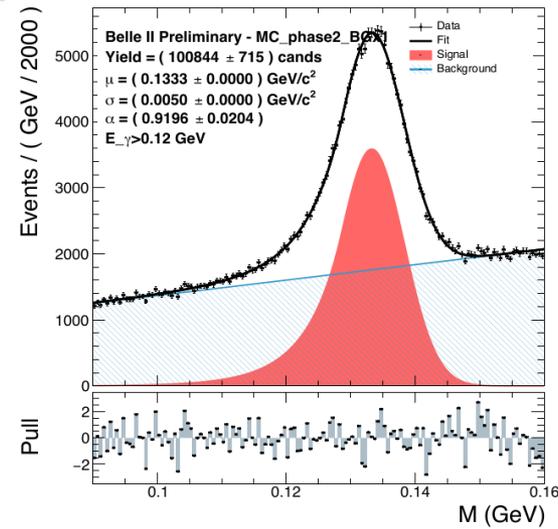
- Энергия и направление фотона определяется из кинематической реконструкции



$\pi^0 \eta \eta$



Data

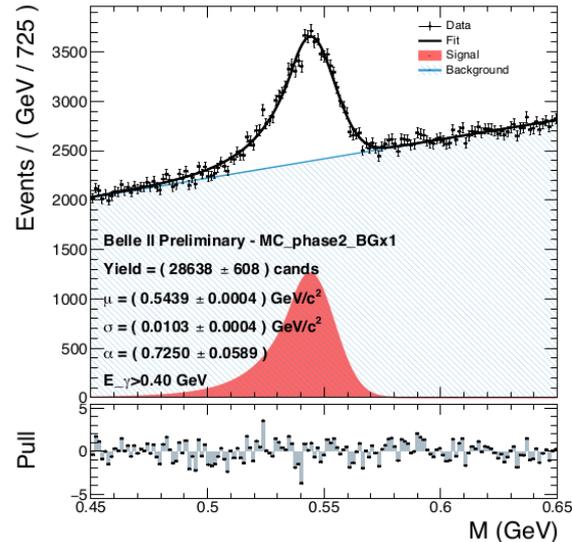
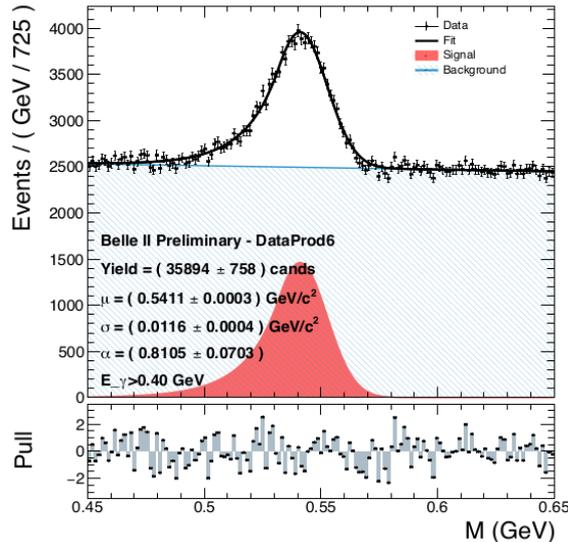


MC

$$\sigma_{\text{data}} = 5.1 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{\text{MC}} = 5.0$$

MeV



$$\sigma_{\text{data}} = 11.6 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{\text{MC}} = 10.3 \text{ MeV}$$

Временное разрешение и калибровка

-Подгонка формы дает как амплитуду, так и время прихода сигнала

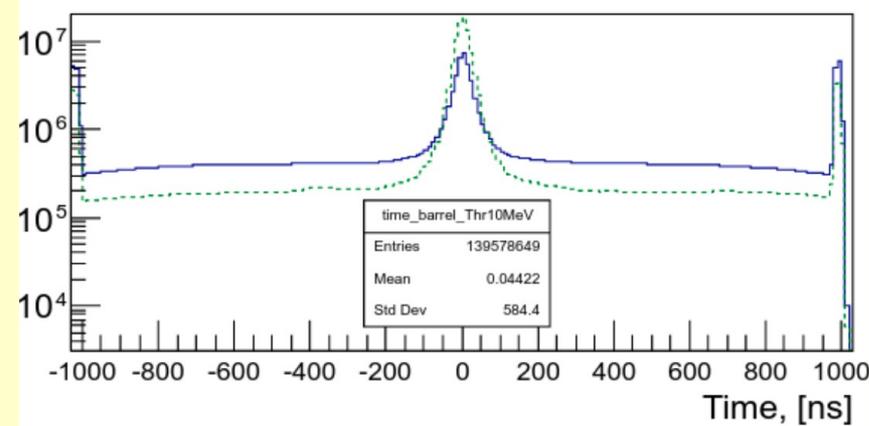
-Временная информация позволяет подавить сигналы пучкового фона

Для достижения хорошего временного разрешения требуется калибровка и введение поправок для каждого кристалла ($T \sim 1\mu s$, $\sigma \sim 1ns$)
 Калибровка проводится на сигналах $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ рассеяния, где есть время дрейфовой камеры

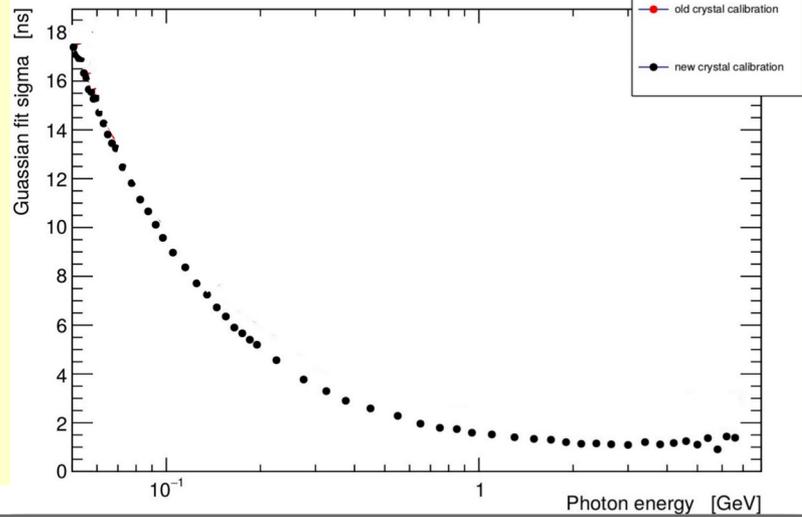
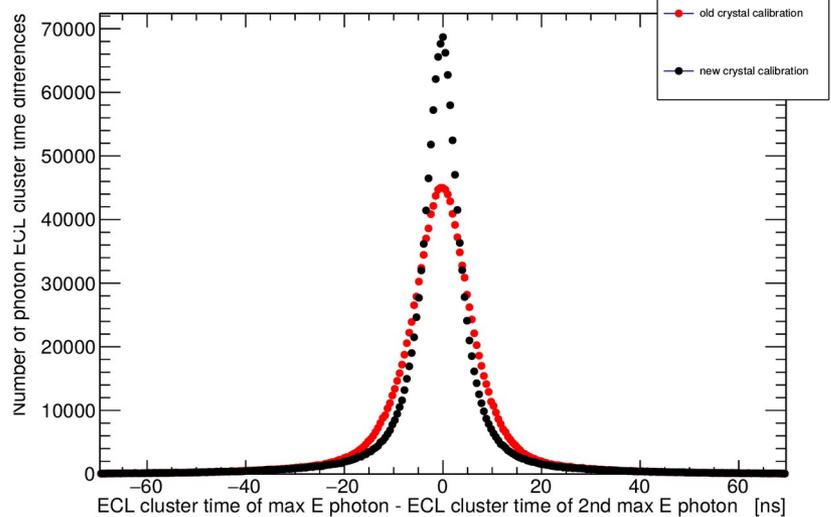
$$t_{ECL\ cluster} = t_{ECLCalDigit}^{Max\ E\ crystal\ in\ cluster} - t_0^{evt}$$

$$t_{ECLCalDigit} = k(F - T_s - T_{crate} - T_{electronics}) - t_{flight} - t_{walk}(amplitude)$$

Reconstructed time for ECL barrel ($E > 10\ MeV$)

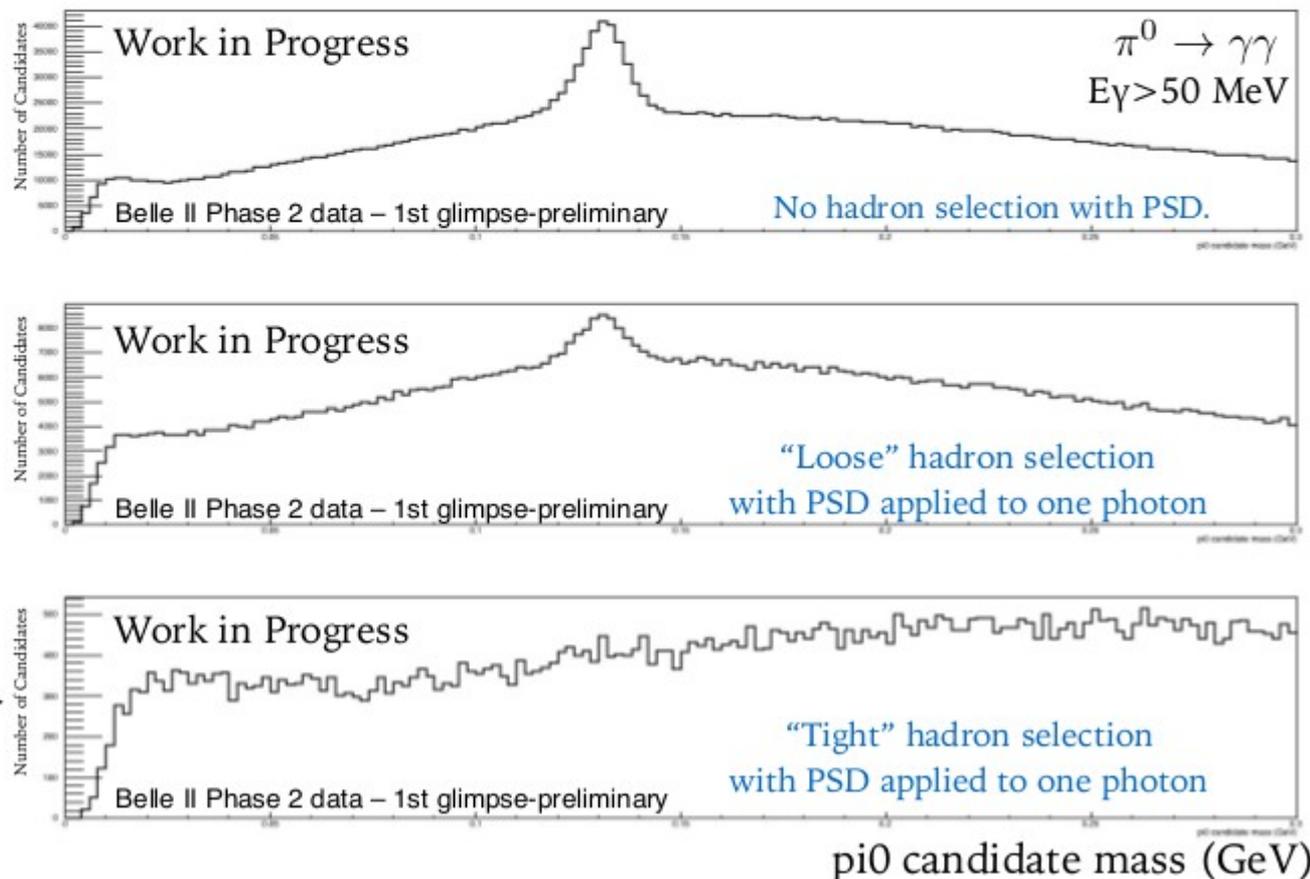


-Работа по улучшению временного разрешения продолжается (А.Бобров. Д.Штоль.)



Identifying Hadronic Showers with Pulse Shape Discrimination

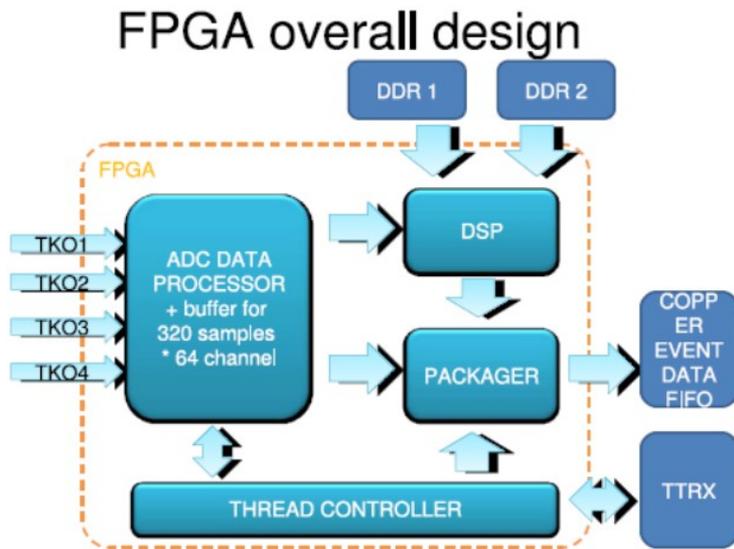
- Work is now ongoing to incorporate PSD into neutral and charged particle ID at Belle II.
- The preliminary result below illustrates hadronic cluster selection at Belle II with PSD.
- Expect no π^0 's from hadronic neutral clusters.



No π^0 peak when tight neutral hadron selection with PSD is applied. →

Fit algorithm in FPGA

- Trigger → fit 16 points to response function taking into account correlations
- Result A(18 bits), T(12 bits), Q – quality of fit (4 bits)
- For some fraction of data both input and output information are sent to DAQ

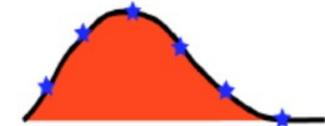


Algorithm details

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

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

$f(t)$ – 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)

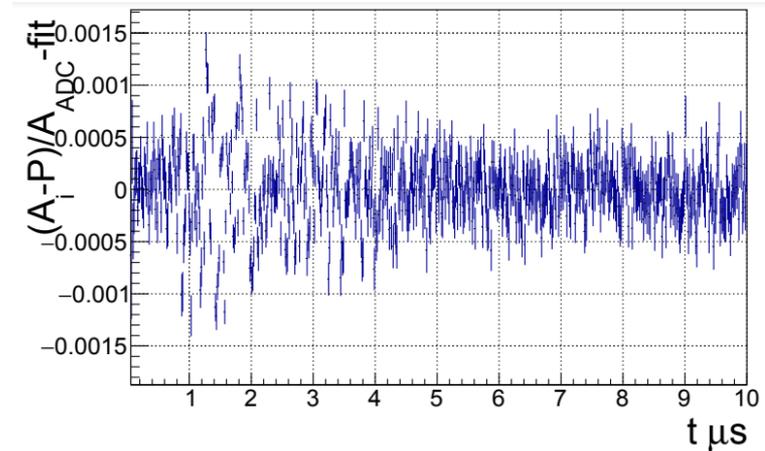
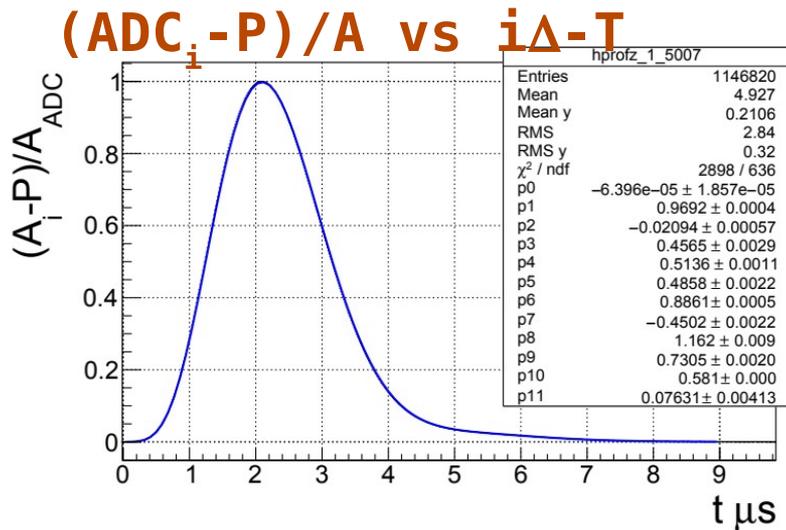
$$\begin{cases} \sum_{i,j} f_i S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 & A = \sum_i \alpha_i y_i \\ \sum_{i,j} f'_i S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 & \Rightarrow B = \sum_i \beta_i y_i \Rightarrow \Delta t = -B/A \\ \sum_{i,j} S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j - Bf'_j - p) = 0 & p = \sum_i \gamma_i y_i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

- Algorithm works for more than 30 kHz of the trigger rate

Shape calibration



- Using preliminary function parameters -time(T) and amplitude(A) are reconstructed
- Estimate shape:



-Fit it to 12 parameter Function

-This function is used in the calorimeter electronics to reconstruct energy, time and quality of signal