

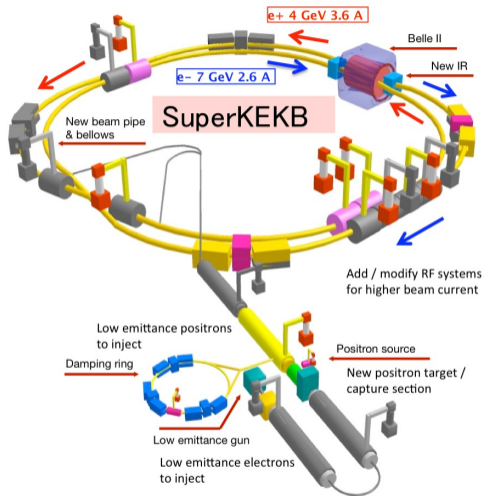
Online мониторинг светимости коллайдера SuperKEKB в эксперименте Belle-II

В.Шебалин

11.03.2026,

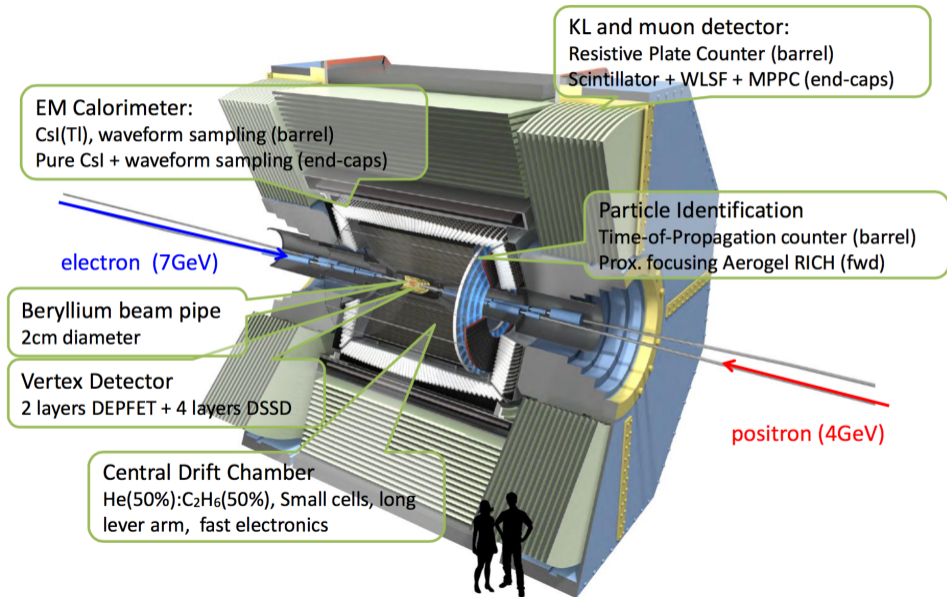
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН

ИЯФ СОРАН

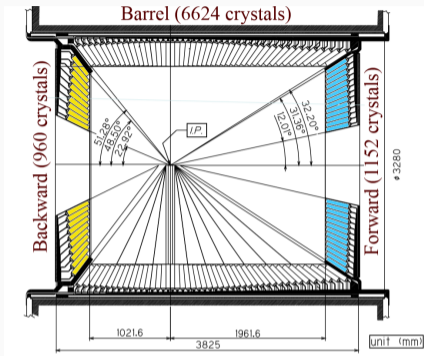


Параметры

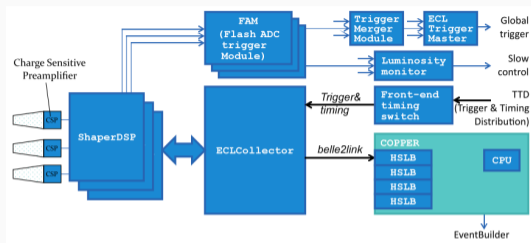
- Электрон-позитронный коллайдер с асимметричной энергией пучков
- Введен в эксплуатацию в 2018 году
- $E_- = 7 \text{ ГэВ}$, $E_+ = 4 \text{ ГэВ}$
- Проектная светимость:
 $6.3 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
- Достигнутая светимость:
 $4.7 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$



Электромагнитный калориметр (ECL)



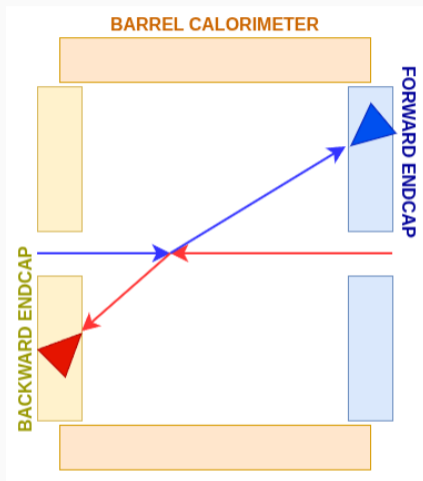
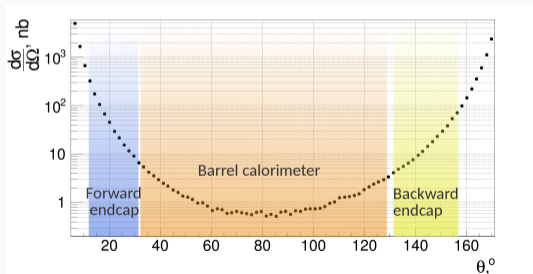
- 8736 кристаллов CsI(Tl)
- Цилиндрическая (barrel) и две торцевых секции (endcaps)
- Размеры кристалла: $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ см}^3$ ($16 X_0$)



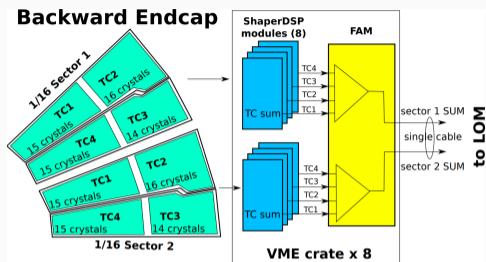
- ShaperDSP - усиление, формирование и оцифровка сигнала, определение времени и амплитуды сигнала
- Аналоговая сумма сигналов внутри триггерной ячейки поступает в триггерный модуль FAM

Измерение светимости

- Измерение светимости в реальном времени необходимо для настройки ускорителя
- Процессы $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ - большое сечение, легко выделяемая сигнатура событий
- Мгновенная светимость $L = \frac{dN/dt}{\sigma}$



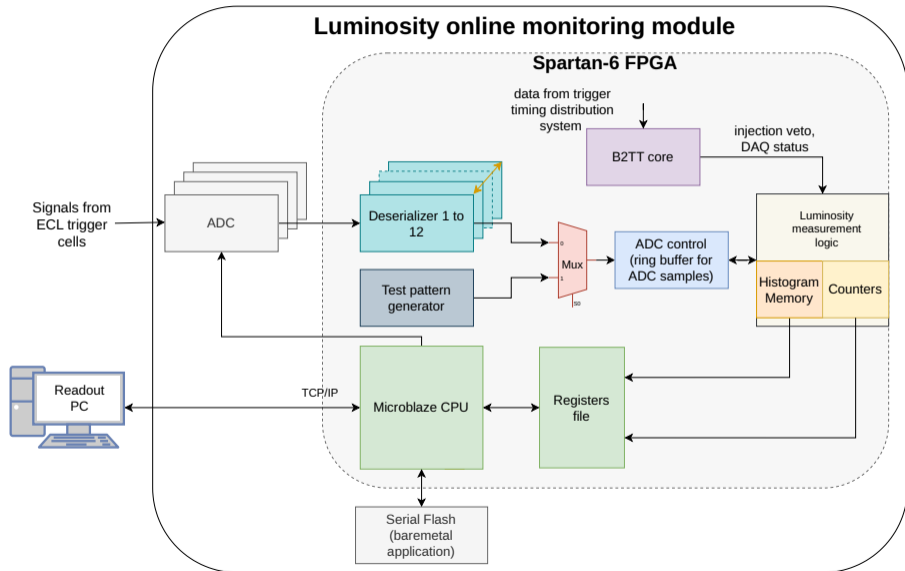
Монитор светимости (LOM)



- 16 кристаллов формируют триггерную ячейку
- Сигналы с 4-х триггерных ячеек - сектора торцевого калориметра суммируются в FAM и подаются в монитор светимости
- Каждая торцевая часть калориметра - 16 секторов

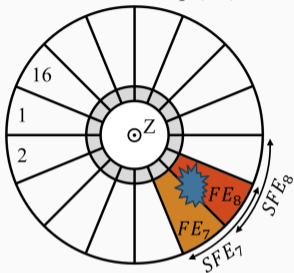


- ПЛИС Xilinx Spartan-6
- Четыре 12-битных 8-канальных АЦП AD9637 с частотой сэмплирования до 40 МГц
- 64 Mb Flash SST25VF064 для хранения программы для Microblaze ЦПУ
- Оперативная память DDR3 128 MB

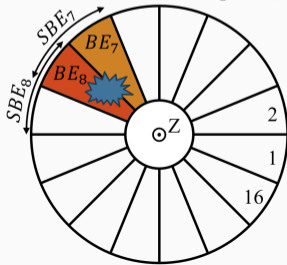


Алгоритм отбора событий

Forward Endcap (FE)



Backward Endcap (BE)



signal threshold T_{FE}

SFE

FE discriminator DFE

SBE T_{BE}

DBE

Quality (topology) signal

Event trigger

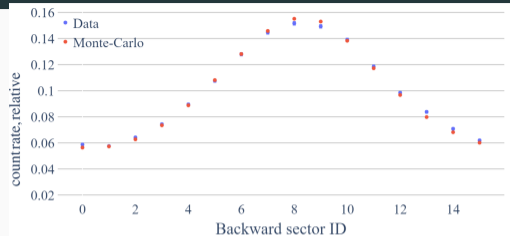
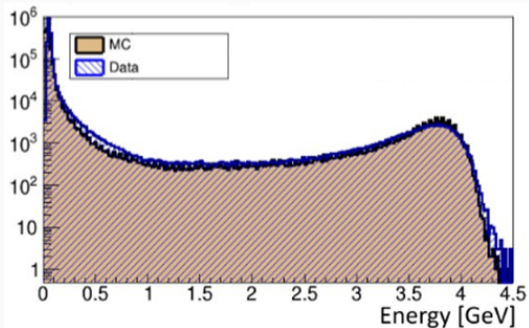
BH=DFE & DBE & Q

based on all FE_i and BE_i

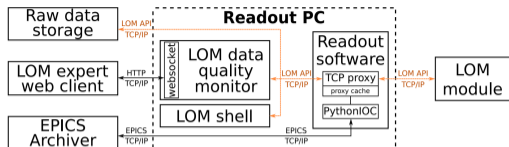
500 ns

Моделирование

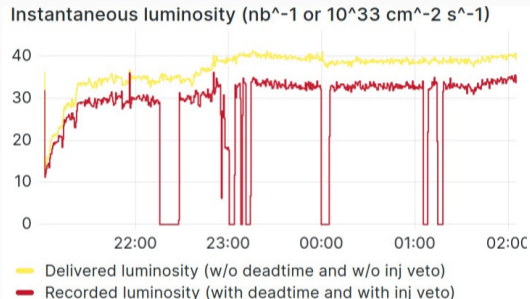
- $L = \frac{\Delta N / \Delta T}{\sigma_{vis}}$
- σ_{vis} - определяется из моделирования
- $\sigma_{vis}^{e^+e^-} = 28.46 \pm 0.28 nb$
- $\sigma_{vis}^{\gamma\gamma} = 0.92 \pm 0.01 nb$
- $\sigma_{vis} = 29.38 \pm 0.29 nb$
- Систематическая погрешность $\approx 1\%$

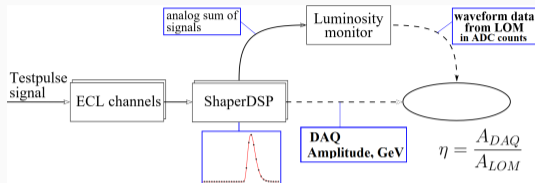


Source	Uncertainty, %			Comment		
ECL position	Source	Uncertainty, %	Comment	Source	Uncertainty, %	Comment
	ECL position	0.8	± 5 mm	ECL position	0.8	± 5 mm
	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty
	Calibration	0.3	$\pm 5\%$	Calibration	0.3	$\pm 5\%$
	Total	1.0		Total	1.0	
Simulation accuracy	Source	Uncertainty, %	Comment	BhabhaYaga@NLO uncertainty		
	ECL position	0.8	± 5 mm			
	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty			
	Calibration	0.3	$\pm 5\%$			
	Total	1.0				
Calibration	Source	Uncertainty, %	Comment	Source	Uncertainty, %	Comment
	ECL position	0.8	± 5 mm	ECL position	0.8	± 5 mm
	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty
	Calibration	0.3	$\pm 5\%$	Calibration	0.3	$\pm 5\%$
	Total	1.0		Total	1.0	
Total	Source	Uncertainty, %	Comment			
	ECL position	0.8	± 5 mm			
	Simulation accuracy	0.4	BhabhaYaga@NLO uncertainty			
	Calibration	0.3	$\pm 5\%$			
	Total	1.0				

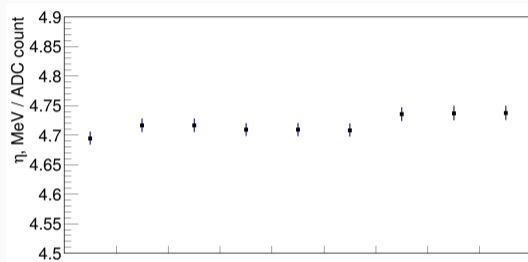


- Вычитывание данных из монитора светимости
- Вычисление светимости по данным счета событий монитором светимости
- Передача данных в систему медленного контроля
- Полностью независимо от DAQ



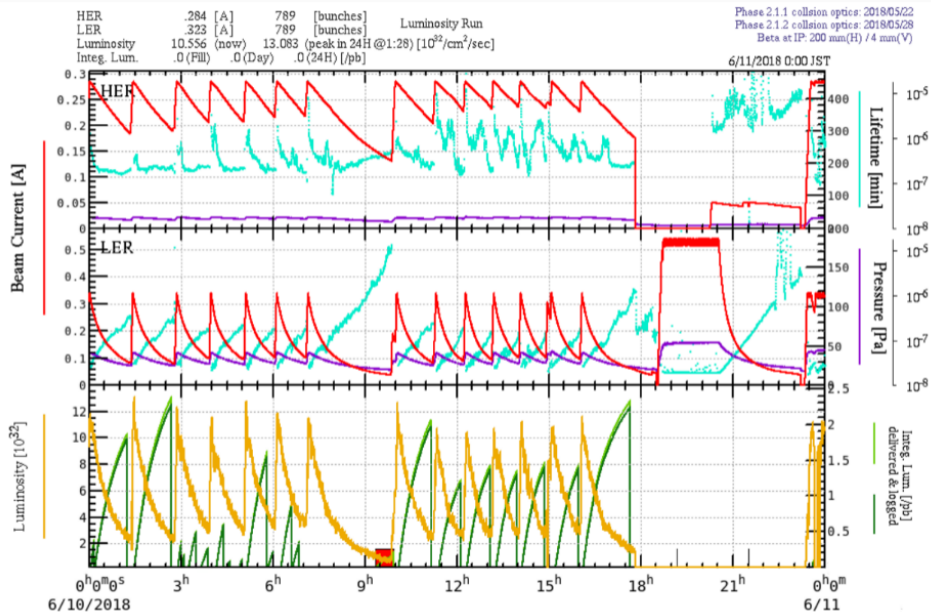


- Определение пьедесталов АЦП
- Определение цены канала АЦП а энергетических единицах
- Корректная установка порогов в МЭВ

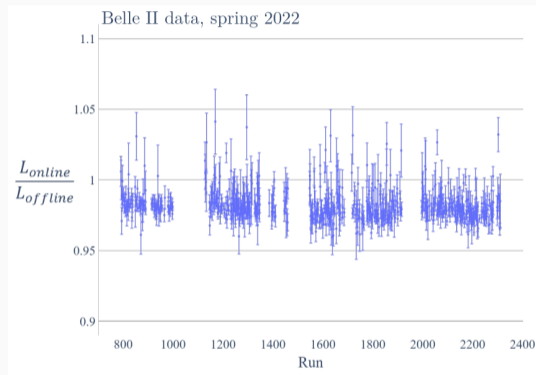


- Стабильность калибровки лучше 1%

LOM operations



- Offline измерение светимости по набранным данным с детектором Belle-II
- Используются события $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, зарегистрированные в цилиндрической части калориметра.
- Систематическая погрешность оффлайн измерений – 0.6%



- Служит основной системой измерения абсолютной величины светимости коллайдера в реальном времени
- Бестребойное и стабильное измерение светимости с 2018 года
- Статистическая погрешность определения мгновенного значения светимости, измеренной за 1 с, составляет 2.7% при текущей светимости $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Расхождение с offline измерениями светимости составило менее 2%