

Триггер В-физики во втором сеансе БАК в эксперименте ATLASВ. В. Синецкий^{1,2,*}, Л. Н. Смирнова¹¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2²Физический Институт РАН имени П. Н. Лебедева
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53

(Статья поступила 05.03.2018; Подписана в печать 13.03.2018)

В течение работы Большого адронного коллайдера (БАК) во втором сеансе Run 2 экспериментом ATLAS были зарегистрированы столкновения протонов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, отвечающие интегральной светимости 84 fb^{-1} . Отбор событий для физического анализа проводится с помощью триггерной системы установки. Триггерная система детектора ATLAS является ключевой компонентой эксперимента и служит для уменьшения потока данных с детектора с примерно 40 МГц до 1 кГц. В данной работе описаны система триггера и изменения, которые были внесены во время первой длительной остановки в 2013–2014 гг. и в процессе набора данных второго сеанса БАК.

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf УДК: 539.1.07

Ключевые слова: В-физика, триггер, ATLAS, БАК, LHC

ВВЕДЕНИЕ

Триггерная система является обязательным компонентом любого эксперимента в физике высоких энергий, где необходимо осуществлять отбор так называемых «интересных» с точки зрения физического анализа событий в условиях больших потоков данных. Во время первого сеанса Run 1 работы Большого адронного коллайдера (БАК), проведенного в период с 2009 г. по 2013 г., триггерная система эксперимента ATLAS [1] действовала достаточно эффективно в условиях пиковой светимости $L = 8 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и энергиях столкновения протонов в системе центра масс 7 и 8 ТэВ. С помощью триггера поток событий для анализа уменьшался в 2×10^4 . Во втором сеансе Run 2 (2015–2017 гг.) энергия протон–протонных столкновений была увеличена до 13 ТэВ и пиковая светимость достигла величины $L = 2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В результате среднее число протон–протонных взаимодействий при одном пересечении протонных сгустков (pile-up) увеличилось до 80 при возросших сечениях «интересных» событий. Это привело к увеличению потока данных со считывающей электроники детекторов, что, в свою очередь, потребовало внести изменения в систему триггера для корректного отбора событий и соответствия физическим задачам эксперимента. Во время первой длительной остановки БАК (LS1) между первым Run 1 и вторым Run 2 сеансами в 2013–2014 гг. и в процессе набора данных второго сеанса 2 были произведены модификации триггерной системы детектора ATLAS. В настоящей работе представлены основные изменения системы триггера детектора ATLAS, существенные для триггера В-физики.

1. ДЕТЕКТОР ATLAS

Детектор ATLAS представляет собой детектор общего назначения цилиндрической конструкции, имеющий 4π -геометрию. Основными компонентами установки являются внутренний детектор (Inner Detector, ID), окруженный сверхпроводящим соленоидом, обеспечивающим осевое магнитное поле 2 Т, калориметрическая система и мюонный спектрометр (Muon Spectrometer, MS) в магнитном поле, генерируемом тремя тороидальными магнитами.

Внутренний детектор (ID) обеспечивает реконструкцию треков в области $|\eta| < 2.5$ и состоит из трех подсистем: пиксельного детектора (Pixel Detector), полупроводникового микрострипового детектора (Semiconductor Tracker, SCT) и газонаполненного трекового детектора переходного излучения (Transition Radiation Tracker, TRT). Во время подготовки к сеансу Run 2 (LS1) в дополнение к уже имеющимся трем слоям пиксельного детектора для увеличения эффективности реконструкции первичных вершин был добавлен дополнительный слой пиксельных детекторов, так называемый В-слой (Insertable B-Layer, IBL) [2].

Калориметрическая система детектора ATLAS, предназначенная для измерения энергий элементарных частиц, охватывает область псевдобыстроты $|\eta| < 3.2$ и состоит из двух частей: электромагнитного калориметра на основе свинца и жидкого аргона и свинца $|\eta| < 3.2$ и адронного, построенного на технологии пластичного скинтиллятора и стали для $|\eta| < 1.7$ и жидкого аргона и свинца для $1.5 < |\eta| < 3.2$.

Мюонный спектрометр (MS) служит для идентификации мюонов, реконструкции их треков и прецизионного измерения импульсов. Спектрометр состоит из центральной, или барельной части, перекрывающей область псевдобыстроты $|\eta| < 1.7$

*E-mail: vv.sineckiy@physics.msu.ru

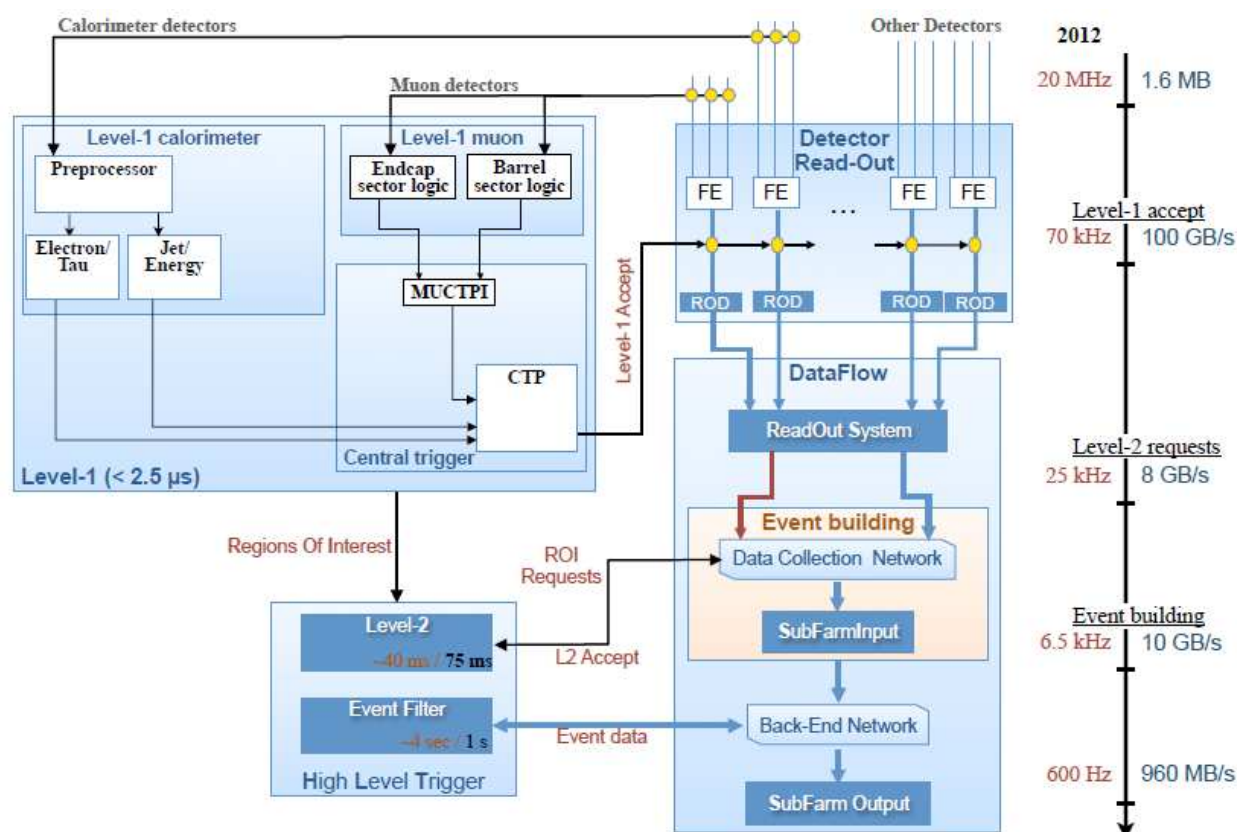


Рис. 1: Схема функционирования триггера и система съема данных ATLAS в сеансе Run 1 [5]

и двух торцевых секций для областей псевдобыстроты $1.05 < |\eta| < 2.7$. Камеры с резистивными пластинами (Resistive Plate Chambers, RPC) и тонкоззорные камеры (Thin Gap Chambers, TGC) служат для триггерного отбора мюонов в областях псевдобыстроты $|\eta| < 1.05$ и $1.0 < |\eta| < 2.4$ соответственно. Они также определяют координаты мюонов (η, ϕ). Мониторируемые дрейфовые трубки (Monitored Drift Tubes, MTD) и катодные полосковые камеры (Cathode Strip Chambers, CSC) используются для прецизионного измерения импульсов мюонов и координат их треков в областях $|\eta| < 2.7$ и $|\eta| > 2$ соответственно.

Триггер и система сбора данных осуществляют отбор нужных событий и исключение ненужных, а также обеспечивают запись данных в соответствующих форматах для их последующей обработки. Подробнее о данных системах будет сказано в следующей главе [3]. Важной частью триггерной системы является мюонный триггер [4].

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТРИГГЕРА

При подготовке ко второму сеансу, начавшемуся в 2015 г., триггер детектора ATLAS претерпел существенные изменения [5]. В первом сеансе триггер имел трехуровневую структуру, приведенную на рис. 1 [6].

Триггер первого уровня (Level-1, L1) работает с подмножеством информации от калориметра и мюонных детекторов и реализован на аппаратном уровне. Триггер второго уровня (Level-2, L2) и фильтр событий (Event Filter, EF) являются программными алгоритмами отбора событий. Последние два уровня во втором сеансе были объединены в триггер высокого уровня (High-Level Trigger, HLT). Благодаря этому появилась возможность динамического конфигурирования распределения ресурсов между ними, а также более гибкого комбинирования быстрых и прецизионных алгоритмов. Схема работы триггера и система сбора данных для второго сеанса представлены на рис. 2.

Система сбора данных отвечает за транспортировку информации от электроники считывания до записи её на диск для последующей оффлайновой обработки и физического анализа.

Триггер первого уровня получает информацию от калориметров и мюонного спектрометра (камер RPC и TGC), осуществляя отбор событий, например, с большими потерями электромагнитной энергии или треки мюонов с большими p_T ($\gtrsim 1$ ГэВ). Параллельно информация с электроники считывания поступает на временное хранение в буферы (Front-End buffers, EF), где хранится некоторое время, равное времени работы L1 триггера $\sim 2,5$ мкс, пока не будет дана команда на считывание, либо на исключение данной ин-

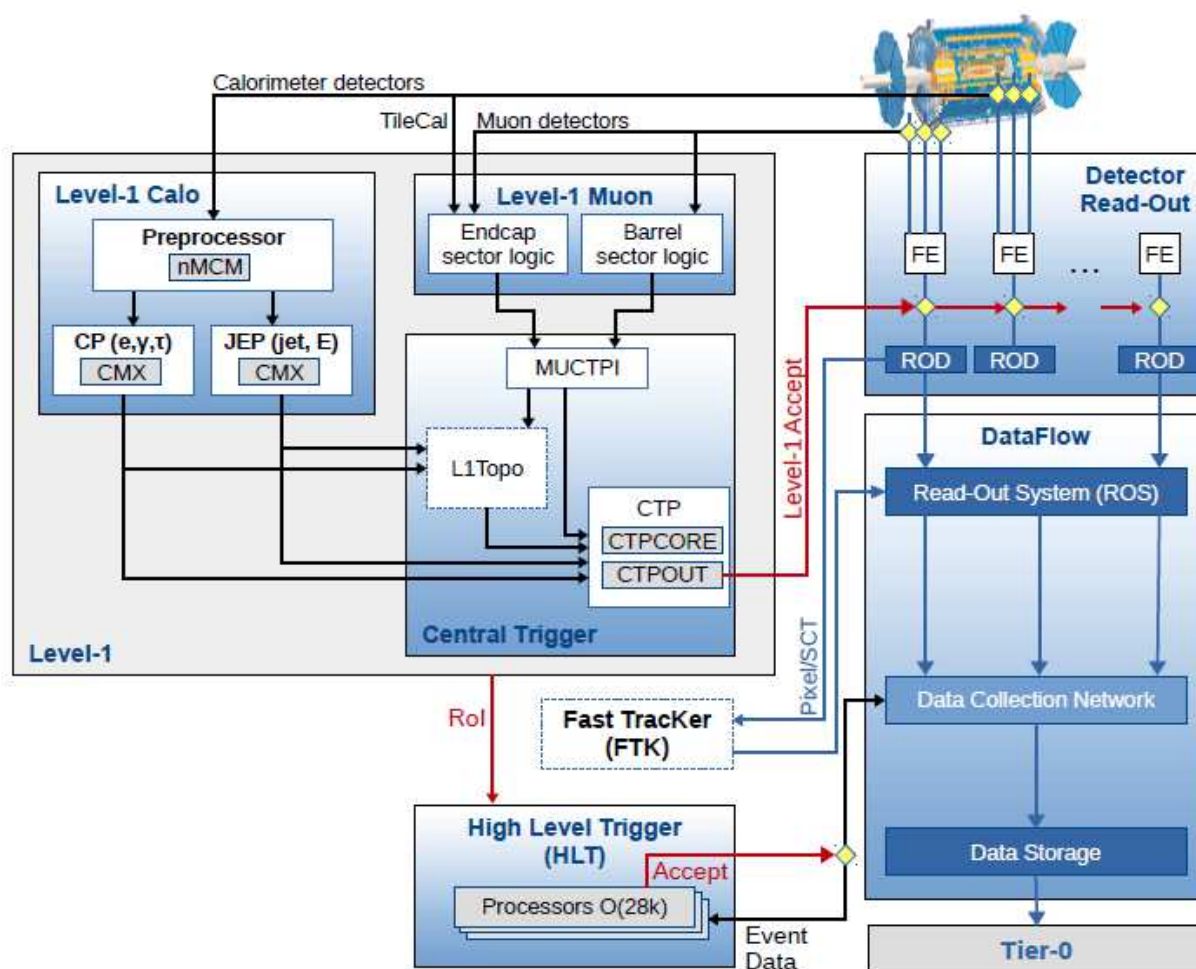


Рис. 2: Схема функционирования триггера и система съема данных ATLAS в сеансе Run 2 [7]

формации из дальнейшего анализа. После идентификации информация об этих характеристиках собирается и отправляется в центральный триггер, где объединяется, и результат сравнивается с 256 программируемыми триггерными элементами, представляющими собой требования к характеристикам найденных объектов. Все вычисления, необходимые для этого, осуществляются центральным триггерным процессором (Central Trigger Processor, CTP). В сеансе Run 2 в дополнение к CTP добавлен так называемый топологический процессор (L1Topo), который позволяет вычислять характеристики комбинаций объектов, такие как угловое расстояние и инвариантная масса двух объектов.

Таким образом, если условия триггера выполнены, то инициируется считывание информации с FE и её обработка посредством драйверов считывания субдетекторов (Read-Out Drivers, RODs) с последующей передачей в систему считывания (Read-Out System, ROS), где информация временно хранится до тех пор, пока её не запросит триггер высокого уровня (HLT). В то же время, отдельно для каждого из объектов, прошедших

триггер L1, формируется так называемая область интереса (Region of Interest, RoI) — область детектора вокруг зарегистрированного объекта, определяемая диапазонами координат (η, ϕ) . Впоследствии координаты области интереса подаются на вход в триггер высокого уровня HLT (в сеансе Run 1 конкретно на L2). Триггер первого уровня позволяет снизить частоту отбираемых событий с номинальной частоты столкновения пучков 40 МГц (реальное значение в сеансе Run 1 — 20 МГц) до 65–70 кГц. В сеансе Run 2 — до 100 кГц.

В сеансе Run 1 триггер L2 получал данные из ROS, которые соответствовали элементам детектора внутри сформированных триггером L1 RoI. В результате обрабатывалось 2–6% данных от всего их объёма. Информация на L2 поступала со всех систем детектора, в том числе и ID. На данном уровне триггера происходила реконструкция треков посредством специальных программных алгоритмов. После прохождения триггера L2 частота событий снижалась до 3–6 кГц. Время принятия решения составляло порядка нескольких десятков миллисекунд (до 40 мс). Далее производилось

так называемое построение событий (Event Building), то есть создание структуры данных для последующей их обработки фильтром событий (Event Filter). На данном этапе проводилась полная реконструкция событий с помощью алгоритмов, близких к оффлайновым, таким образом, чтобы время принятия решения составляло 1 с. Триггер EF понижал частоту событий до величины 700–1000 Гц.

В сеансе Run 2, как было сказано выше, фермы триггеров L2 и EF объединены. Таким образом, данные из системы считывания (ROS) совместно с RoI поступают на вход триггера HLT и преобразуются непосредственно в нем: никакого построения событий (Event Building) не происходит. Функции, выполняемые триггером высокого уровня в Run 2, остаются теми же, что и в Run 1. Однако помимо треков, реконструированных непосредственно в HLT, триггер высокого уровня может считывать из ROS треки, реконструированные электроникой быстрого трекинга (Fast TraCking, FTK) [8, 9].

Быстрый трекер (FTK) представляет собой систему электроники, которая проводит глобальную реконструкцию треков для событий, прошедших триггер первого уровня L1. Иными словами, FTK реконструирует треки во всей области детектора, а не только в RoI, как это делает триггер высокого уровня HLT. Создание быстрого трекера является одним из основных элементов модернизации триггера во втором сеансе работы БАК. С помощью данной электроники реконструируются треки с $p_T > 1$ ГэВ за время 100 мкс. Таким образом, быстрый трекер позволяет триггеру высокого уровня преодолевать аппаратные ограничения, связанные с увеличением потока данных, и оставить время для более усложненного отбора событий. Быстрый трекер является высокопараллельной аппаратной системой, использующей информацию со всех 12 слоёв внутреннего детектора ID, а именно: с четырех слоёв пиксельного детектора (Pixel), включая вставной В-слой (IBL) и восьми слоёв полупроводникового микрострипового детектора (SCT). Сейчас проходят пусконаладочные работы данной электроники, окончательно эта система будет интегрирована к началу сеанса Run 3 (2020–2022 гг.).

3. ТРИГГЕР В-ФИЗИКИ

Исследования физики b -адронов в эксперименте ATLAS основаны на использовании триггера B -физики. Отбор событий для B -физического анализа осуществляется путем идентификации распадов b -адронов, включающих пару мюонов в конечном состоянии, имеющих низкие p_T (2–12 ГэВ) [10]. Примерами каналов, с которыми работает B -физика, являются распады с чармонием $B \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)X$, редкие распады $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ и полупертоновые $B \rightarrow \mu^+\mu^-X$.

Триггер, осуществляющий отбор событий B -физики, включает несколько алгоритмов, реализован-

ных в триггере высокого уровня. Основным типом триггеров, используемых для изучения такого типа адронов являются, так называемые, димюнные триггеры. Они требуют идентификации двух противоположно заряженных мюонов в триггере L1, которые затем подтверждаются на HLT, а их треки привязываются к общей вершине. События принимаются, если инвариантная масса пары появляется в окне, соответствующему заданному типу распада. Используются следующие массовые окна:

- для сигналов $B \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)X$ интервал 2.5–4.3 ГэВ;
- для сигналов $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ интервал 4.0–8.5 ГэВ;
- для сигналов $\Upsilon(nS) \rightarrow \mu^+\mu^-$ интервал 8.0–12.0 ГэВ.

На рис. 3 представлены спектры инвариантной массы пар мюонов, выбранных различными триггерами.

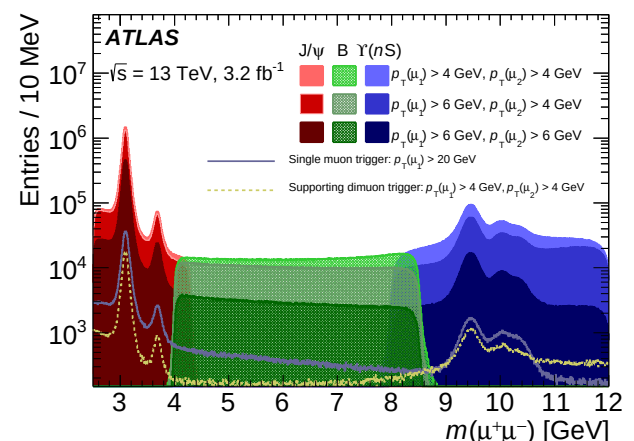


Рис. 3: Спектр инвариантных масс пар противоположно заряженных мюонов, отбираемых различными димюнными триггерами. Триггеры, предназначенные для различных инвариантных массовых окон, проиллюстрированы разными цветами, а разные пороговые значения для поперечных импульсов обоих мюонов показаны с различными оттенками. Сплошная линия показывает спектр масс мюонной пары для событий, выбранных одним мюонным триггером с порогом 20 ГэВ [7]

Проблемой димюнного триггера является необходимость идентификации двух отдельных RoI в триггере L1. В то время как если угловое расстояние между мюонами такое, что триггер L1 не может разрешить их как отдельные и формирует только одну область интереса RoI. Чтобы избежать потерь событий по этой причине, используется дополнительный одномюнный триггер, отбирающий сигнатуры с высоким порогом p_T . На уровне триггера L1, как говорилось выше, введен топологический процессор для анализа характеристик пар мюонов L1Торо. Данные, представленные в левой

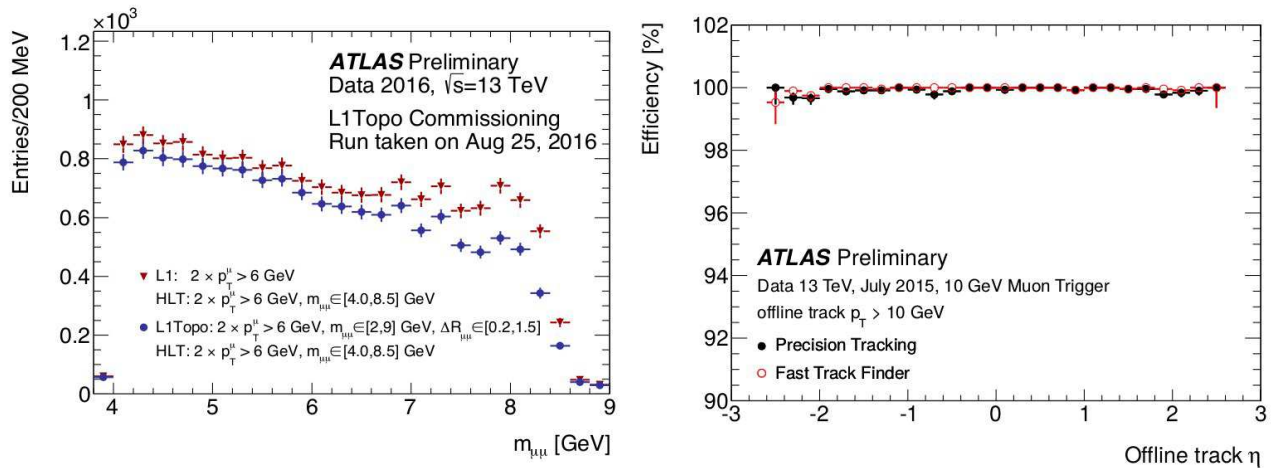


Рис. 4: На левом рисунке показаны распределения инвариантной массы пары противоположно заряженных мюонов, реконструированных оффлайн, для номинальной триггерной цепочки HLT (треугольники) и эквивалентной этой же HLT цепочки с дополнительными требованиями, накладываемыми L1Торо (круги). На правом рисунке изображены эффективности реконструкции треков во внутреннем детекторе ID для мюонов с $p_T > 10$ ГэВ от псевдобыстроты. [11, 12]

части рис. 4, показывают результаты его работы. Видно, что достигается уменьшение потока событий, отбираемых триггером B -физики [11]. Также первые результаты работы быстрого трекера FTK в 2015 г., показанные в правой части рис. 4, дают основания полагать, что эффективность реконструкции им треков частиц является не хуже, чем эффективность реконструкции треков в HLT [12].

Помимо димюонного триггера был разработан алгоритм отбора полулептонных распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$, например таких как $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^{(*)+} (\rightarrow K^+ K^- \pi^+)$, для реконструкции которых в дополнение к паре мюонов осуществляется поиск дополнительных треков во внутреннем детекторе ID, которые затем объединяются и фитируются в общую вершину. Эти триггеры продолжают работу в сеансе Run 2 и будут использованы для анализа новых данных.

В рабочем режиме мюонный триггер с низким порогом включается в тот момент набора событий, когда светимость пучка падает в два раза.

В настоящее время с увеличением светимости используются дополнительные методы подавления потока событий B -физики:

1. повышение порога значения поперечного импульса одного из мюонов, например, $p_T^{\mu_1} > 10$ ГэВ;
2. искусственное снижение частоты событий, так называемое деление частоты (prescale). Вводится коэффициент частоты деления N . Это означает, что только каждое N -ное событие, прошедшее отбор триггером, сохраняется для последующего анализа.

При сборе данных в 2015 г. потоки димюонных триггеров L1 определялись самыми низкими порогами поперечного импульса мюона для основных триггеров B -физики. Триггеры HLT на основе триггера L1_2MU4, требующего $p_T > 4$ ГэВ для каждого мюона, не подвергались делению частоты вплоть до уровня мгновенной светимости $L = 4 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При более высоких светимостях к данному триггеру применялось деление частоты и в качестве дополнения использовались трёхмюонный триггер L1_MU6_2MU4, не подвергавшийся делению частоты, и триггеры с высокими порогами p_T L1_2MU6 и L1_2MU10. На рис. 5 показаны потоки данных с триггеров L1 и HLT как функции мгновенной светимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время первой длинной остановки БАК (LS1) была проведена модернизация триггерной системы эксперимента ATLAS для работы в условиях увеличения светимости, превышающей планировавшуюся при создании детектора. В систему триггера первого уровня L1 добавлен дополнительный топологический процессор L1Торо, объединены триггеры второго L2 и третьего EF уровней в триггер высокого уровня HLT. Для реконструкции треков создан быстрый трекер FTK. Продолжаются работы по внедрению быстрого трекера в общую систему триггера, в том числе и в триггер B -физики.

[1] ATLAS Collaboration JINST. 2008. **3**. S08003.

[2] ATLAS Collaboration ATLAS-TDR-19-ADD-1. 2012.

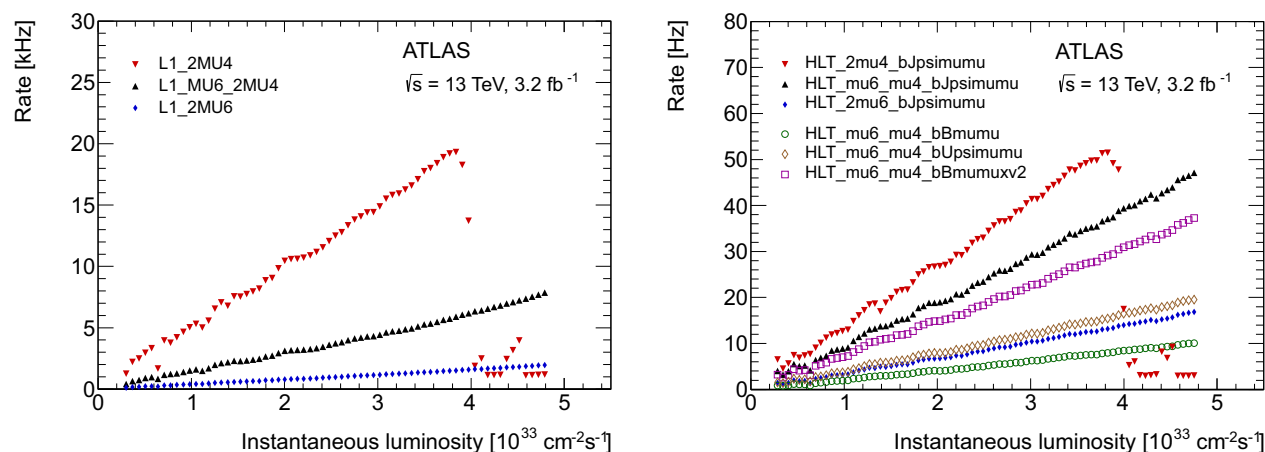


Рис. 5: Потоки данных для (левый рисунок) димьюонных триггеров L1 для различных p_T и (правый рисунок) основные HLT триггеры B -физики как функция мгновенной светимости. На правом рисунке последняя часть названия триггера означает, что пара мюонов фитируется в общую вершину с инвариантной массой, равной частице, которая указана перед ними после символа b . Например, HLT_mu6_mu4_bJpsimumu требует, чтобы два мюона с $p_T > 6$ и 4 ГэВ имели инвариантную массу в окне J/ψ . Так как триггер L1_2MU4 был подвержен делению частоты при светимости выше $L = 4 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, поток триггера HLT_2mu4_bJpsimumu снизился при данной светимости [7]

- [3] ATLAS Collaboration Eur. Phys. J. C. 2012. **72**. P. 1849.
 [4] Болдырев А. С., Маевский А. С., Лобанов С. Ю., Сивоклоков С. Ю., Смирнова Л. Н., Турчikhин С. М. Ядерная физика и инжиниринг. 2013. **4**, №. 9-10, С. 894.
 [5] ATLAS Collaboration ATLAS-TDR-023. 2013.
 [6] ATLAS Collaboration JINST. 2016. **11**. P06008.
 [7] ATLAS Collaboration Eur. Phys. J. C. 2017. **77**. P. 317.
 [8] ATLAS Collaboration ATLAS-TDR-021. 2013.
 [9] ATLAS Collaboration EPJ Web of Conferences. 2017. **137**. 12001.
 [10] Smirnova L. N., Turchikhin S. M. Phys. Part. Nucl. 2017. **48**, №. 5. P. 801.
 [11] ATLAS Collaboration ATL-DAQ-PUB-2017-001. 2017.
 [12] ATLAS Collaboration ATL-DAQ-PUB-2016-001. 2016.

B-Physics Trigger of the ATLAS Experiment in Run 2

V. V. Sinetckii^{1,2a}, L. N. Smirnova¹

¹Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow 119991, Russia

²P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
 Moscow 119991, Russia

E-mail: ^avv.sineckiy@physics.msu.ru

During the Run 2 of the LHC the ATLAS experiment recorded about 86 fb^{-1} of proton-proton collision data at a center-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$. The trigger system of the ATLAS detector is an important component for this experiment and is necessary to reduce the data stream from about 40 MHz to 1 kHz. This article is an overview of the changes that the trigger experienced during the first long stop (LS1) in 2013–2014.

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf.

Keywords: B-physics, trigger, ATLAS, LHC.

Received 05 March 2018.

Сведения об авторах

1. Синецкий Виктор Владимирович — аспирант; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: vv.sineckiy@physics.msu.ru.

2. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: lns@physics.msu.ru.