

Исследование
 $R(K^*)$
аномалии в
эксперименте
ATLAS на БАК

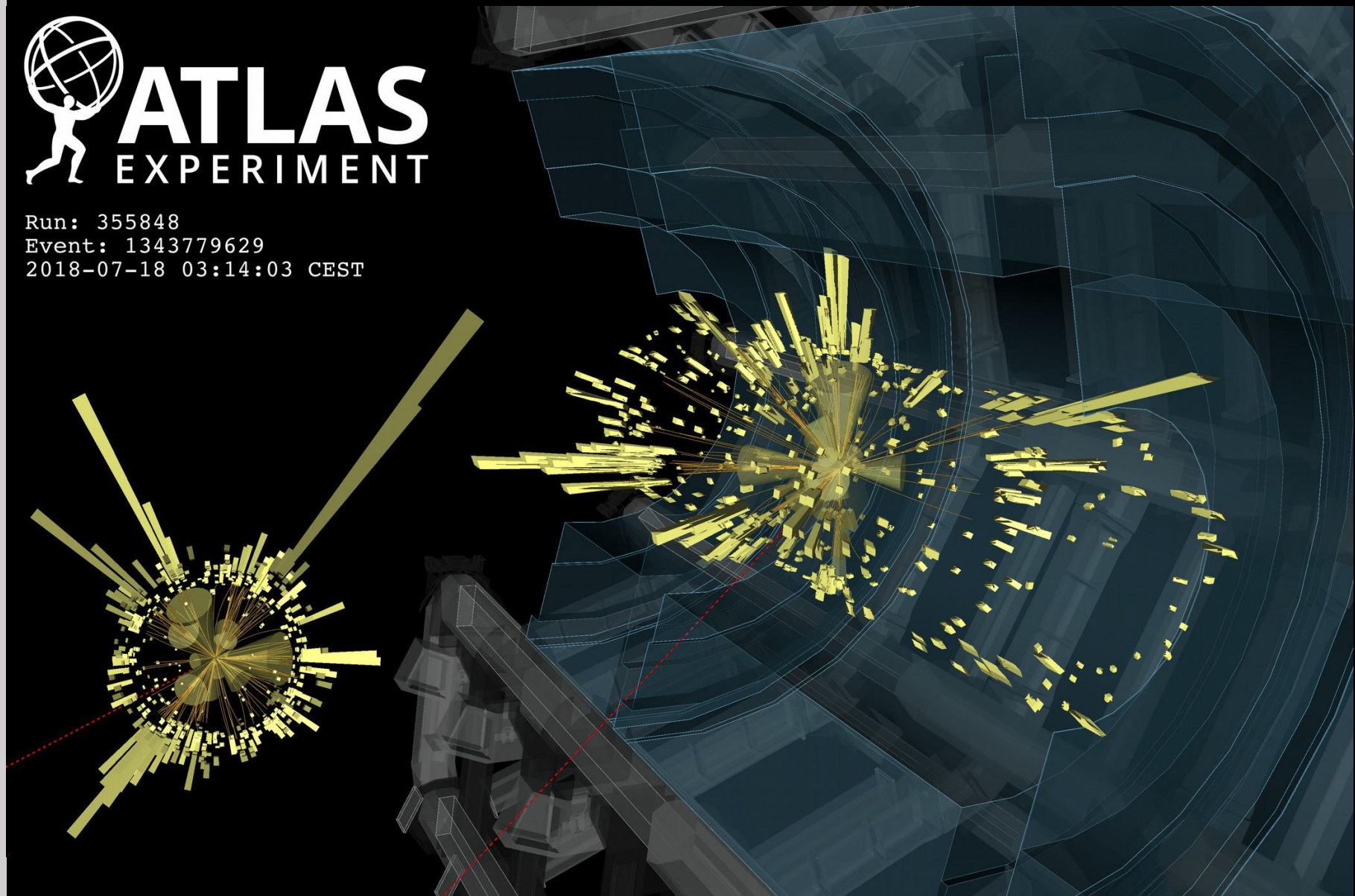
Виктор Синецкий



25.06.2020



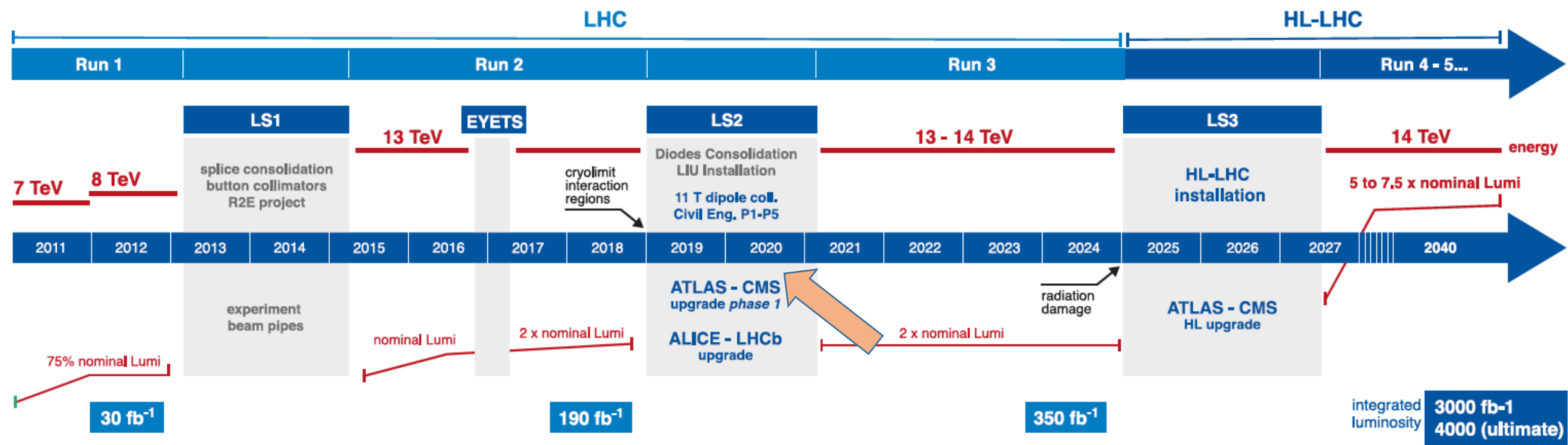
Run: 355848
Event: 1343779629
2018-07-18 03:14:03 CEST



План работы БАК



LHC / HL-LHC Plan



HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:

DESIGN STUDY



PROTOTYPES

CONSTRUCTION

INSTALLATION & COMM.

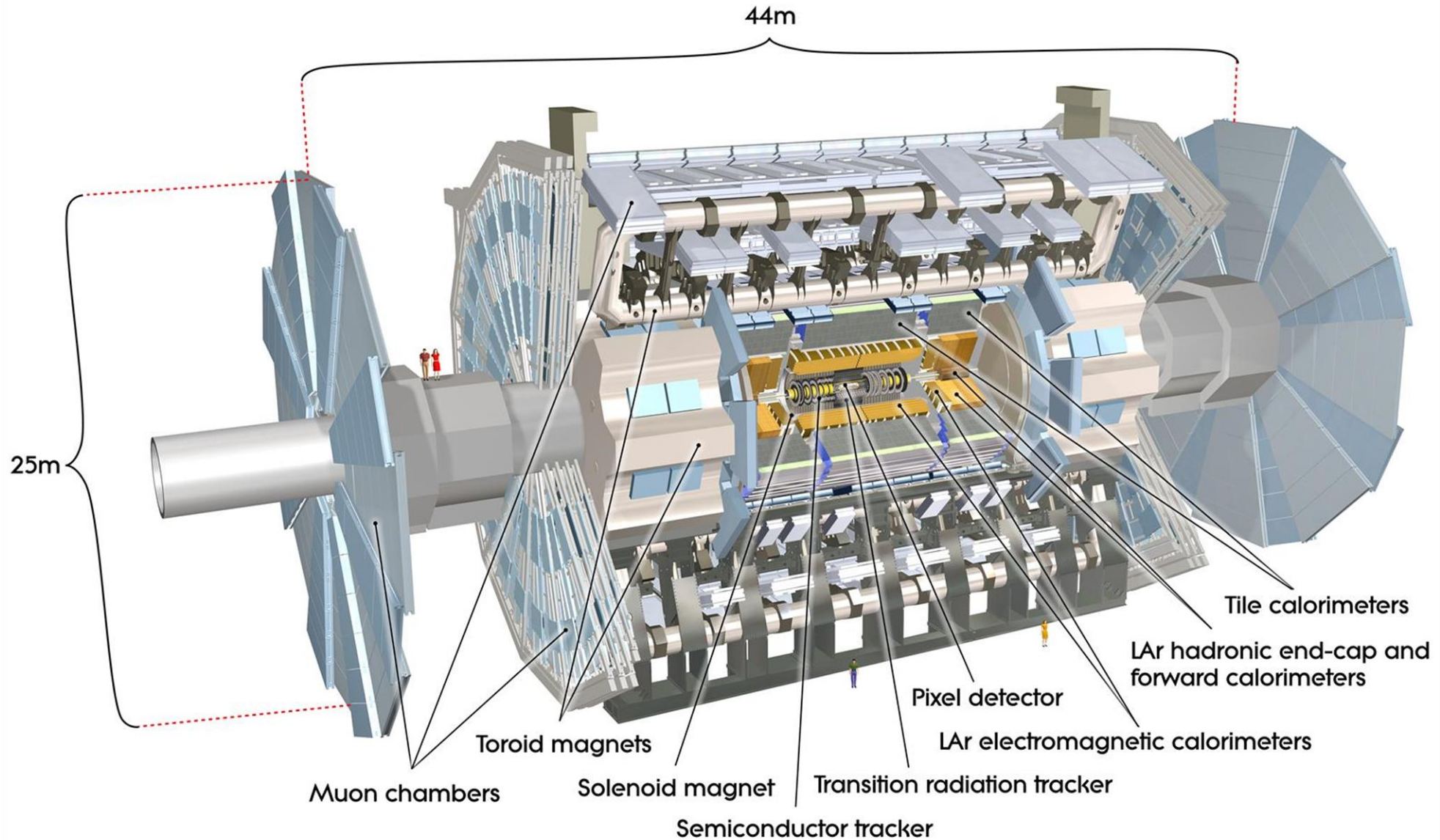
PHYSICS

HL-LHC CIVIL ENGINEERING:

DEFINITION

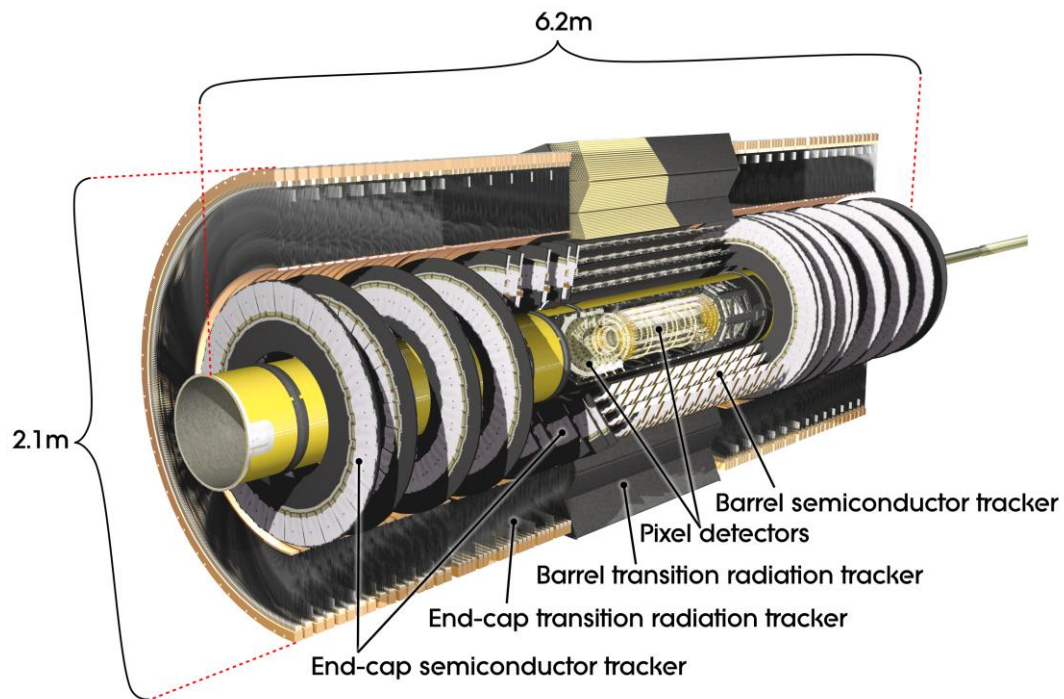
EXCAVATION / BUILDINGS

Конструкция детектора ATLAS



Конструкция детектора ATLAS

- Мюоны идентифицируются с помощью комбинированного мюонного спектрометра и внутреннего детектора:
 - Треки внутреннего детектора (от мюонов) обеспечивают точные измерения импульса и времени жизни для рассматриваемого здесь диапазона импульсов



Muon Spectrometer

Toroid B-Field, average 0.5 T

$|\eta|(\text{max})$ 2.7

Track momentum resolution $\sigma/p < 10\%$ up to 1 TeV

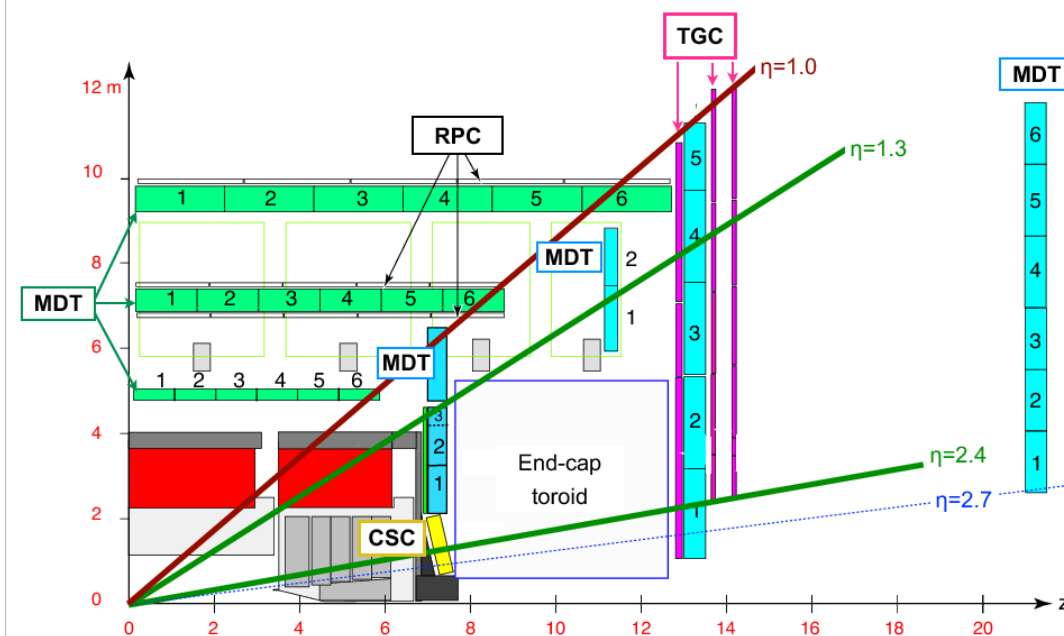
Inner Detector

Axial Magnetic field 2 T

Track momentum resolution σ/p_T^2 $\sim 0.05\% p_T + 0.015$
[GeV]⁻¹

$|\eta|(\text{max})$ 2.5

Lifetime resolution ~ 100 fs



Режим набора данных

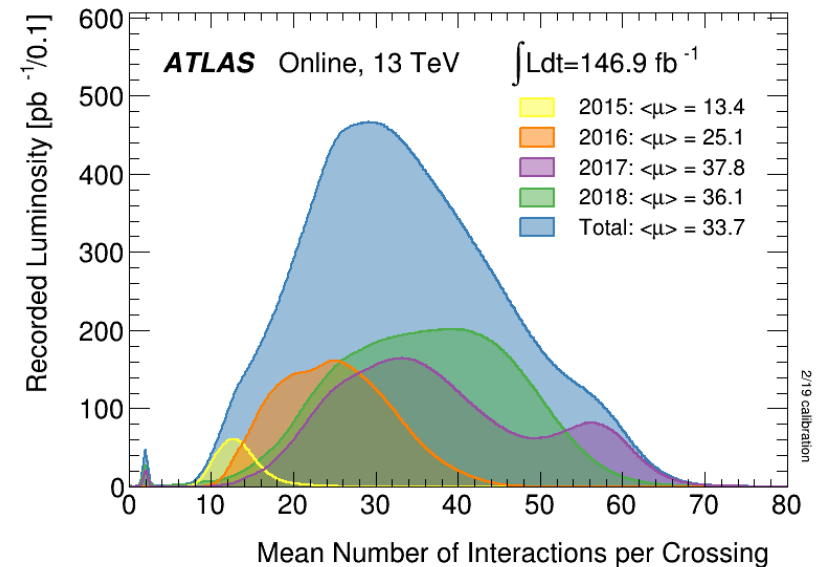
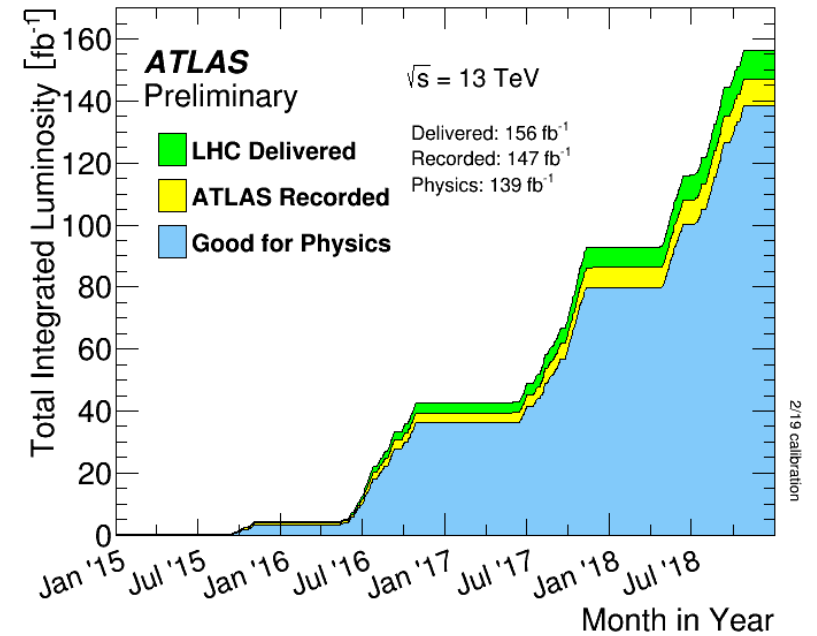
→ 156 fb⁻¹ данных (pp соударений) доставлено;
147 fb⁻¹ записано;
139 fb⁻¹ 'хорошо для физики'

→ Предварительная погрешность 1.7 %
(ATLAS-CONF-2019-021)

→ Эффективность сбора данных > 93%

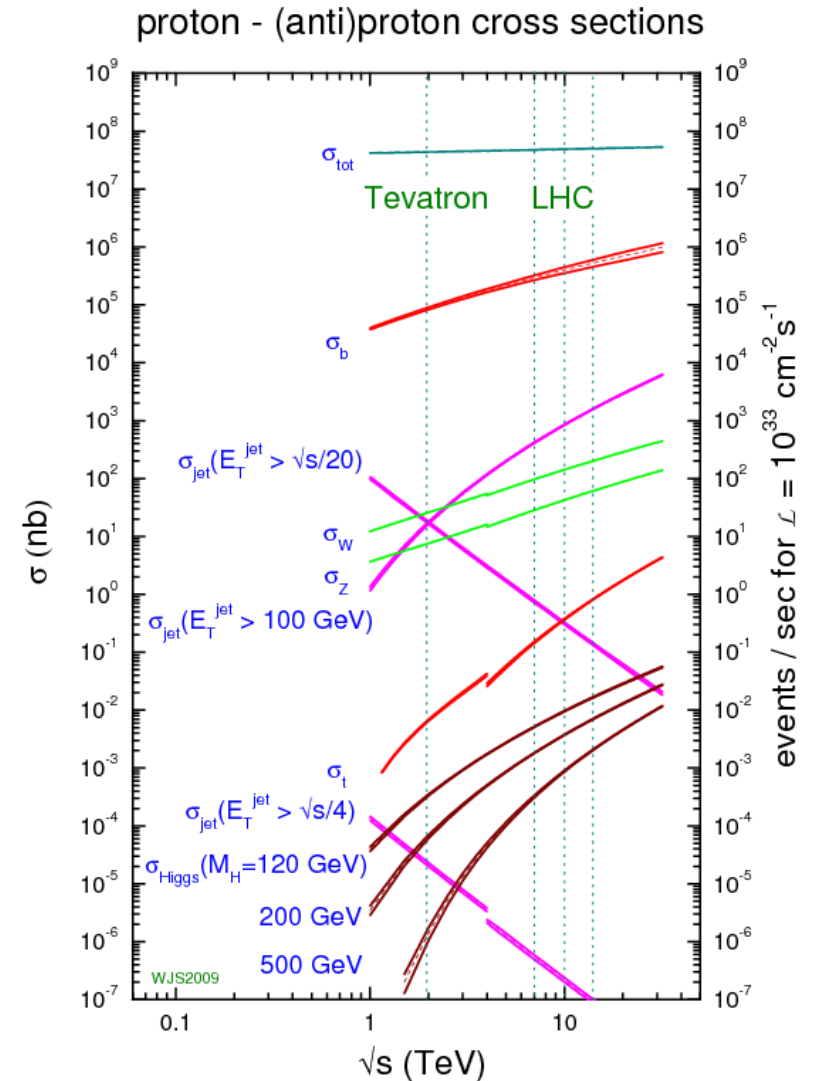
→ В-физика чувствительна к правильному выбору вершины первичного взаимодействия

- Пиковая светимость: $2.1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Среднее число взаимодействий: 33.7



Программа В-физики

- **Проверка предсказаний КХД.** Высокая степень наложения событий и низкие p_T В-адронов → ATLAS использует полностью реконструированные распады в трекинговой системе, как минимум один мюон в конечном состоянии для эффективного отбора:
 - Получение тяжелых ароматов (кварконий, В-адроны, новые/экзотические состояния);
 - Прецизионные измерения ($B_s \rightarrow J/\psi\phi$, $\Lambda_b \rightarrow J/\psi\Lambda$);
 - Редкие распады ($B_{(s)} \rightarrow \mu\mu$, $b \rightarrow s\mu\mu$);
 - ...
- **Уточнение параметров Стандартной Модели** (матрица СКМ, параметры CP-нарушения).
- **Средство косвенных поисков Новой Физики.** Большая часть программы В-физики эксперимента ATLAS включает редкие распады, точность по-прежнему статистически ограничена → увеличение статистики на HL/HE-LHC может привести к значительным улучшениям. Редкие процессы с петлевыми диаграммами чувствительны вкладам новых тяжёлых частиц, по отклонениям от СМ можно судить о наличии таких вкладов.



Триггер В-физики

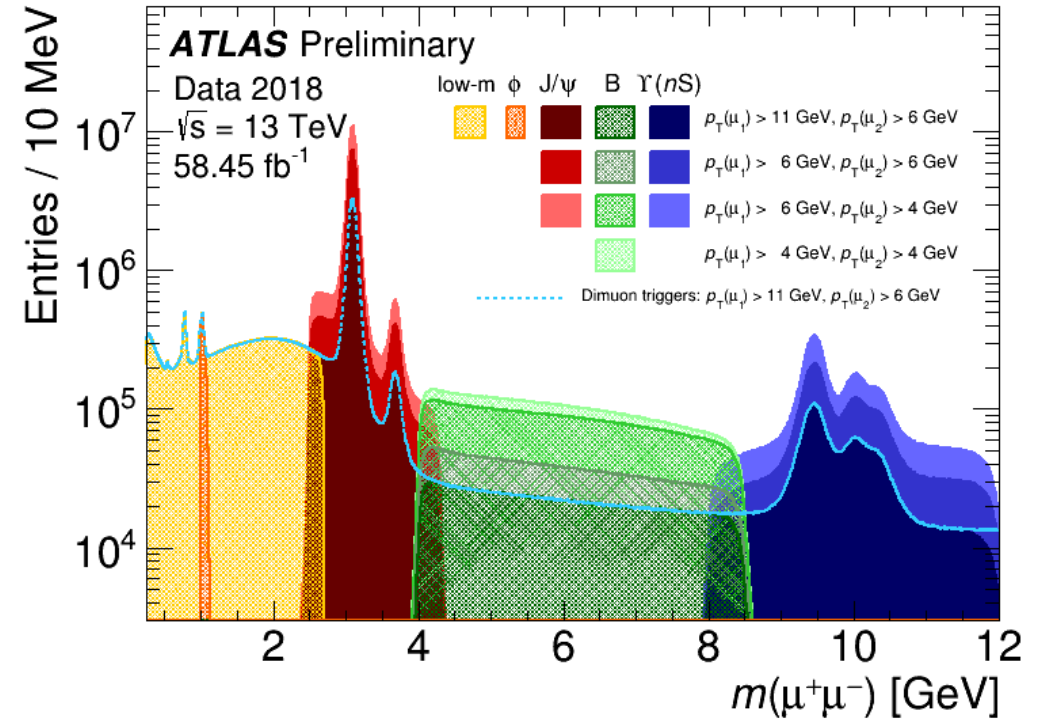
Основные типы триггеров (HLT)

• Димюонный

- для сигналов $B \rightarrow J/\psi X$ ($J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$) 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.

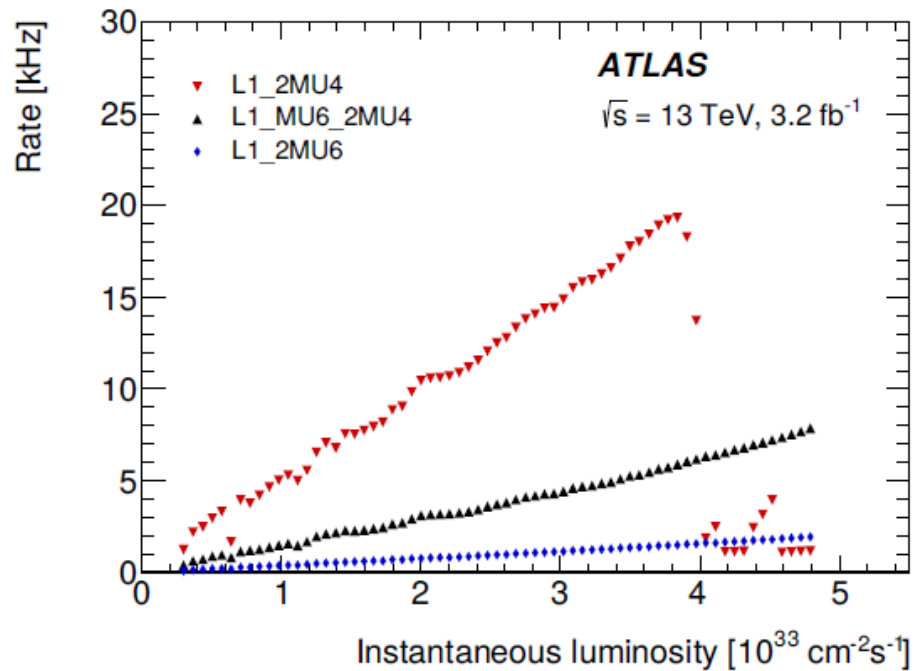
• $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ – подобные

- $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0}$
- $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi$
- $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^{(*)+} (K^+ K^- \pi^+)$

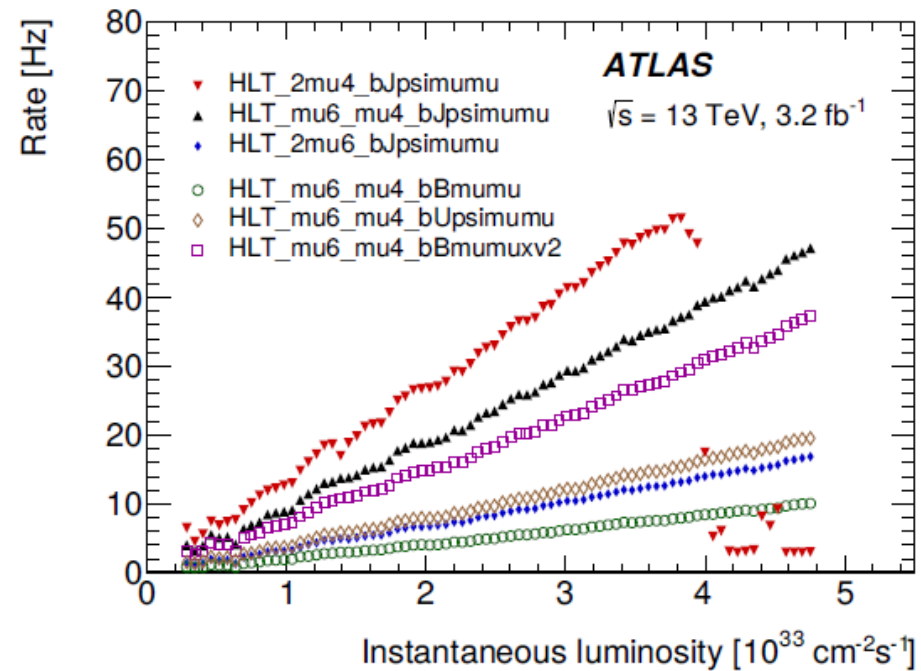


Программа В-физики

- основана в основном на димюонной сигнатуре
- большинство анализов статистически ограничены



(a)

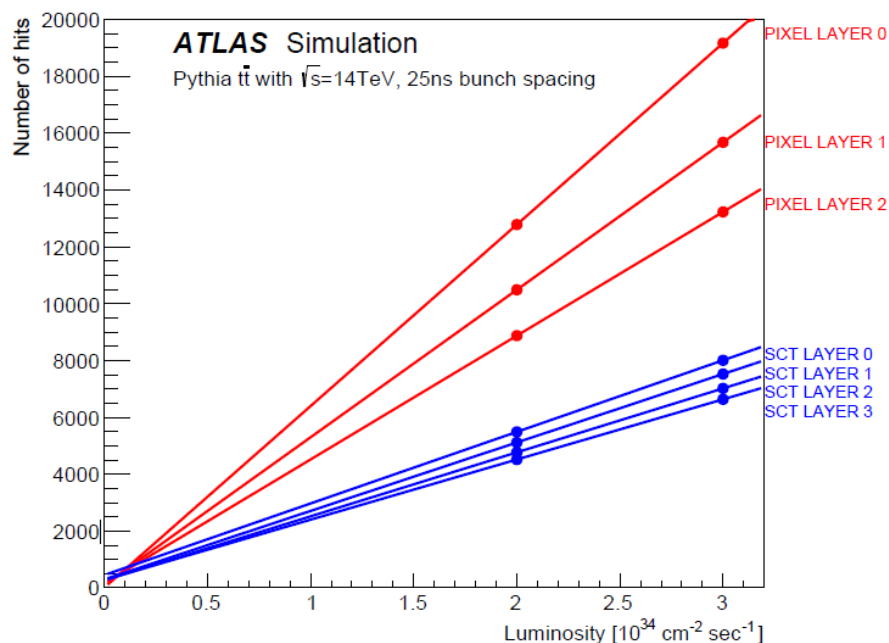


(b)

Потоки данных для (левый рисунок) димюонных триггеров L1 для различных рТ и (правый рисунок) основные HLT триггеры В–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 рТ > 6 и 4 ГэВ имели инвариантную массу в окне J/ψ . Так как триггер [L1_2MU4](#) был подвержен делению частоты при светимости выше $L = 4 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, поток триггера [HLT_2mu4_bJpsimumu](#) снизился при данной светимости

Необходимость усовершенствования триггера

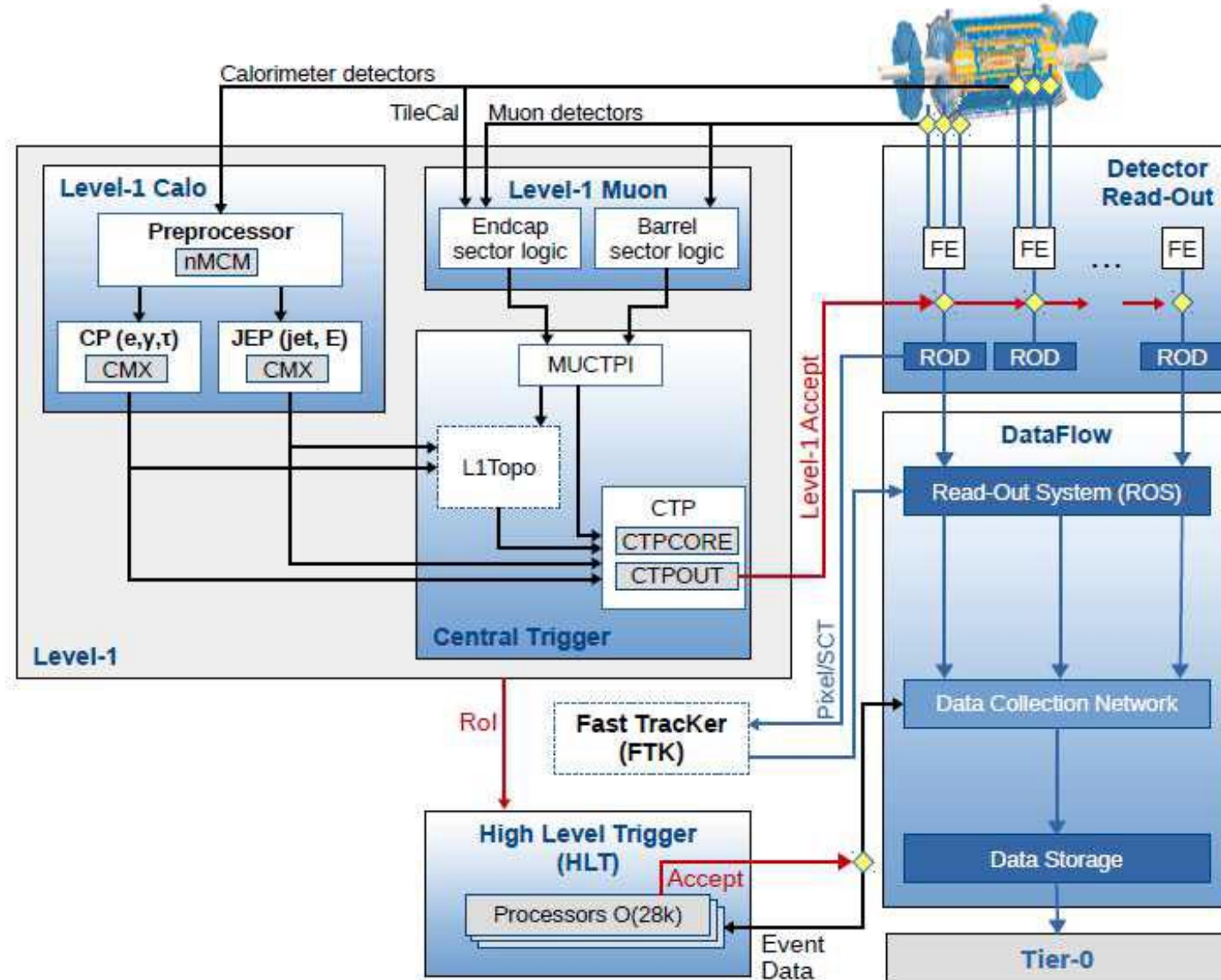
Обработка потока данных при светимости порядка $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ является серьёзной проблемой. График показывает число срабатываний в барельевой области для каждого пиксельного слоя Pixel и кремниевого слоя SCT как функцию светимости.



Моделирование рождения $t\bar{t}$ при энергии столкновения $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$

Увеличение светимости →
больше срабатываний
детектора (PIXEL, SCT) →
больше данных для
обработки → электроника
не справляется →
модернизировать

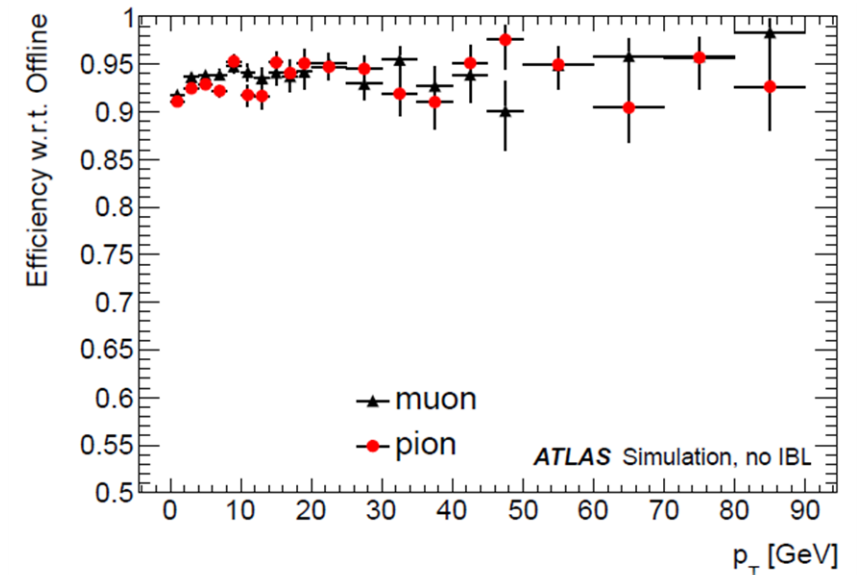
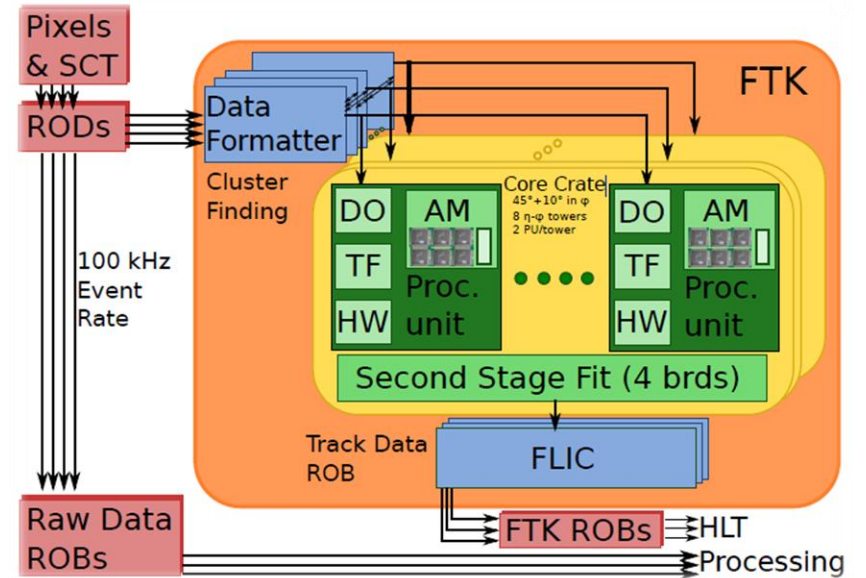
Схема триггера в сеансе Run 2



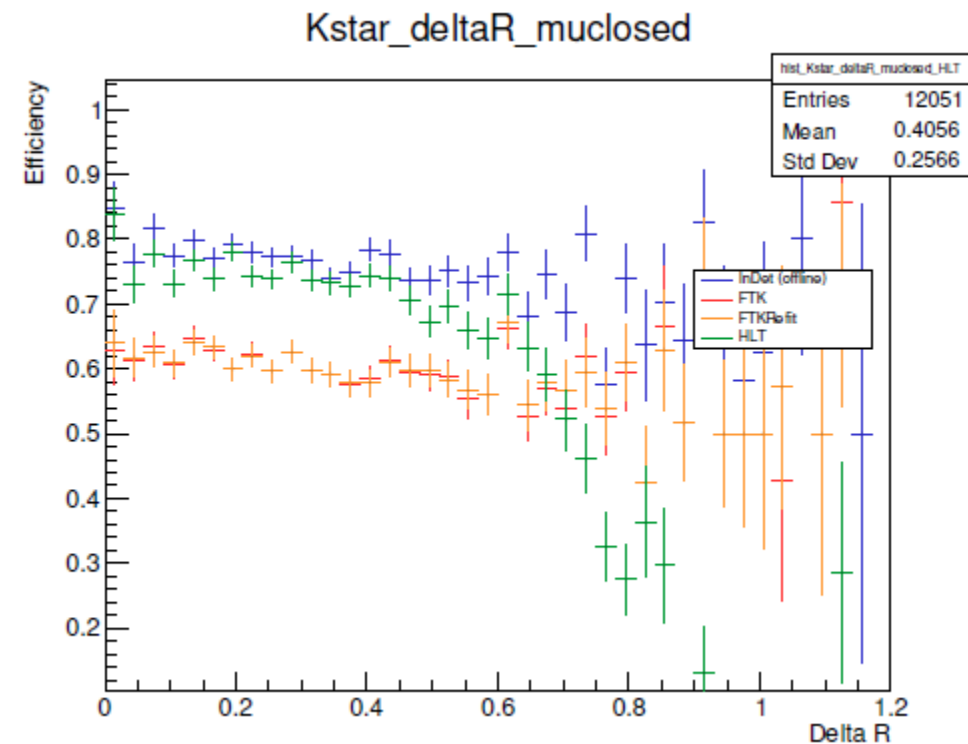
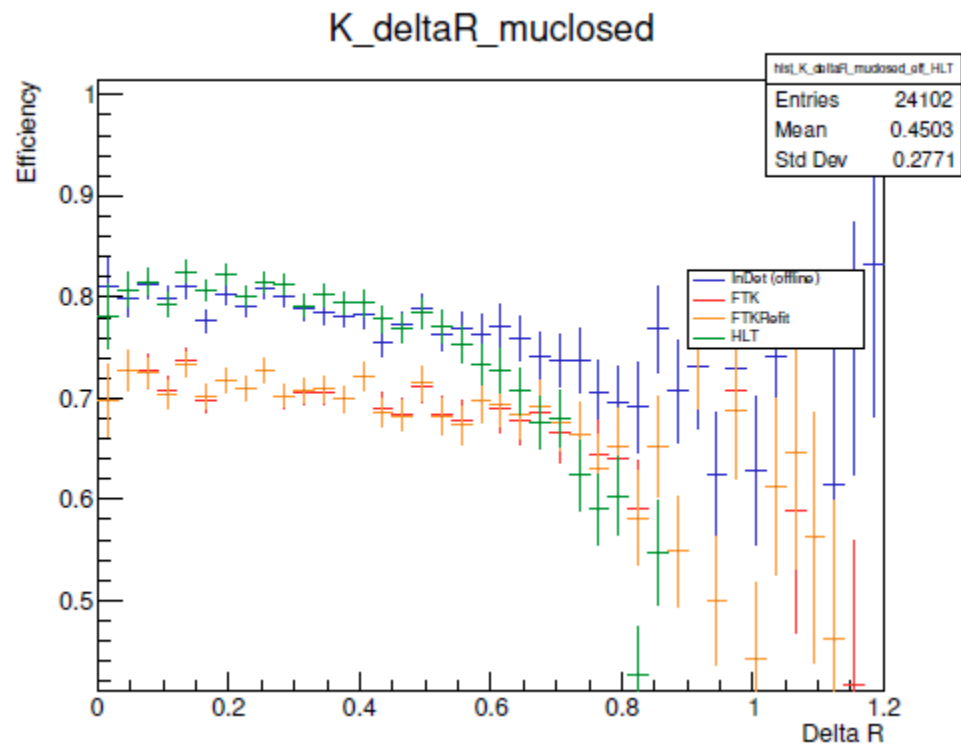
Быстрый трекер (FTK)

FTK – это система электроники, которая проводит глобальную реконструкцию треков во внутреннем детекторе, используя информацию, поступающую с триггера первого уровня (Level 1), и передавая ее на вход триггера HLT. FTK использует данные, приходящие с:

- *пиксельного детектора (Pixel Detector);*
- *полупроводникового микрострипового детектора (SCT);*
- *вставного В-слоя (IBL).*



Исследование эффективности FTK

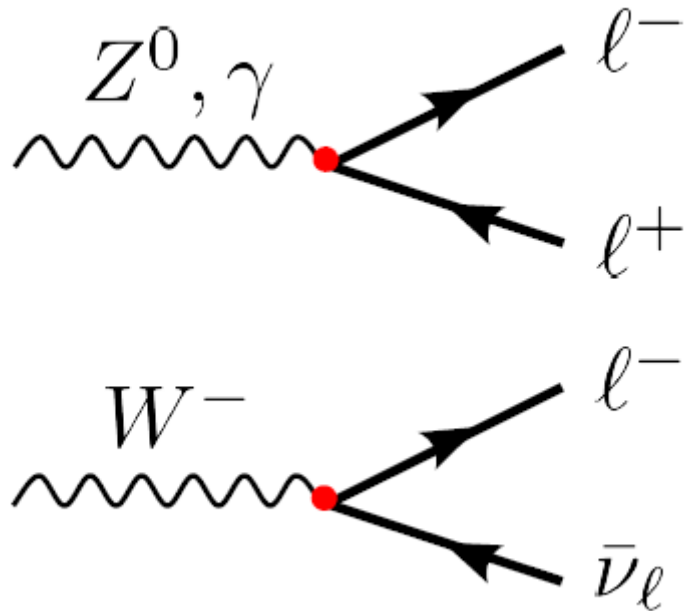


Эффективность реконструкции K и K* как функция delta R между K или K* и ближайшем мюоном

FTK эффективнее на больших delta R

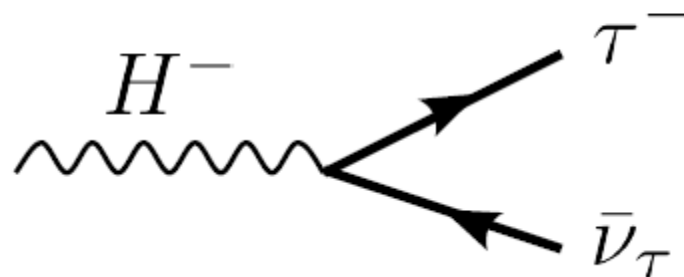
Проблема лептонной универсальности

EW bosons in SM:

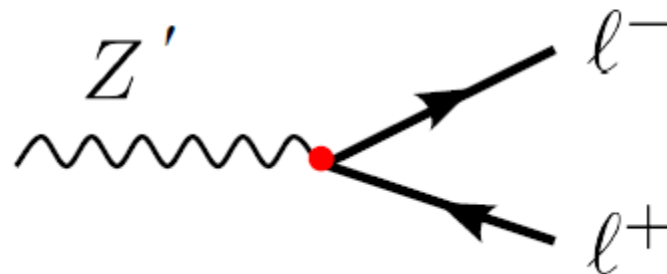


- Взаимодействие W, Z и бозонов $l \in \{e, \mu, \tau\}$ не зависит от аромата лептонов
- Различия в интенсивностях распада обусловлены различными массами
 $m_e = 0.511 \text{ MeV}$, $m_\mu = 105 \text{ MeV}$, $m_\tau = 1777 \text{ MeV}$
- **Полулептонные распады b кварка на e и μ практически идентичны**
- **Лептонные распады $B \rightarrow l\nu$, $B \rightarrow ll$ сильно подавлены**

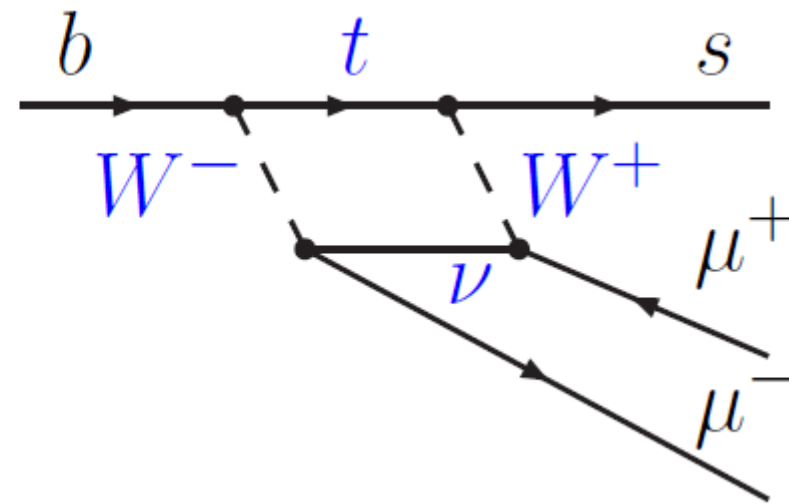
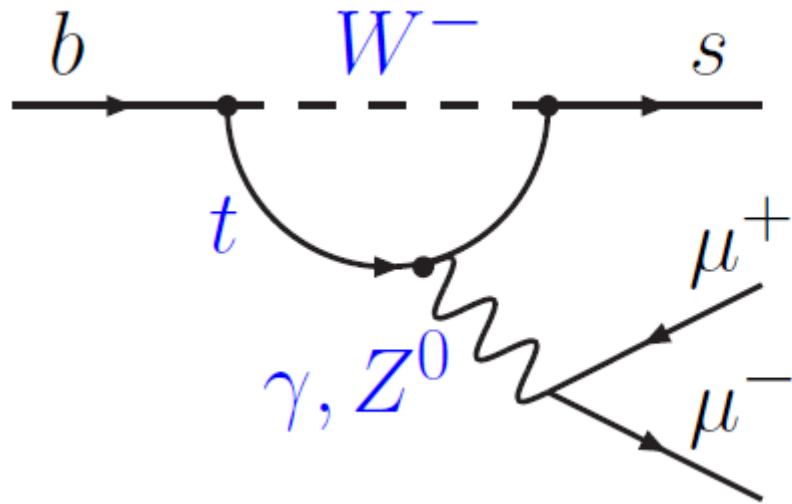
Charged Higgs in NP:



Heavy Z' boson in NP:

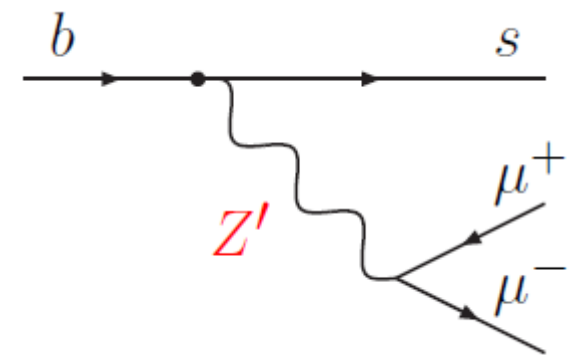


Электрослабые распады b кварка



Процессы изменения аромата с нейтральным током требуют петли либо боксы в СМ

Можно заменить W, Z, t заряженным Хиггсом, Z' , SUSY партнерами, лептокварками или другими частицами Новой физики



Присутствие таких частиц может привести к значительному увеличению или уменьшению скорости конкретных распадов или изменению углового распределения частиц в начальном состоянии. Особенно чувствительными для таких эффектов являются соотношения типа

$$R_{H_s} = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma(H_b \rightarrow H_s \mu^+ \mu^-)}{dq^2} dq^2}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma(H_b \rightarrow H_s e^+ e^-)}{dq^2} dq^2},$$

где H – адрон, содержащий s -кварк (K или K^*), Γ – парциальная ширина распада, зависящая от q^2 – инвариантной массы дилептона.

Согласно представлениям СМ, данное отношение должно быть близко к единице [9-10]. Однако в исследованиях распада B -мезонов замечаются существенные отклонения от предсказаний СМ.

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)} \stackrel{\text{SM}}{=} 1.0$$

Effective Theory

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4 G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{\alpha_e}{4\pi} \sum_i C_i(\mu) \mathcal{O}_i(\mu)$$

Integrate out scales above $\mu \sim m_b$

SM calculations of inclusive rates give (10% accuracy):

$C_7 \sim -0.3$ from the photon

$$\mathcal{O}_{7\gamma}^{(')} = \frac{m_b}{e} (\bar{s} \sigma^{\mu\nu} P_{R(L)} b) F_{\mu\nu}$$

$C_9 \sim +4$ from EW vector

$$\mathcal{O}_{9V}^{(')} = (\bar{s} \gamma_\mu P_{L(R)} b) (\bar{\ell} \gamma^\mu \ell)$$

$C_{10} \sim -4$ from EW axial-vector

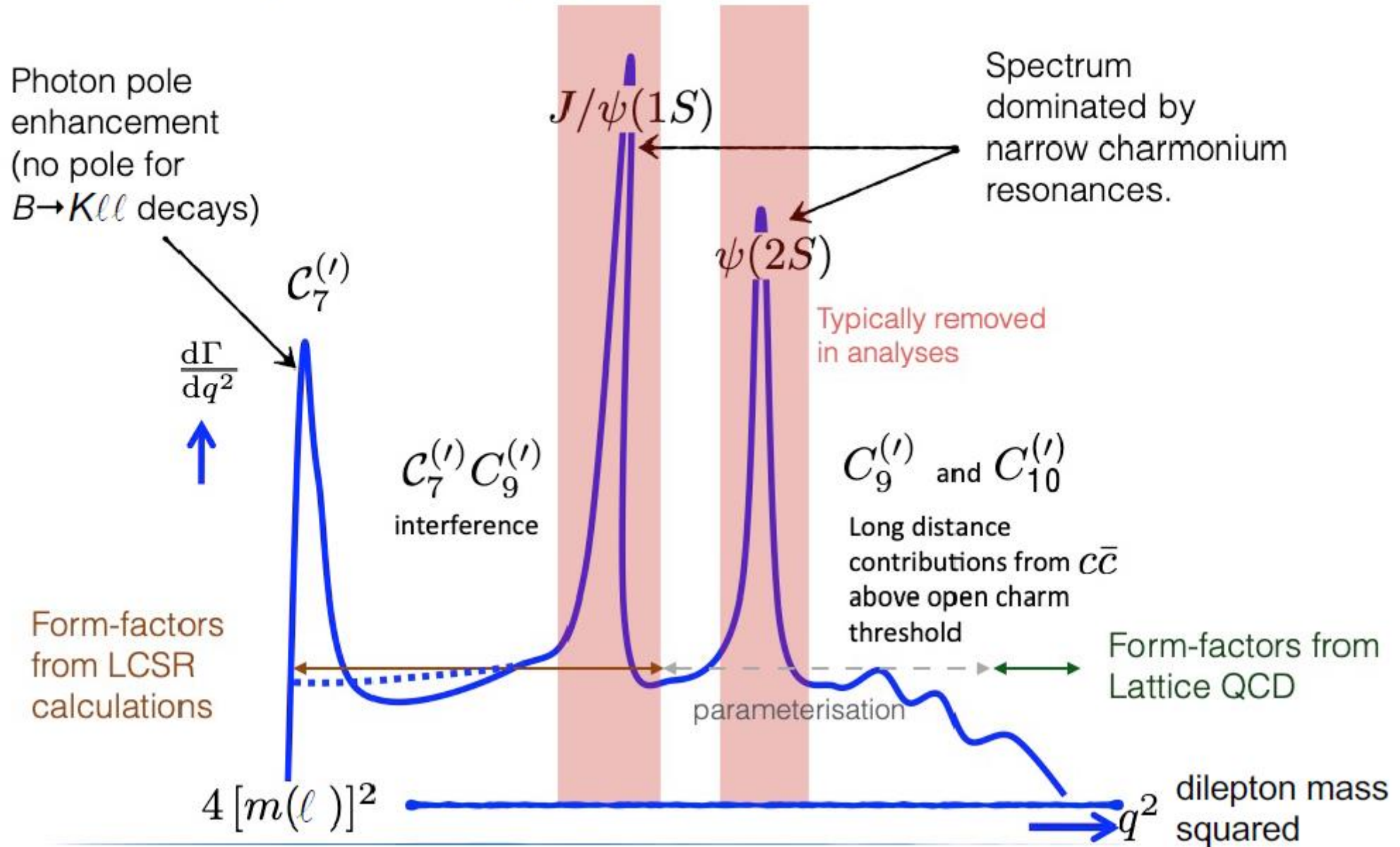
$$\mathcal{O}_{10A}^{(')} = (\bar{s} \gamma_\mu P_{L(R)} b) (\bar{\ell} \gamma^\mu \gamma_5 \ell)$$

(') indicate RH contributions (suppressed by m_s/m_b in SM)

Wilson coefficients

Four-fermion operators

Map of $K(^*)ll$ Contributions



Реконструкция В распадов на Belle и BaBar

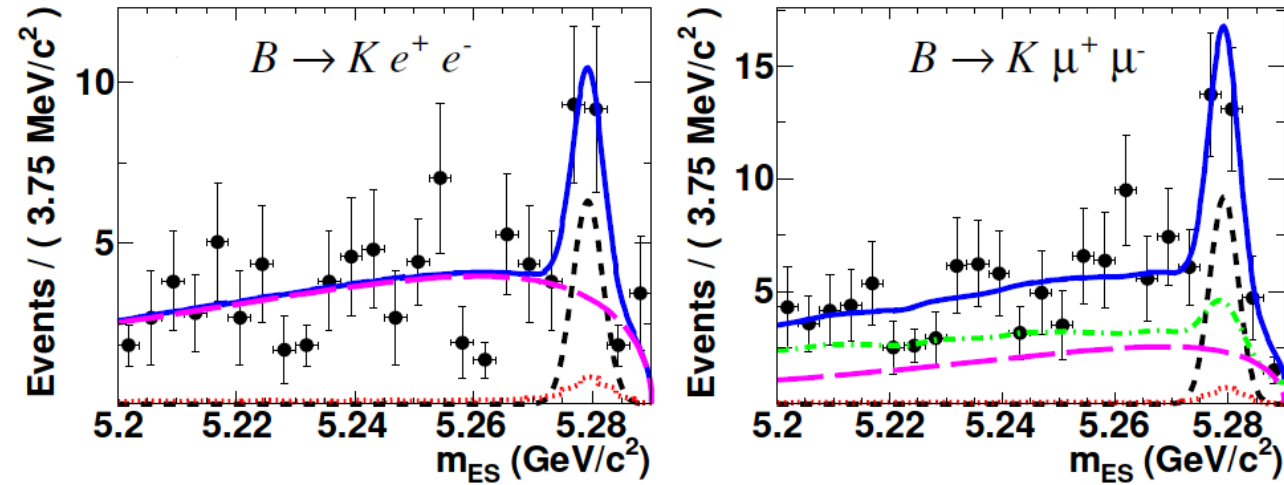


Figure 16: Fits to (left) $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$ and (right) $B \rightarrow K e^+ e^-$ candidates at low recoil ($q^2 > 10.11 \text{ GeV}^2/c^4$), but excluding the $\psi(2S)$ mass region, at BaBar. Taken from Ref. [114].

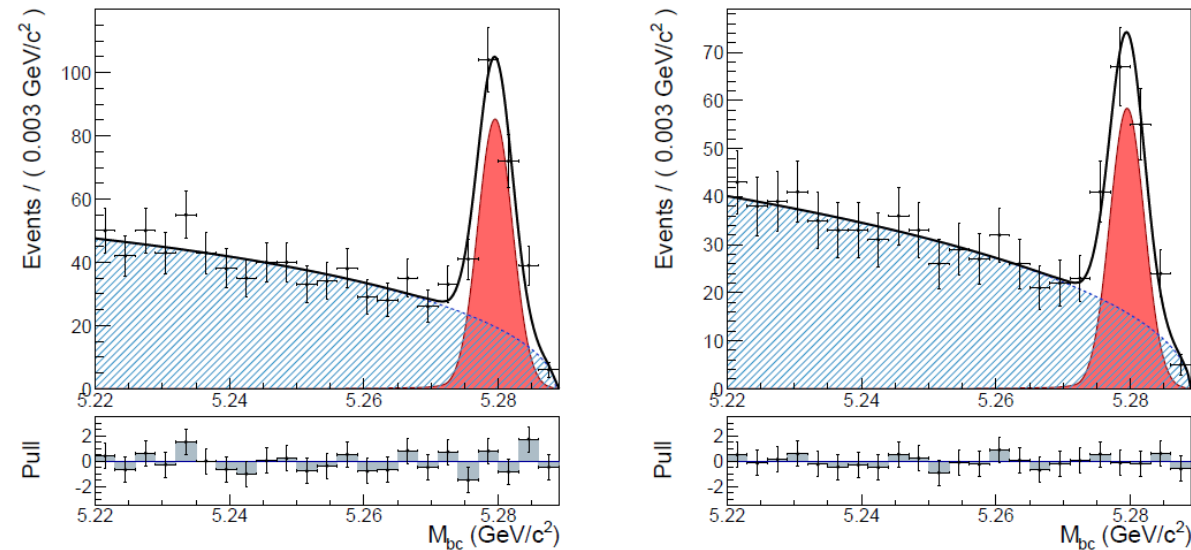
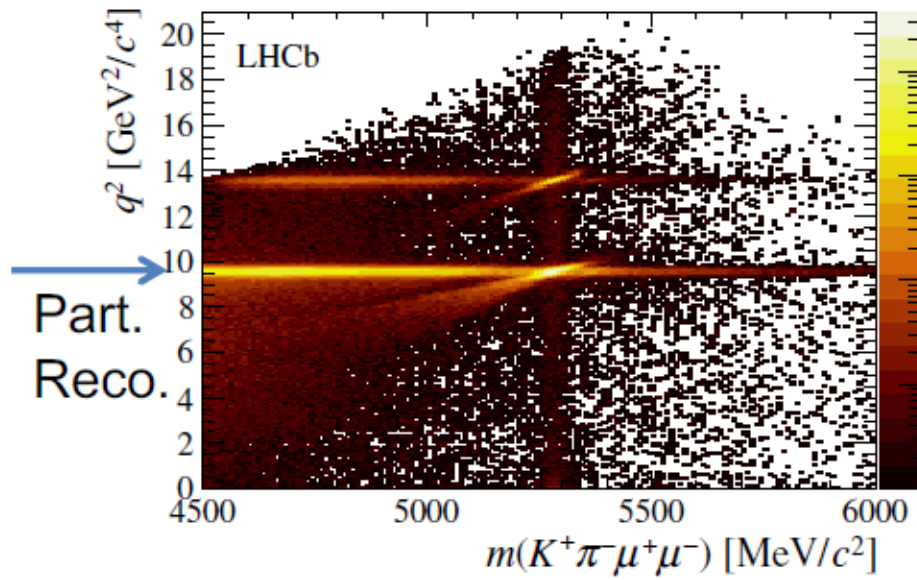
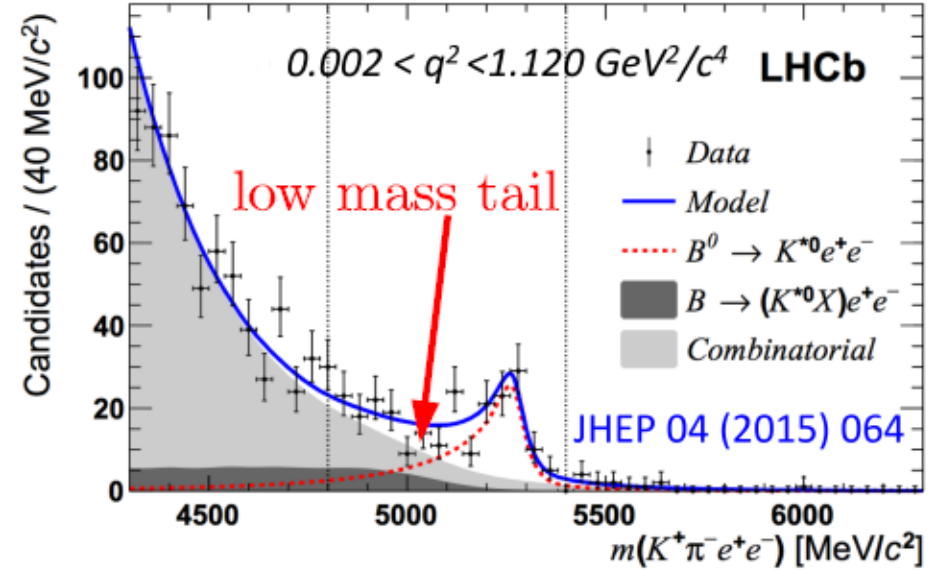
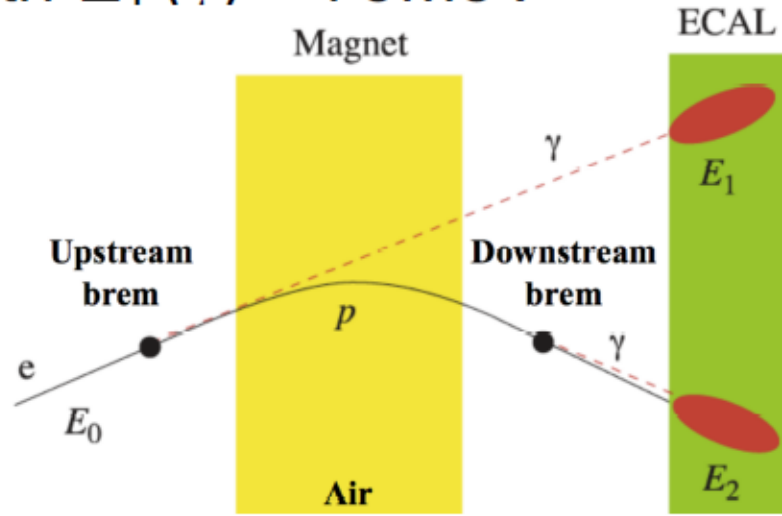


Figure 17: Fits to (left) $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ and (right) $B \rightarrow K^* e^+ e^-$ candidates in the full q^2 range, but excluding the J/ψ and the $\psi(2S)$ mass regions, at Belle. Taken from Ref. [116].

Реконструкция электронов на LHCb

Bremsstrahlung recovery < 100%
with $E_T(\gamma) > 75\text{MeV}$

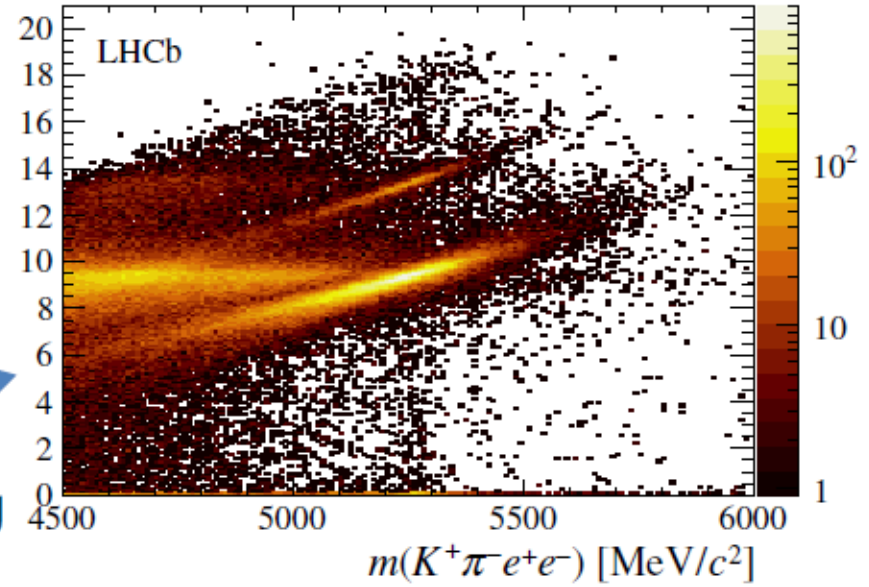


JHEP 08
(2017) 055

ψ'

J/ψ

Brems
strahlung



Измерение соотношения R(K)

Reduces dependence on simulation for selection and reconstruction efficiency.

$$R_K = \left(\frac{\mathcal{N}_{K^+\mu^+\mu^-}}{\mathcal{N}_{K^+e^+e^-}} \right) \left(\frac{\mathcal{N}_{J/\psi(e^+e^-)K^+}}{\mathcal{N}_{J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+}} \right) \left(\frac{\epsilon_{K^+e^+e^-}}{\epsilon_{K^+\mu^+\mu^-}} \right) \left(\frac{\epsilon_{J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+}}{\epsilon_{J/\psi(e^+e^-)K^+}} \right)$$

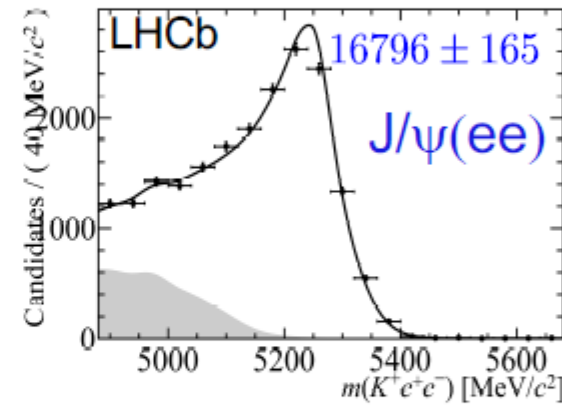
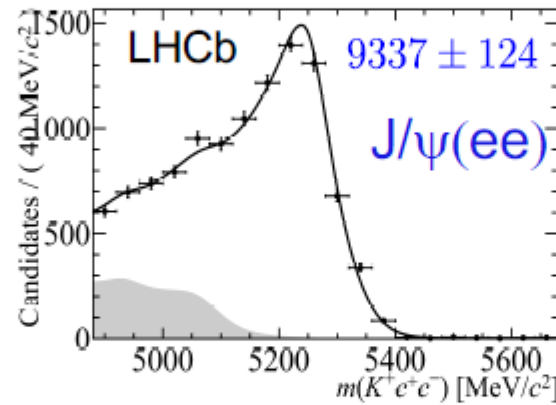
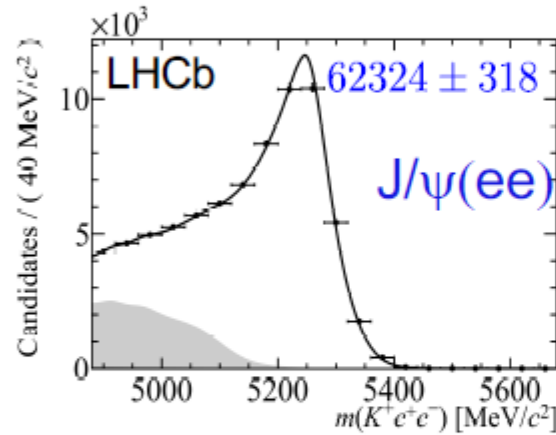
L0 electron

L0 hadron

L0 signal independent

L0 muon

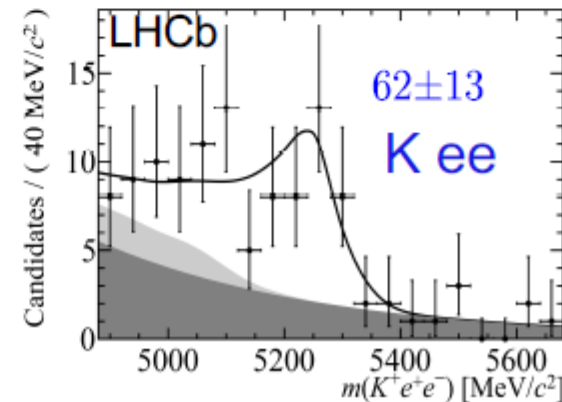
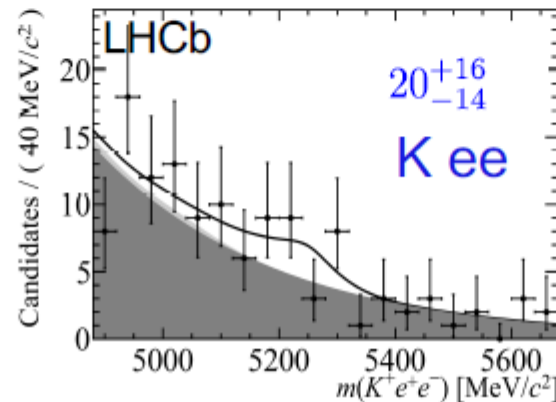
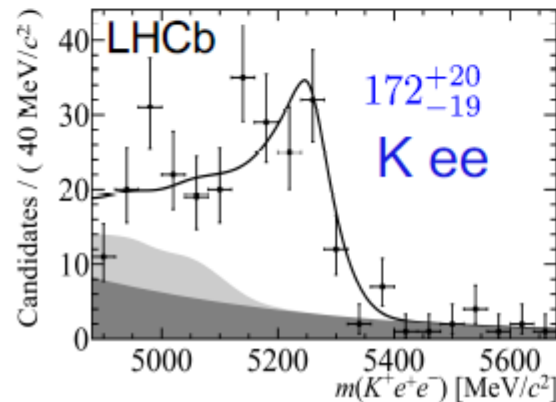
J/ψ mode



667(1)k
J/ψ(μμ)
events

3/fb at
7-8TeV

rare mode



1226(41)
K μμ
events
1 < q² < 6 GeV²

PRL 113, 151601
(2014)

Результаты для $R(K)$

LHCb PRL 113, 151601 (2014): $R_K = 0.745^{+0.09}_{-0.07} (\text{stat}) \pm 0.036 (\text{syst})$

3/fb at 7-8TeV

Window $1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2$

2.6σ away from SM $R_K=1(10^{-2})$

Bordone, Isidori & Pattori
EPJC 76, 440 (2016)

Errors are almost entirely from Kee samples.

Dominant systematics from fit shapes and bremsstrahlung correction.

For comparison:

BaBar PRD86, 032012 (2012): $R_K = 0.74^{+0.31}_{-0.25} (\text{stat}) \pm 0.07 (\text{syst})$

Window $0.1 < q^2 < 8 \text{ GeV}^2$

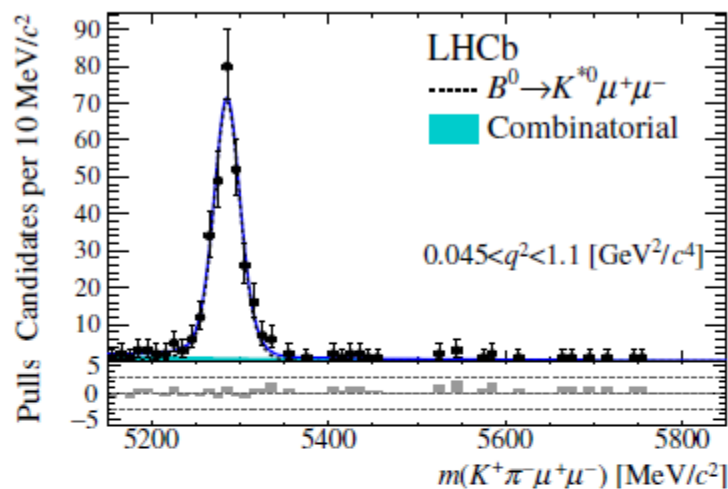
Belle PRL103, 171801 (2009): $R_K = 1.03 \pm 0.19 (\text{stat}) \pm 0.06 (\text{syst})$

All q^2 apart from J/ψ and ψ' regions

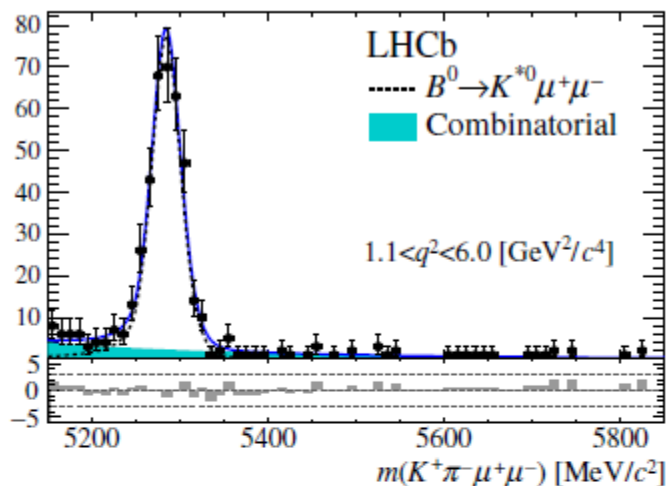
$K^* \Pi$ сигнал

3/fb at 7-8TeV

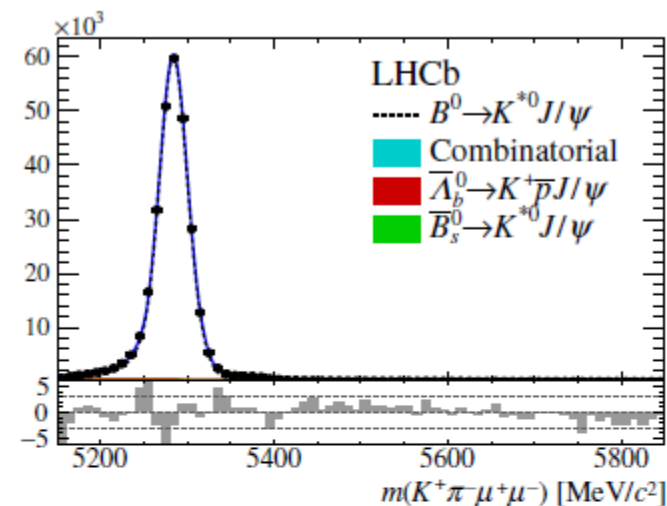
285 $K^* \mu\mu$ events



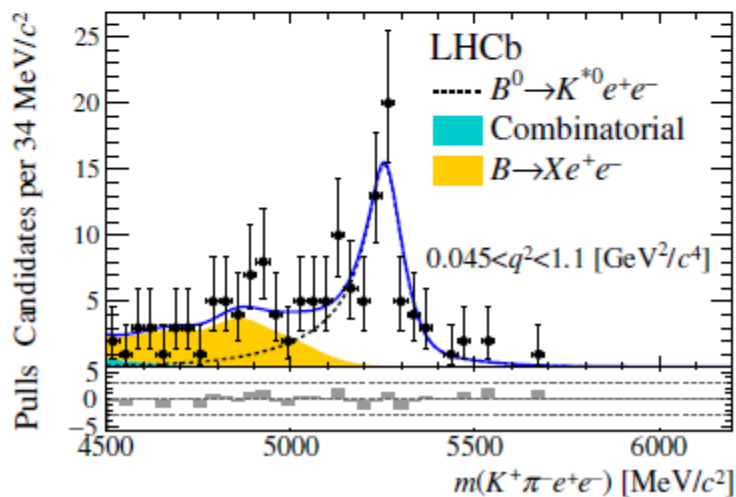
353 $K^* \mu\mu$ events



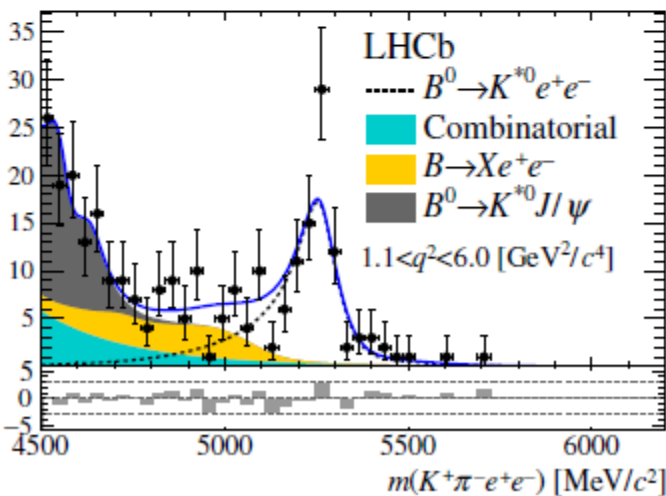
274k $J/\psi(\mu\mu)$ events



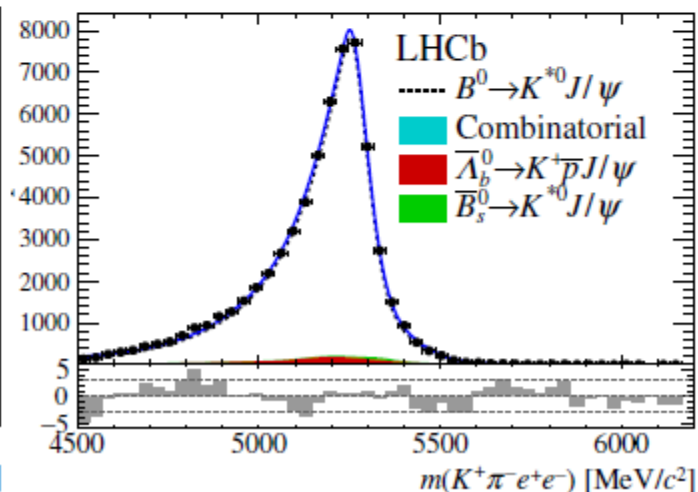
89 $K^* ee$ events



111 $K^* ee$ events



58k $J/\psi(ee)$ events



Результаты для $R(K^*)$

LHCb JHEP 08, 055 (2017)

3/fb at 7-8TeV

$$R_{K^*} = 0.66^{+0.11}_{-0.07} (\text{stat}) \pm 0.03 (\text{syst})$$

for $0.045 < q^2 < 1.1 \text{ GeV}^2$

2.2 σ away from SM prediction of $R_{K^*}=0.926(4)$

Altmannshofer et al
EPJC 77, 377 (2017)

$$R_{K^*} = 0.69^{+0.11}_{-0.07} (\text{stat}) \pm 0.05 (\text{syst})$$

for $1.1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2$

2.5 σ away from SM prediction of $R_{K^*}=1(10^{-2})$

Bordone, Isidori & Pattori
EPJC 76, 440 (2016)

For comparison:

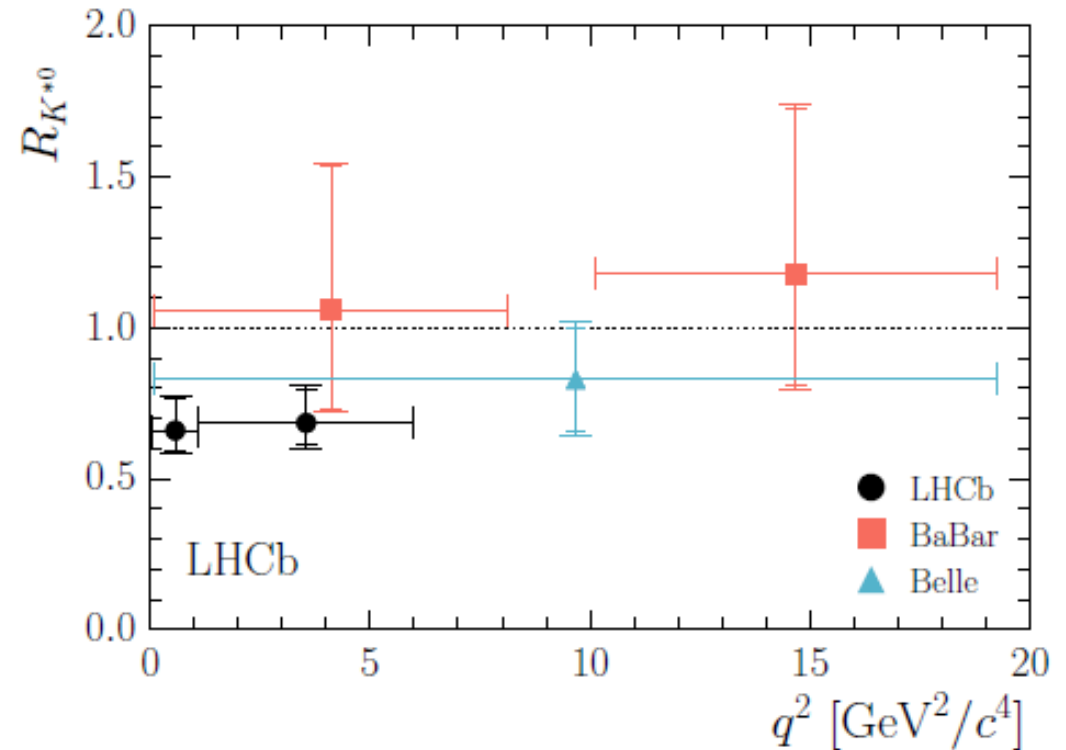
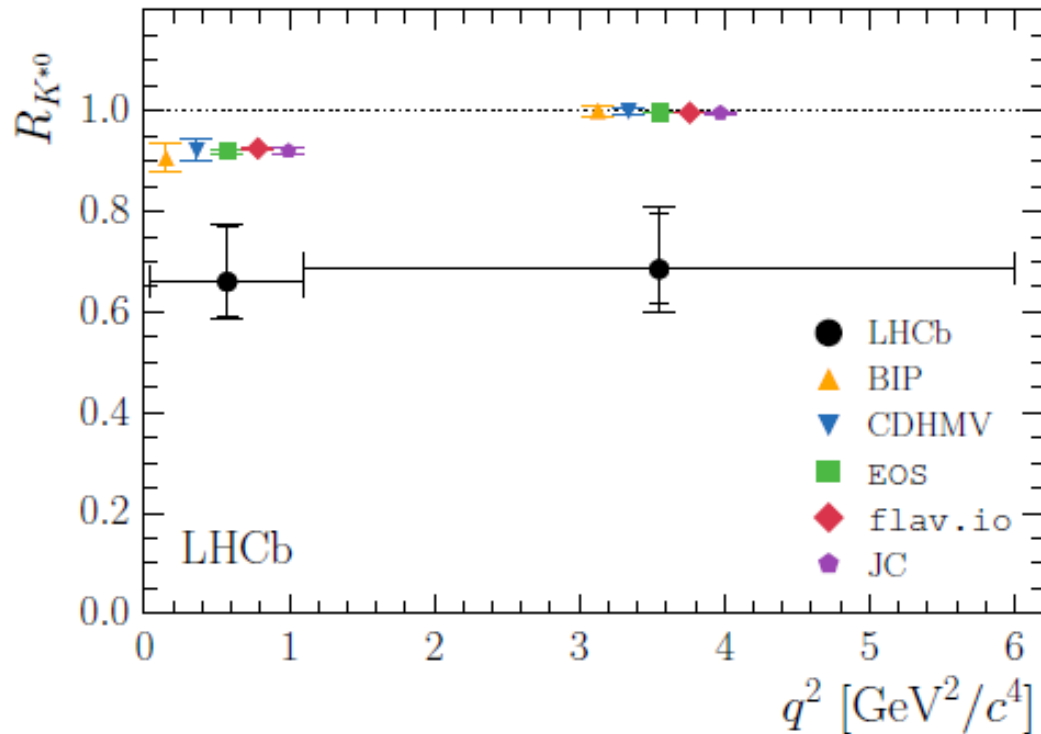
BaBar PRD86, 032012 (2012): $R_{K^*} = 1.06^{+0.48}_{-0.33} (\text{stat}) \pm 0.08 (\text{syst})$

Window $0.1 < q^2 < 8 \text{ GeV}^2$

Belle PRL103, 171801 (2009): $R_{K^*} = 0.83 \pm 0.17 (\text{stat}) \pm 0.05 (\text{syst})$

All q^2 apart from J/ψ and ψ' regions

Сравнение результатов экспериментов с теоретическими предсказаниями



Лучшие результаты показывает эксперимент LHCb

Анализ $R(K^*)$ в ATLAS

В настоящее время ведется анализ $R(K^*)$ аномалии.

Подготовлены данные (измеренные данные и MC)

Ведется анализ эффективности триггеров (электронного и мюонного).

Проверяется возможность использования технологий нейронных сетей для улучшения отделения фона от сигнальных событий.

Спасибо за внимание