



# Эксперимент ATLAS

## Физические результаты и Upgrade

Соловьев В.М.

Научная сессия ОФВЭ

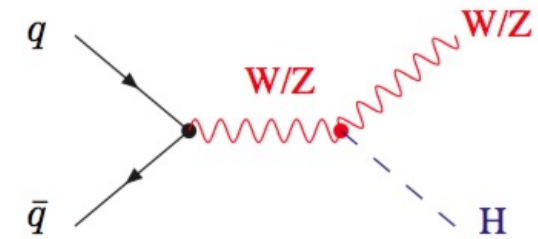
23 декабря 2021

# Физические результаты

- В эксперименте ATLAS достаточно обширная программа физических исследований
- Физика в рамках Стандартной модели:
  - Измерение параметров Стандартной модели (сечения,  $BR$ , массы и т.д.)
  - Изучение свойств бозона Хиггса
  - Физика  $t$ -кварка
  - Физика  $b$ -кварка
  - Физика тяжелых ионов
- Физика за пределами Стандартной модели:
  - Поиск «экзотических» явлений и частиц (тяжелые калибровочные бозоны, темная материя, модели с дополнительными размерностями и т.д.)
  - Суперсимметрия

# Поиск распада $H \rightarrow c\bar{c}$

- Исследование взаимодействия  $H$  с кварками 2-го поколения
  - Изучались процессы  $ZH \rightarrow \nu\nu c\bar{c}$ ,  $WH \rightarrow l\nu c\bar{c}$  и  $ZH \rightarrow ll c\bar{c}$
- Каналы: "0 lepton" "1 lepton" "2 leptons"

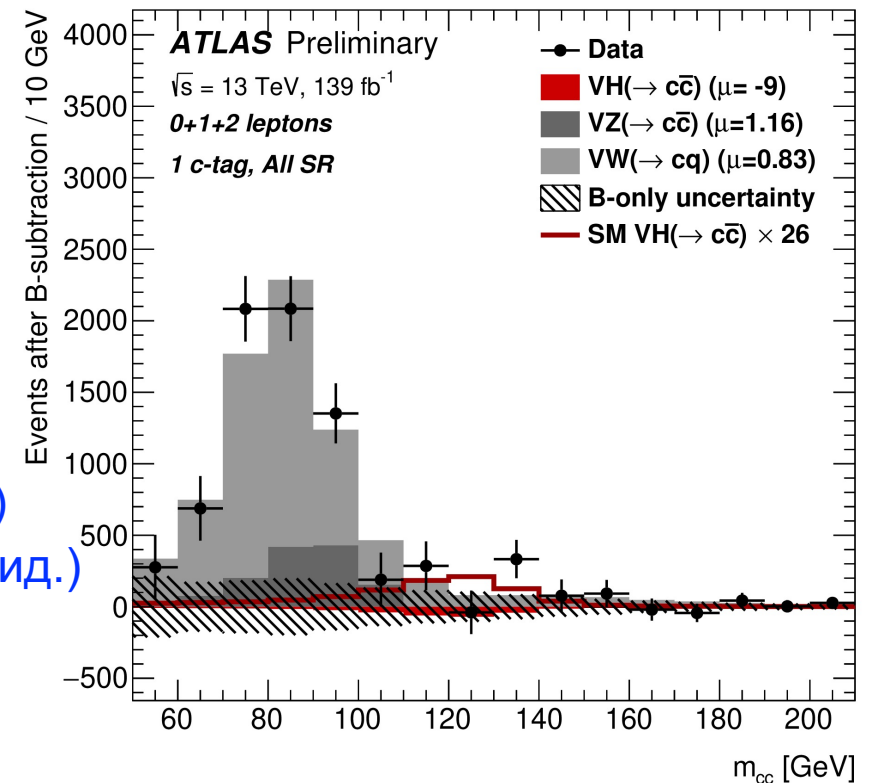


- Отбор событий:  $E_T^{miss}$ , 1 или 2 лептона (в зависимости от канала), 1 или 2 с-струи, вето на b-струи
- Для идентификации с-струй применялись методы машинного обучения
- Наблюдаемая величина:  $m_{cc}$

Установлены пределы (95% CL):  $\sigma(VH(c\bar{c})) < 26 \times \sigma_{SM}$  (набл.)  
 $\sigma(VH(c\bar{c})) < 31_{-8}^{+12} \times \sigma_{SM}$  (ожд.)

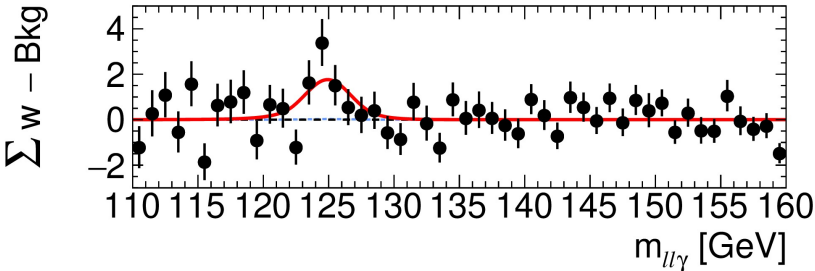
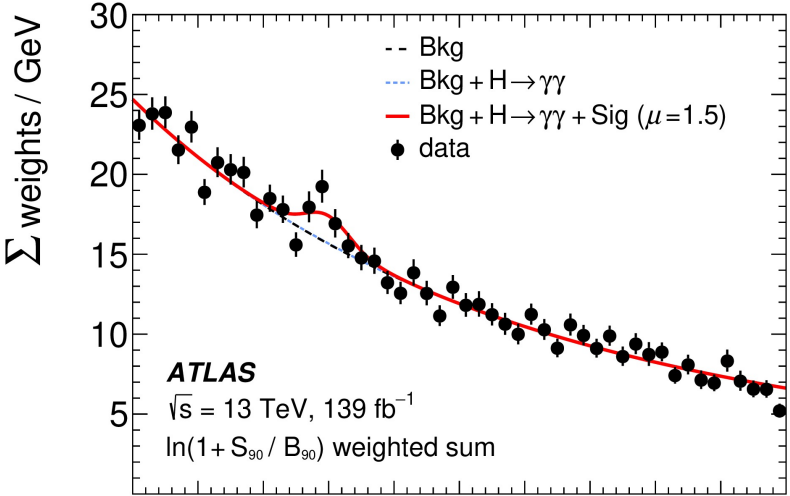
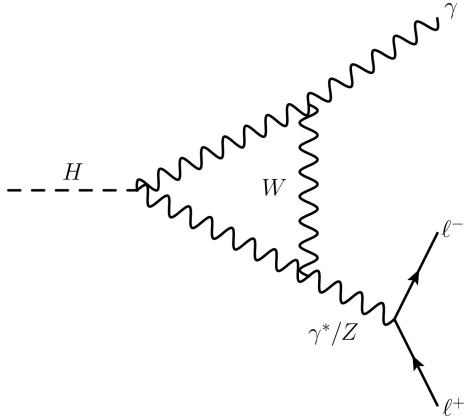
$$\mu_{VH(c\bar{c})}(\kappa_c) = \frac{\kappa_c^2}{1 + B_{H \rightarrow c\bar{c}}^{SM}(\kappa_c^2 - 1)} \quad \begin{array}{l} |\kappa_c| < 8.5 \text{ (набл.)} \\ |\kappa_c| < 12.5 \text{ (ожд.)} \end{array}$$

$\kappa_c$  - модификатор взаимодействия  $H$  с  $c$ -кварками



# Поиск редких распадов: $H \rightarrow ll\gamma$

- Важно с точки зрения исследования взаимодействия  $H$  новыми гипотетическими частицами, а также для изучения нарушения CP в хиггсовском секторе
- Дополнение к поиску  $H \rightarrow Z\gamma$  [Phys. Lett. B 809 (2020) 135754] (Стат. значимость:  $2.2\sigma$ )
- Рассматривается область малых масс  $ll$ :  $m_{ll} < 30 \text{ GeV}$ ,  $l = e, \mu$
- Трудность:** при больших  $p_T^{ee}$  пара  $ee$  может дать не два кластера в калориметре [resolved], а один кластер [merged]
- Отбор событий: по крайней мере один  $\gamma$  и одна пара лептонов ( $e^+e^-$  или  $\mu^+\mu^-$ ) или один merged  $ee$ -объект
- Фоновые процессы:
  - нерезонансное рождение  $ll\gamma$  – основной
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$  – если один из  $\gamma$  конвергировал в пару  $e^+e^-$



Стат. значимость:  $3.2\sigma$  (набл.)  
 $2.1\sigma$  (ожд.)

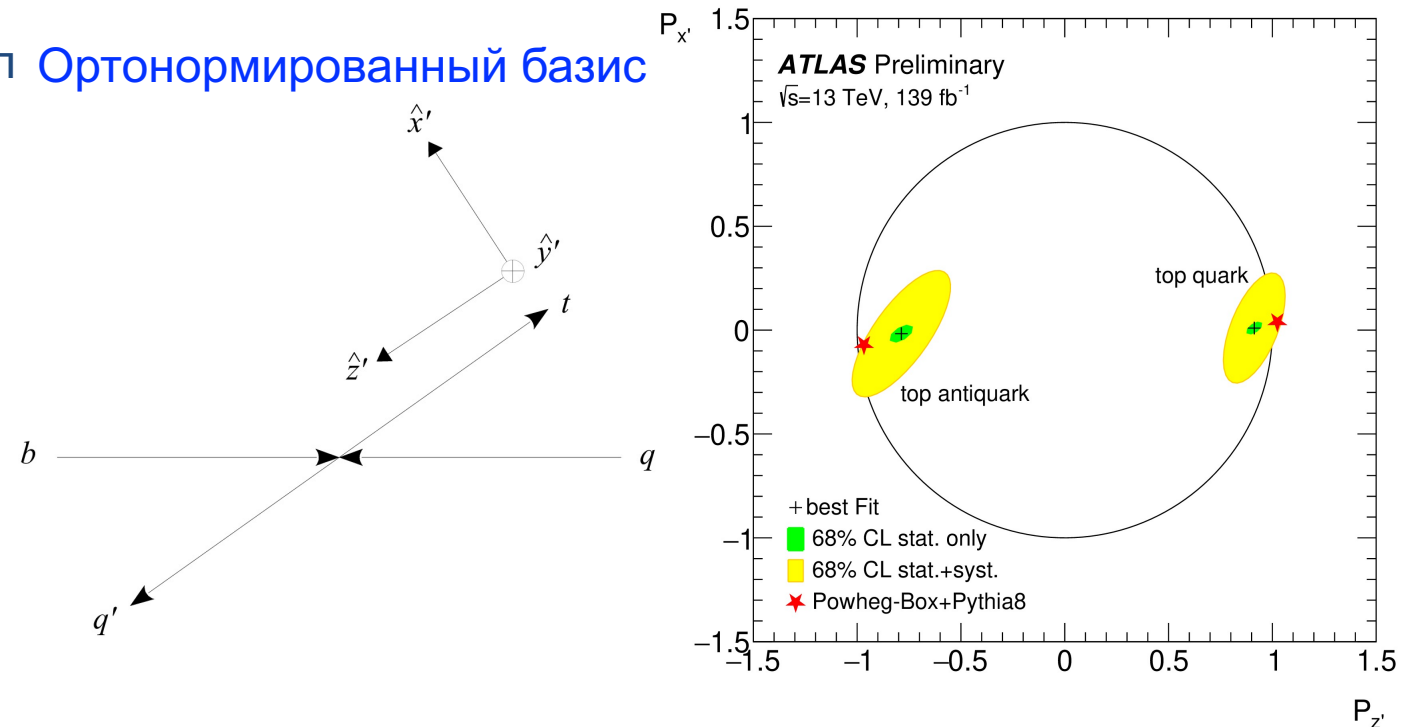
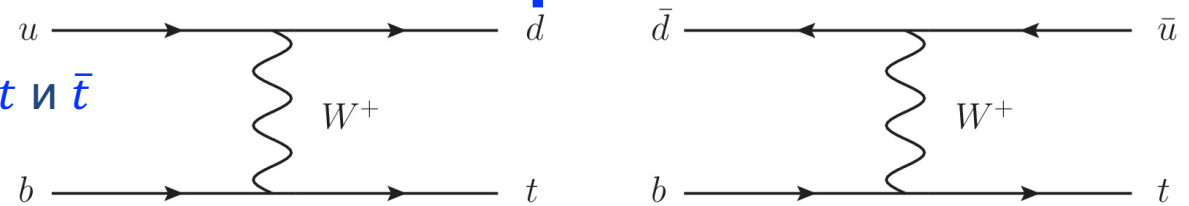
Сила сигнала:  $\mu = 1.5 \pm 0.5$

$$\sigma_{m_{ll} < 30 \text{ GeV}}^{H \rightarrow ll\gamma} = 8.7^{+2.8}_{-2.7} \text{ fb}$$

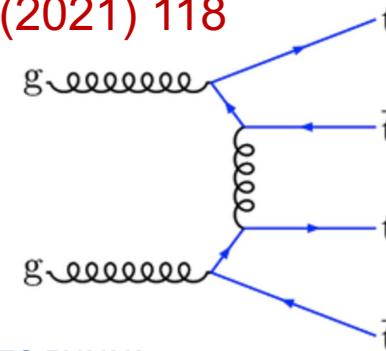


# Поляризация одиночных $t$ -кварков

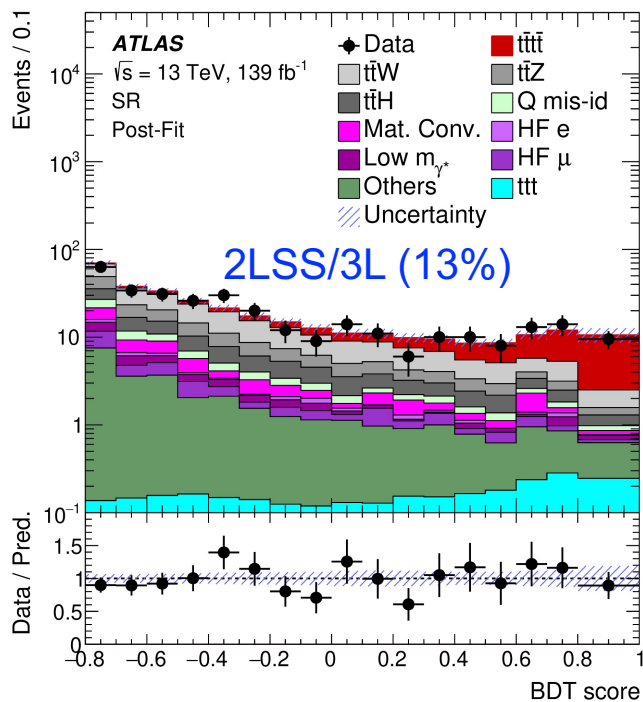
- Рассматривался  $t$ -канал рождения одиночных  $t$  и  $\bar{t}$  кварков
- Информация о спине  $t$ -кварка получена из угловых распределений продуктов его распада
- Рассматривался лептонный канал **Ортонормированный базис** распада:  $t \rightarrow Wb \rightarrow l\nu b$ ,  $l = e, \mu$
- Отборы: 1  $e$  или  $\mu$ ,  $E_T^{miss}$ , 2 струи, одна из которых  $b$ -струя
- Основной фон:  $t\bar{t}$  и  $W$ +струи
- Измерялись  $\cos \theta_{li}$ ,  $i = \hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$
- Получена значительная поляризация вдоль оси спектаторного кварка  $\hat{z}'$



# Наблюдение рождения $t\bar{t}t\bar{t}$



- Рождение  $t\bar{t}t\bar{t}$  – редкий процесс ( $\sigma_{t\bar{t}t\bar{t}}^{SM} = 12.0 \pm 2.4 fb$ ) – до сих пор не наблюдался
- Изучались 2 категории событий в зависимости от количества лептонов конечном состоянии: 2LSS/3L (13%) и 1L/2LOS (57%)

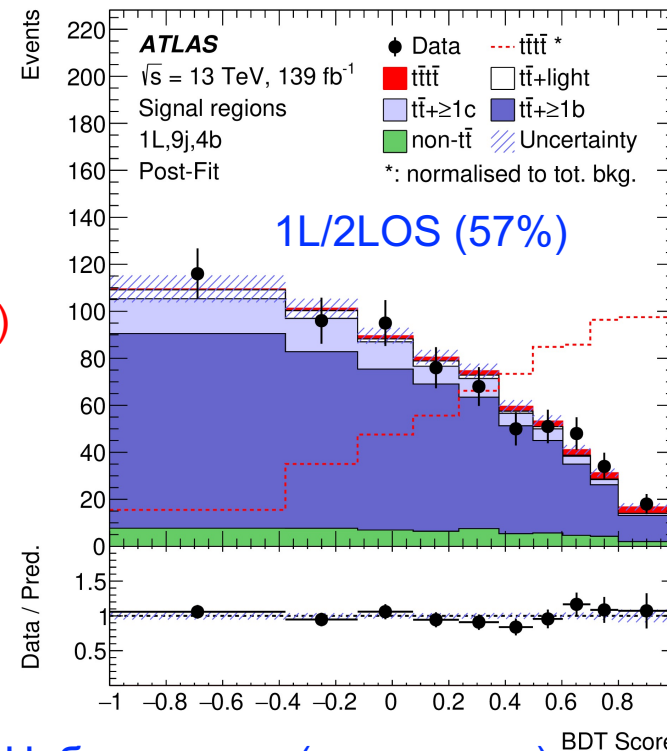


Наблюдаемая (ожидаемая)  
стат. значимость 4.3 (2.4)  $\sigma$

$$\sigma_{t\bar{t}t\bar{t}} = 24_{-7}^{+5} fb$$

Комбинированный  
результат:  
Наблюдаемая (ожидаемая)  
стат. значимость 4.7 (2.6)  $\sigma$

$$\sigma_{t\bar{t}t\bar{t}} = 24_{-6}^{+7} fb$$



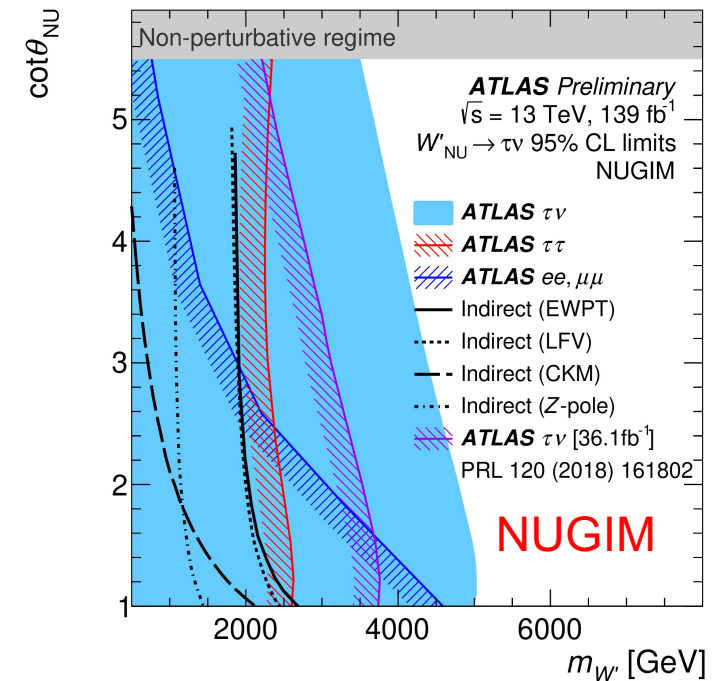
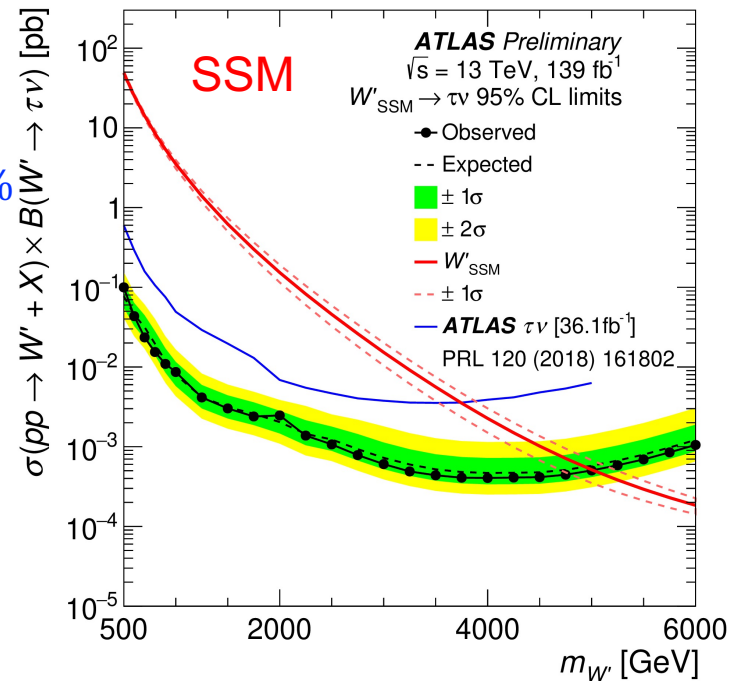
Наблюдаемая (ожидаемая)  
стат. значимость 1.9 (1.0)  $\sigma$

$$\sigma_{t\bar{t}t\bar{t}} = 24_{-17}^{+15} fb$$

# Поиск тяжелых резонансов $W' \rightarrow \tau\nu$

- Существование тяжелых векторных бозонов  $W'$  и  $Z'$  предсказывается во многих моделях, расширяющих СМ
- Базовая модель – Sequential Standard Model (SSM) – универсальна для всех поколений лептонов
- В моделях Non-Universal Gauge Interaction Models (NUGIM) взаимодействие с  $\tau$ -лептонами может усиливаться в зависимости от  $\text{ctg } \theta_{NU}$

- SSM –  $\text{ctg } \theta_{NU} = 1$ ,  $\Gamma_{W'} = 3\%$
- NUGIM –  $\text{ctg } \theta_{NU} > 1$ ,  $\Gamma_{W'} = 3 \div 36\%$
- Отборы:  $\tau_{had} + E_T^{miss}$
- Фон:  $W \rightarrow \tau\nu$ , top, diboson, jets
- Наблюдаемая величина:  $m_T$
- Установлены 95% С.Л. пределы на сечения рождения  $W'$  для SSM и на массы  $W'$  для SSM и NUGIM



Исключены массы  $W'$ :

$m_{W'} < 5.0 \text{ TeV}$  (4.9 TeV ожид.)

$m_{W'} < 3.5 \div 5.0 \text{ TeV}$

# Участие ОФВЭ в физической программе ATLAS

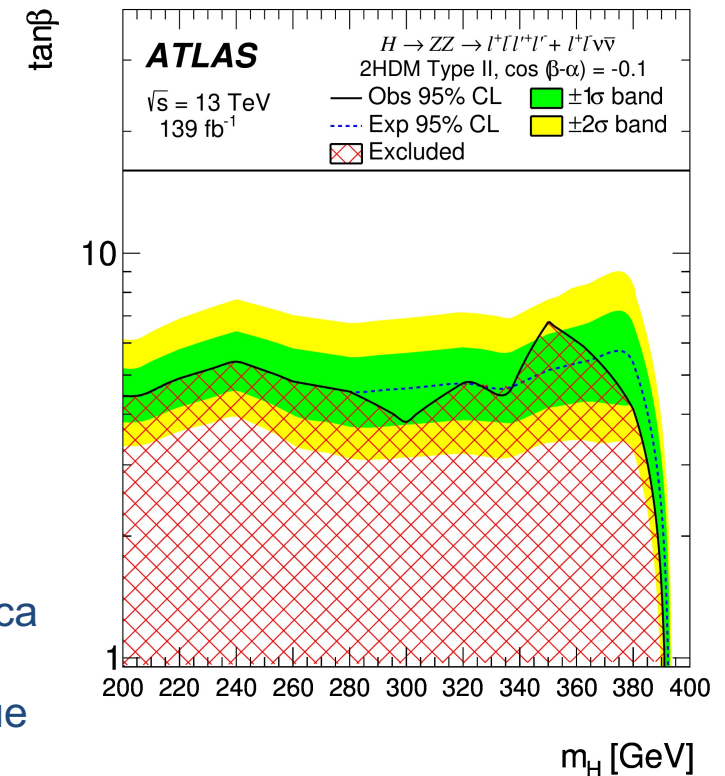
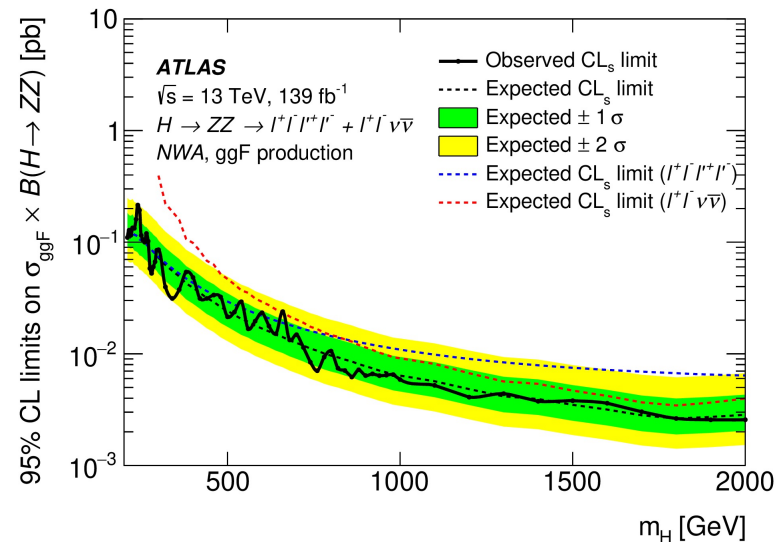
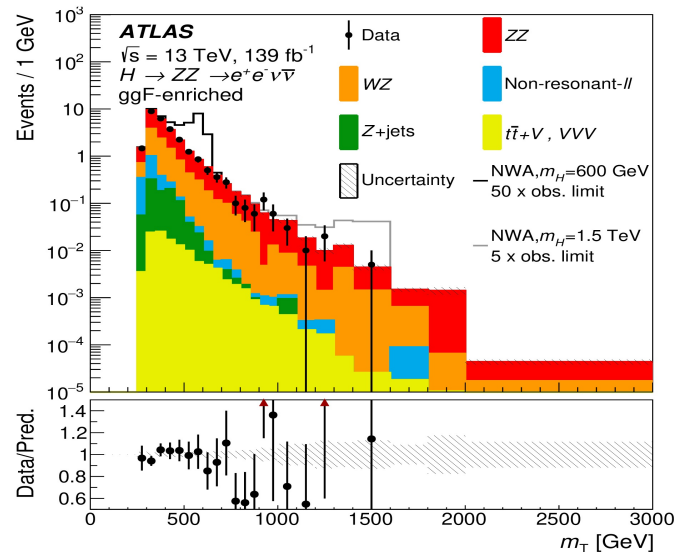
- Поиски новых явлений за пределами Стандартной модели (BSM):
  - поиск частиц темной материи в процессе моно- $Z$
  - поиск тяжелого нейтрального бозона Хиггса (2HDM)
  - поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса  $SM$
  - поиск Randall-Sundrum гравитона (extra dimensions)
  - поиск магнитных монополей
- Измерение параметров Стандартной модели:
  - Прецизионное измерение спектра поперечного импульса  $Z$ -бозона и угловой переменной  $\varphi^*$  в процессе  $Z \rightarrow ll$
  - Изучение Бозе-Эйнштейн корреляций
  - Измерение коэффициентов спиновой матрицы плотности  $t\bar{t}$

Руководитель – О.Л. Федин

В.А. Щегельский, В.П. Малеев, С.Г. Барсов, Ю.Г. Нарышкин, В.М. Соловьев,  
А.Е. Ежилов, А.С. Кирьянова, Д. Пуджа, М.В. Покидова, О.В. Лосева, В.А. Степанов

# Поиск нового тяжелого бозона Хиггса

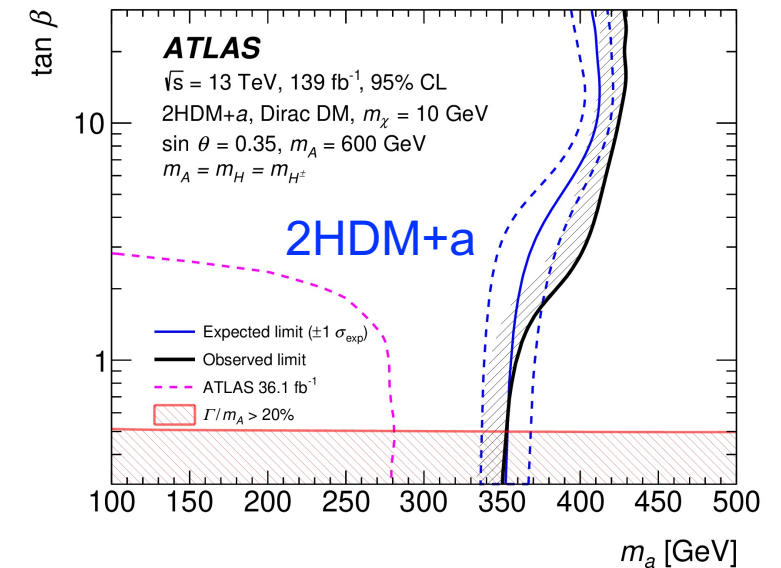
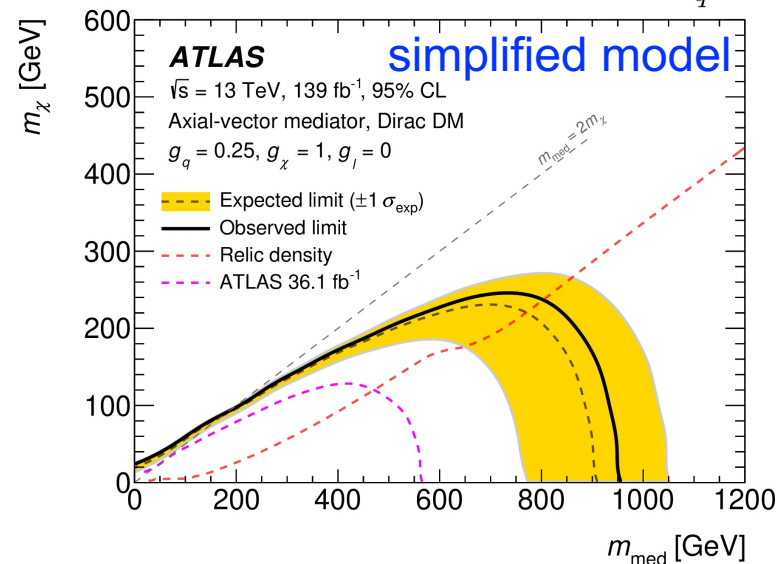
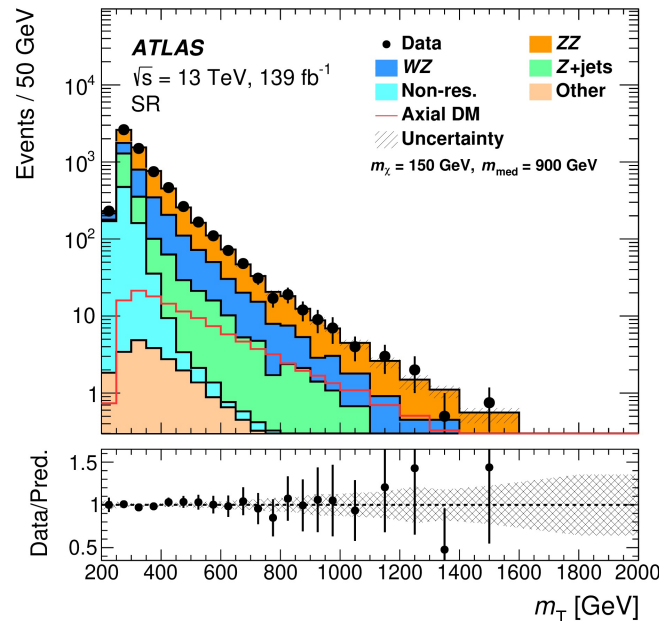
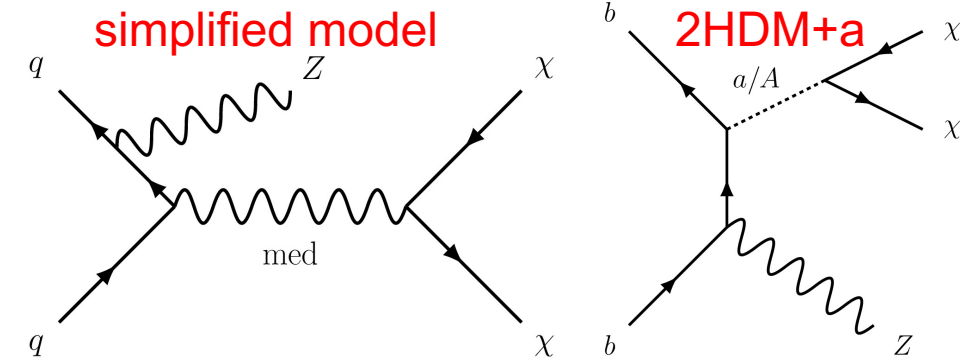
- Расширения Стандартной модели, как например 2HDM (двухдублетная хиггсовская модель), предсказывают новые бозоны Хиггса: CP-четные  $h$  и  $H$ , CP-нечетный псевдоскаляр  $A$ , заряженные  $H^+$ ,  $H^-$ .
- Группа ПИЯФ занимается поиском тяжелого нейтрального бозона Хиггса в канале:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2\nu$



- Проведен анализ данных Run II (2015-2018 годов)
- Установлены верхние пределы на сечение рождения тяжелого бозона Хиггса для  $ggF$  и  $VBF$  механизмов рождения в интервале масс 200 – 2000 ГэВ
- Получены пределы для параметров 2HDM:  $\tan\beta$  vs  $m_H$ , где  $\tan\beta$  – отношение вакуумных средних двух дублетов полей Хиггса

# Поиск темной материи в канале моно-Z

- Частицы темной материи появляются в некоторых расширениях Стандартной модели: MSSM, 2HDM...
- Один из каналов поиска – это т.н. “моно-Z” канал – рождение Z-бозона до взаимодействия кварков (ISR)
- Сигнатура события:  $Z \rightarrow ll (l = e, \mu) + E_T^{miss}$

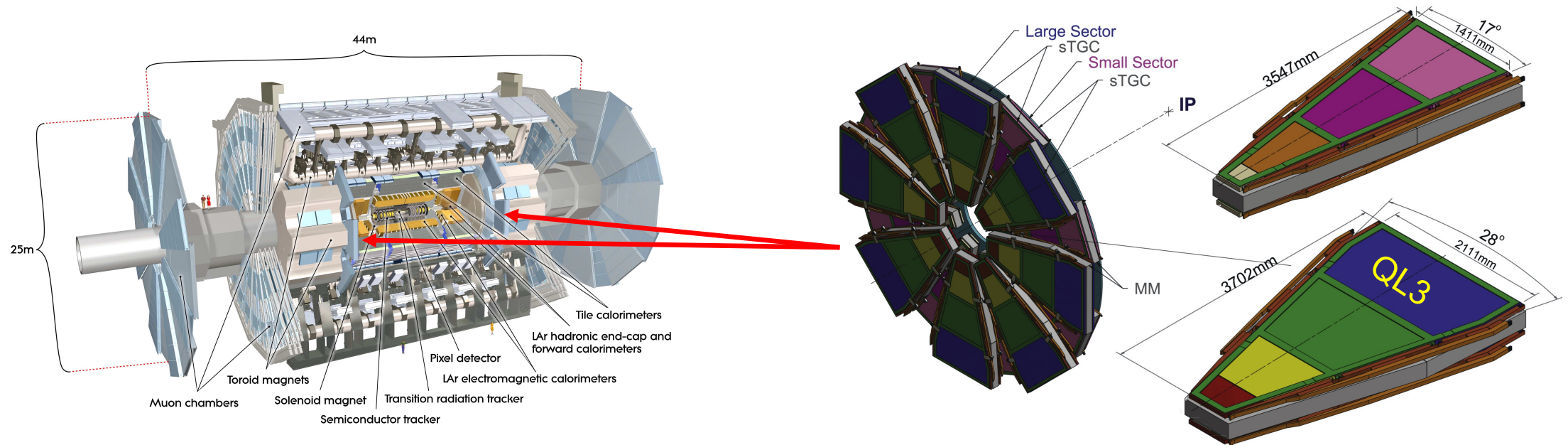


- Получены верхние пределы на массы частиц темной материи в интервале 10 – 350 ГэВ в зависимости от масс медиатора в интервале 10 – 1000 ГэВ, а также на параметры модели 2HDM+a

# Участие в модернизации детектора ATLAS



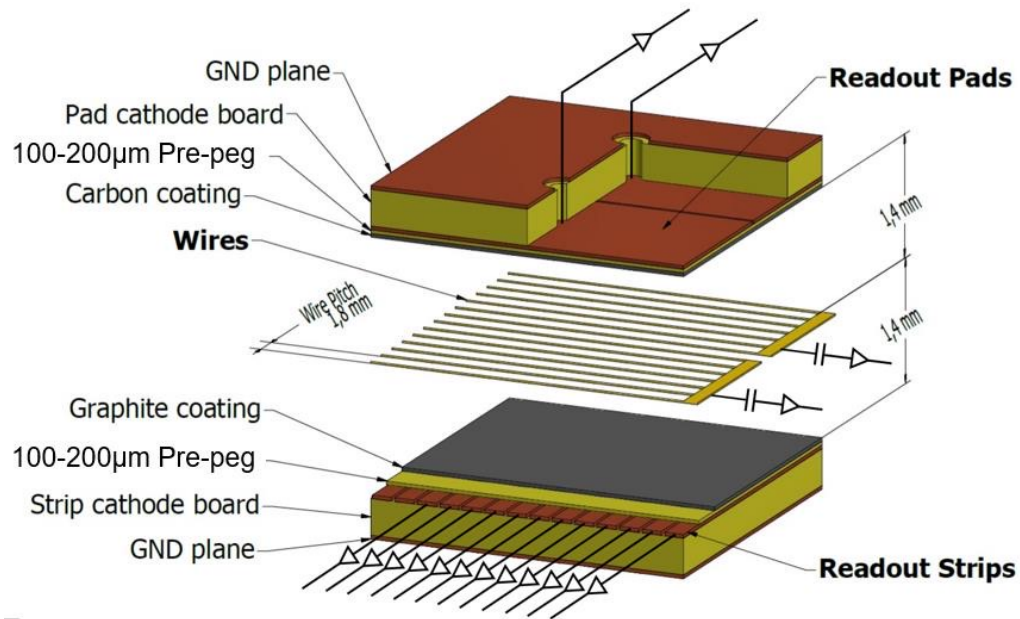
# Тонкоззорные камеры для новых малых колес мюонной системы



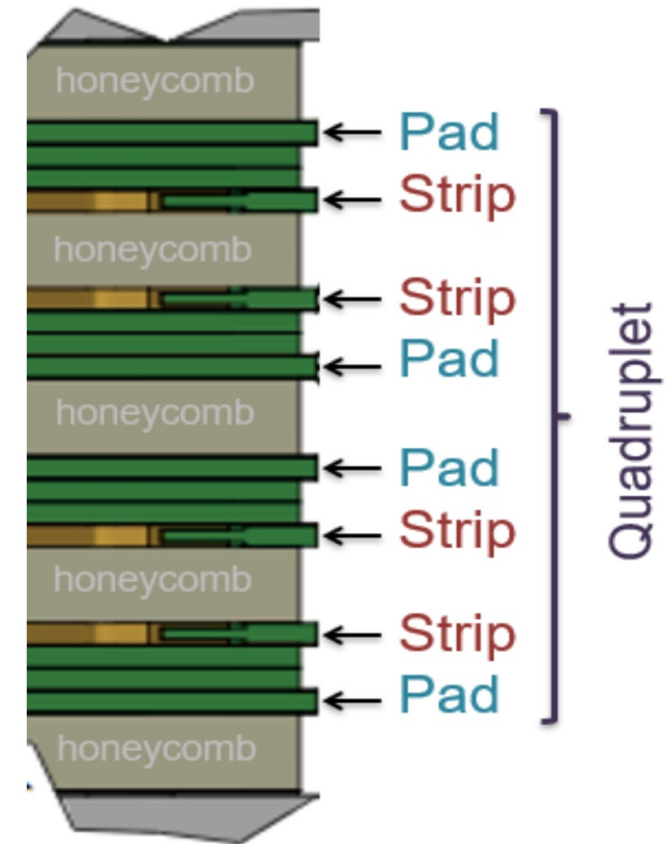
- ОФВЭ участвует в модернизации малых колес мюонного спектрометра
- В конце 2020 года в ПИЯФ была завершена сборка тонкоззорных камер (Small-Strip Thin Gap Chambers, sTGC) типа QL3
- Камеры типа QL3 являются самыми большими (~2,1x1,2 м) среди всех типов камер
- За все время производства (2017 – 2020 г.) было собрано и отправлено в ЦЕРН 36 квадруплетов тонкоззорных камер QL3



# Тонкозаязорная камера



Gas gap	2.8 mm
Wire diameter	50 µm
Wire pitch	1.8 mm
Wire potential	2900 V
Cathode resistivity	100-200 kΩ/□
Strip pitch	3.2 mm
Gas mixture	CO <sub>2</sub> :n-pentane (55:45%)



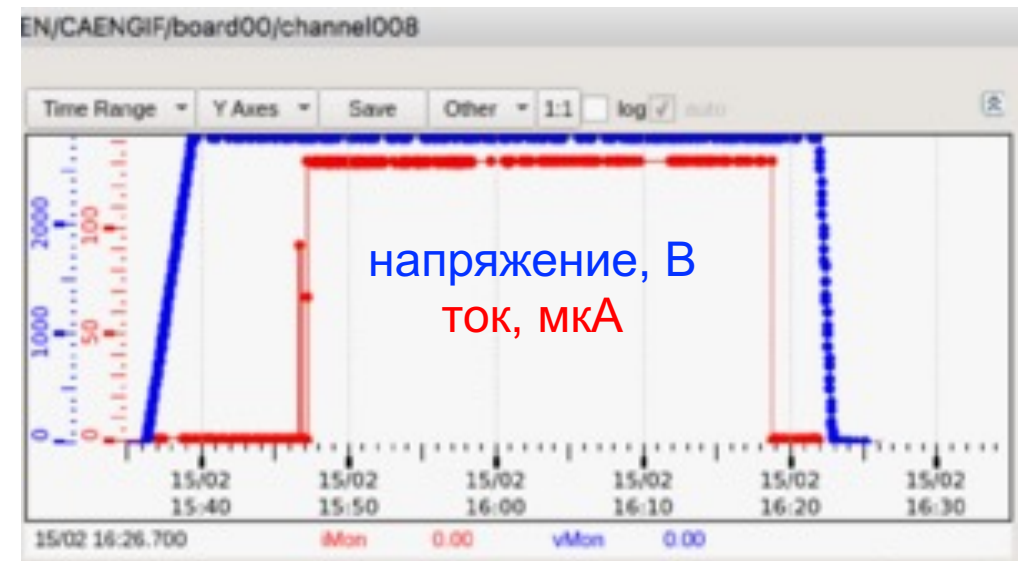
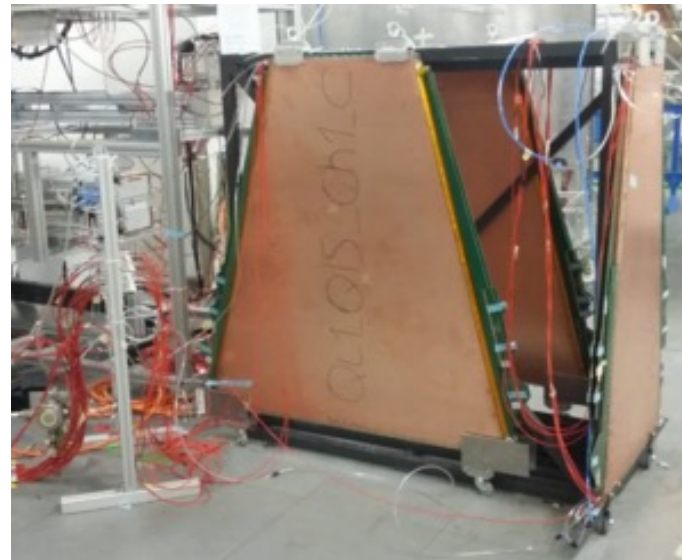
- Камера состоит из групп проволок (позолоченный вольфрам), расположенных между двумя катодными платами: стриповой и падовой
- Сигнал снимается со стрипов, падов, а также с групп проволок
- Задачи тонкозаязорных камер: обеспечение работы мюонного триггера и реконструкция треков мюонов

# Сборка малых колес в ЦЕРН

- В 2021 сотрудники ЛАФ принимали участие в сборке малых колес в ЦЕРН
- Квадруплеты проходили входной контроль: визуальный осмотр, проверка герметичности, высоковольтный тест
- Прошедшие входной контроль квадруплеты отправлялись на радиационный тест на установку GIF (Gamma Irradiation Facility)
- Основной элемент GIF – источник  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ, 16 ТБк)

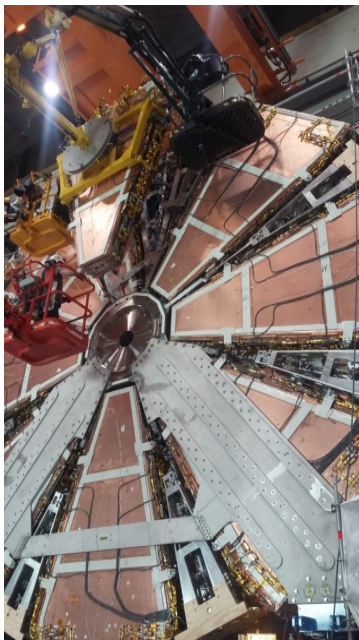
Рабочая смесь:  
55%  $\text{CO}_2$  + 45%  $\text{C}_5\text{H}_{12}$

Напряжение: 2.8 кВ



# Сборка малых колес в ЦЕРН

- Модули, прошедшие тестирование, отправлялись на сборку для объединения в сектор
- Далее проводился долговременный высоковольтный тест и измерялись шумы электроники
- Собранный сектор интегрировался с двумя секторами MicroMegas детекторов и другим сектором детекторов sTGC
- Интегрированный сектор устанавливался на колесо
- Колеса были перевезены и доставлены в шахту детектора ATLAS



23.12.2021



Научная сессия ОФВЭ - Соловьев В.М.

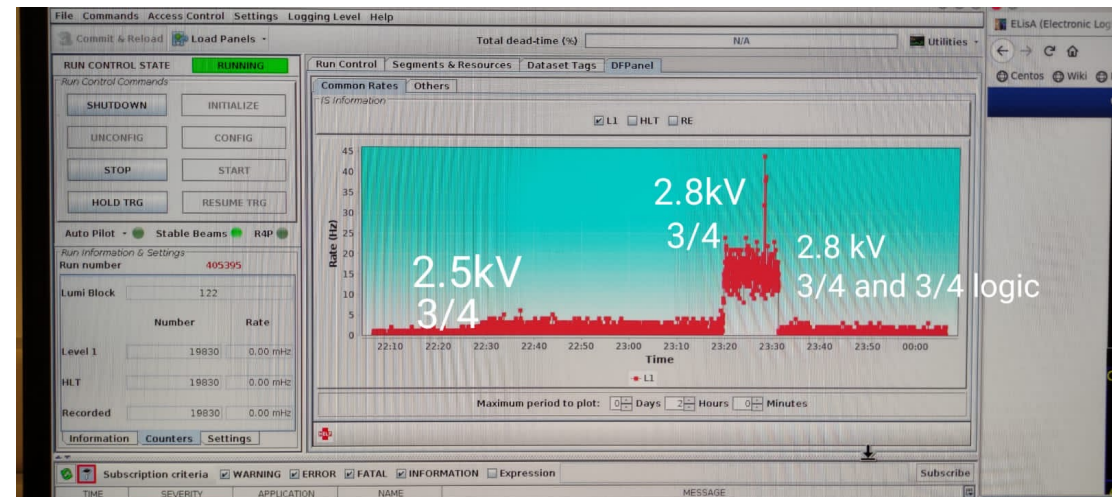
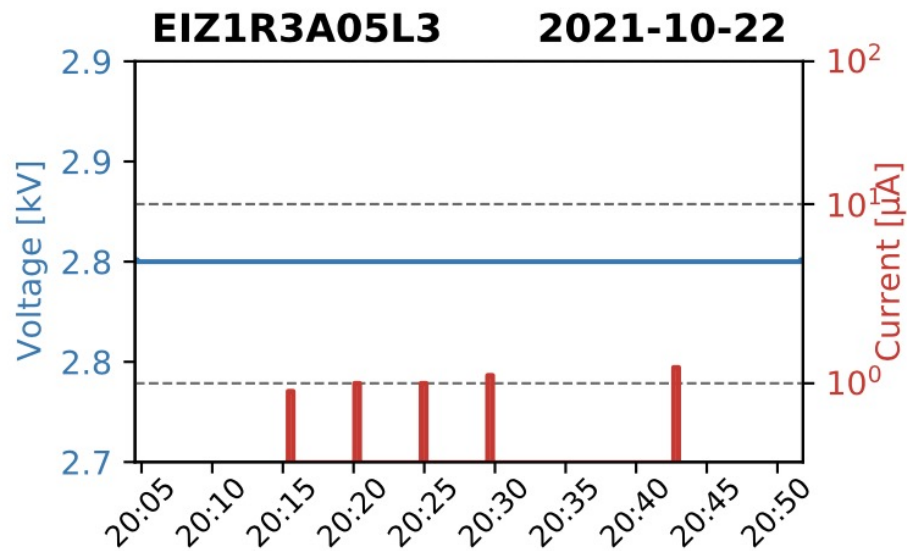


15



# Работа малых колес в Pilot Beam Run

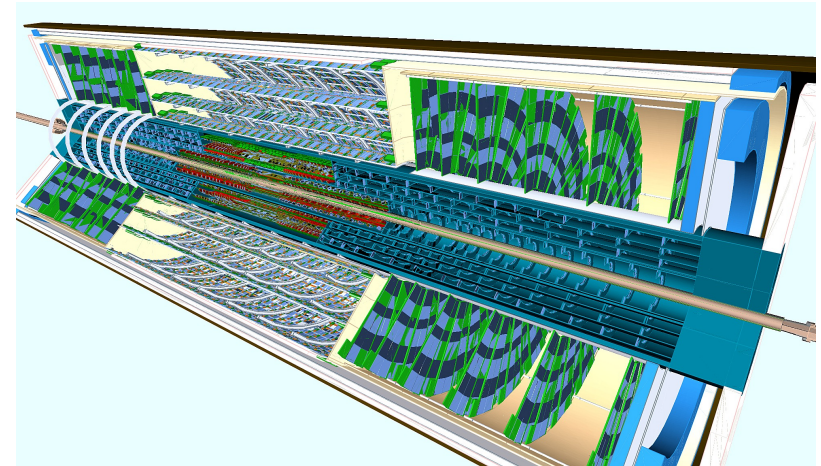
- 27 июня 2021 первое колесо (A) перевезено на площадку ATLAS, а 12 июля доставлено в шахту
- 22 октября колесо A участвовало в сборе данных с первых включений пучка (splashes)
- 29 октября были получены первые данные с триггера в совпадении трех плоскостей из четырех



- 14 октября второе колесо (B) перевезено на площадку ATLAS, а 4 ноября доставлено в шахту

# Создание системы охлаждения нового трекера ATLAS – детектора ITk

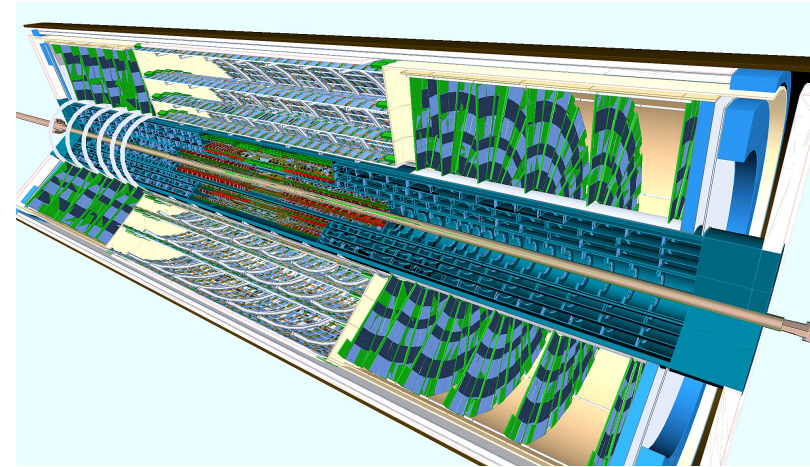
- ПИЯФ участвует в создании системы охлаждения для нового внутреннего трекового детектора ITk (Inner Tracker) в рамках второго этапа модернизации (Phase-II) детектора ATLAS
- Распределительная система для теплоносителя ( $\text{CO}_2$ ) будет состоять из коллекторов трёх различных типов, которые будут размещаться в специальных контейнерах
- Всего планируется изготовить 16 контейнеров 1-го типа и по 8 контейнеров 2-го и 3-го типов
- В рамках подготовки к производству в ПИЯФ было отремонтировано и оборудовано помещение для выполнения работ с орбитальной сваркой
- Получены сертификаты персонала и процедуры сварки международного образца
- Перед отправкой в ЦЕРН готовых изделий будет выполнен ряд тестов качества сварных соединений: рентгеновский и визуальный контроль швов, и испытание системы на способность выдерживать давление в 160 атм
- Для проведения испытаний в ЦЕРН в первой половине 2022 года будут изготовлены тестовые образцы коллекторов 1-го и 2-го типов



**Спасибо за внимание!**

# Создание системы охлаждения нового трекера ATLAS – детектора ITk

- ПИЯФ участвует в создании системы охлаждения для нового внутреннего трекового детектора ITk (Inner Tracker) в рамках второго этапа модернизации (Phase-II) детектора ATLAS
- Распределительная система для теплоносителя ( $\text{CO}_2$ ) будет состоять из коллекторов трёх различных типов, которые будут размещаться в специальных контейнерах
- К настоящему времени завершена разработка контейнеров 1-го и 2-го типов
- Всего планируется изготовить 16 контейнеров 1-го типа и по 8 контейнеров 2-го и 3-го типов



# Создание системы охлаждения нового трекера ATLAS – детектора ITk

- В рамках подготовки к производству в ПИЯФ было отремонтировано и оборудовано помещение для выполнения работ с орбитальной сваркой
- Получены сертификаты персонала и процедуры сварки международного образца
- Перед отправкой в ЦЕРН готовых изделий будет выполнен ряд тестов качества сварных соединений: рентгеновский и визуальный контроль швов, и испытание системы на способность выдерживать давление в 160 атм
- Для проведения испытаний в ЦЕРН в первой половине 2022 года будут изготовлены тестовые образцы коллекторов 1-го и 2-го типов

