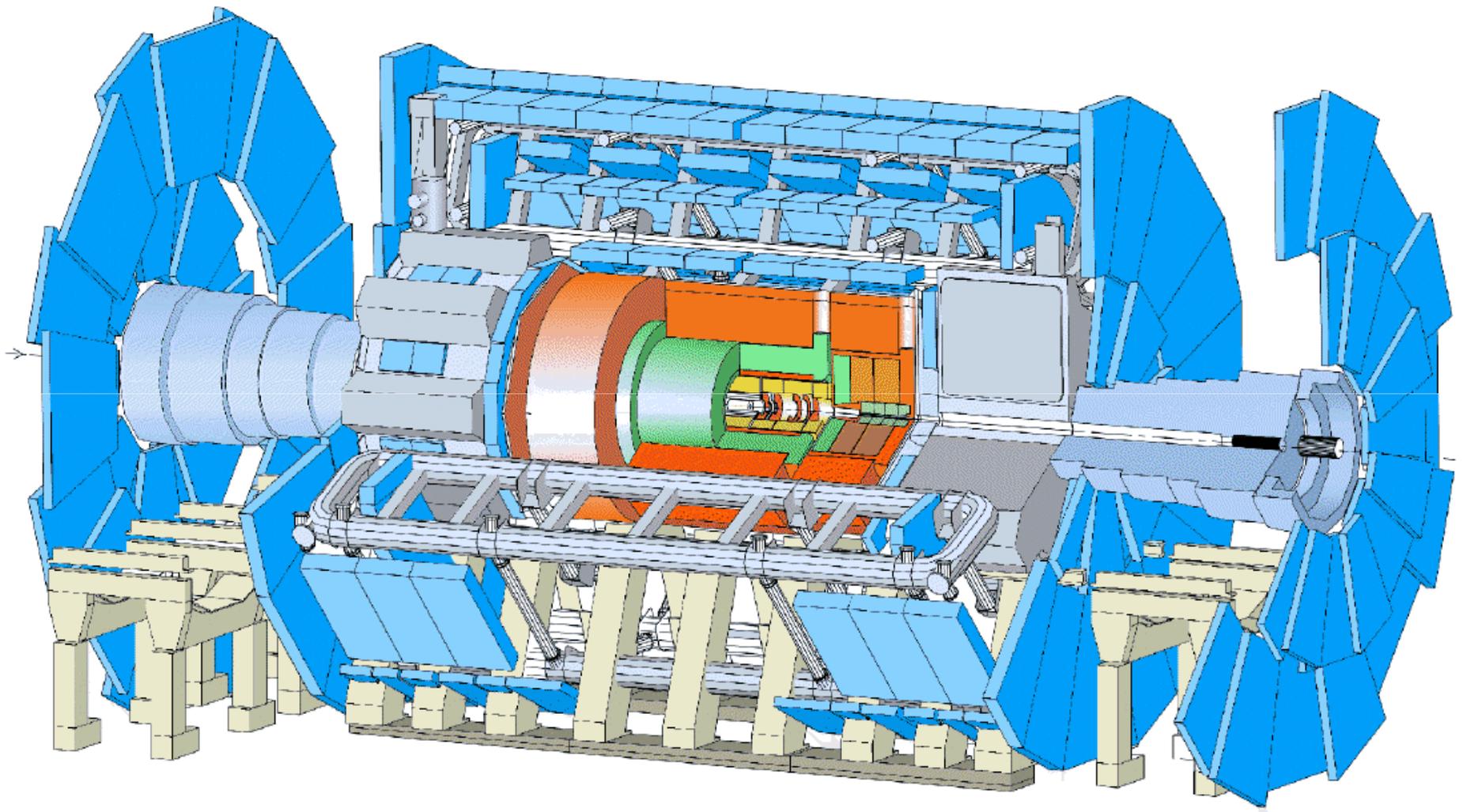


**АТЛАС**  
**свежие результаты**  
**и**  
**планы развития**

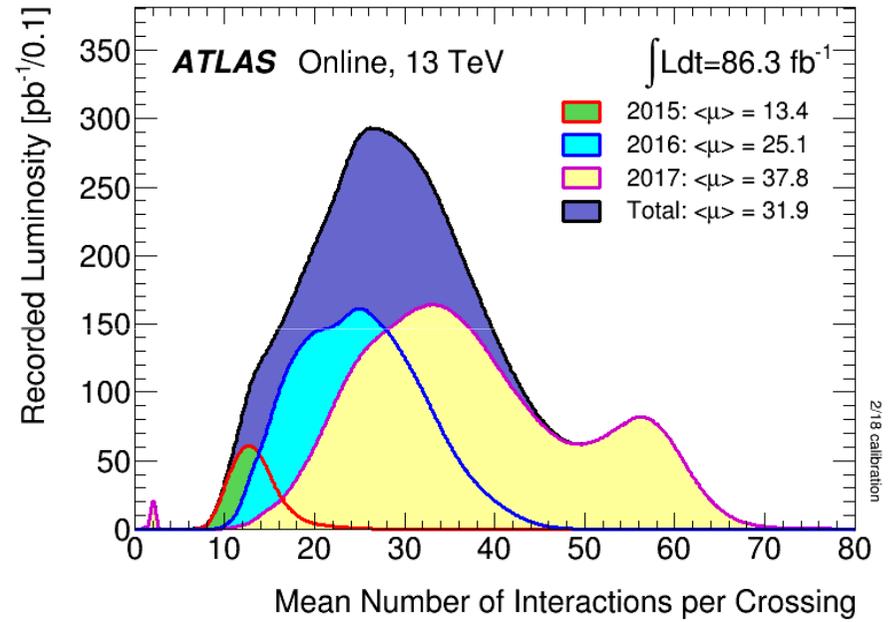
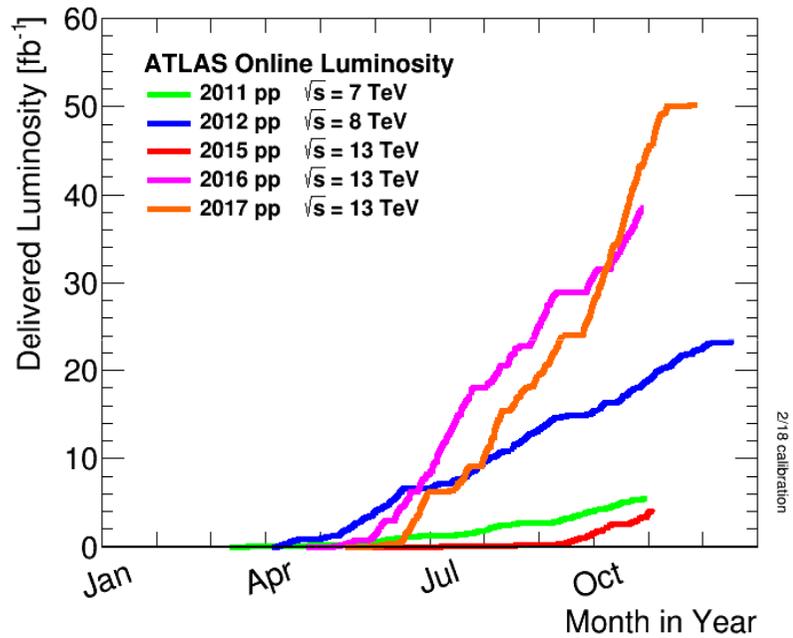
**ФИАН**

**XI Черенковские чтения**  
**новые методы в экспериментальной**  
**ядерной физике и физике частиц**  
**17/04/2018**

А.Зайцев, НИЦ КИ-ИФВЭ, Протвино



# БАК



$$L_{\text{max}} = 20.9 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

Как найти «новую физику» на ускорителях/коллайдерах:

- Прецизионные измерения
- Экзотические процессы
- Редкие процессы
- Новые объекты
- .....

Сосредоточимся на тяжелых объектах:

t  
W (Z)  
H

Модернизация ATLAS:

- Планы
- Ожидаемые результаты

## БАК – фабрика тяжелых частиц

	Годы	2010-2012	2015-2017	
	$\sqrt{s}$	7 - 8 ТэВ	13 ТэВ	
	L fb-1	25	80	N sum
<b>W</b>	$\sigma_{nb}$	$10^2$	$2 \cdot 10^2$	
	N	$2,5 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{10}$	<b><math>1,9 \cdot 10^{10}</math></b>
<b>Z</b>	$\sigma_{nb}$	$3 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^1$	
	N	$7,5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$	<b><math>6 \cdot 10^9</math></b>
<b>H</b>	$\sigma_{nb}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	
	N	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	<b><math>5 \cdot 10^6</math></b>
<b>t</b>	$\sigma_{nb}$	$2 \cdot 10^{-1}$	1	
	N	$5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^7$	<b><math>8 \cdot 10^7</math></b>

$$m_W$$

Particle Data Group:

$$m_W = 80385 \pm 15 \text{ MeV (LEP и Тэватрон)}$$

$$\text{SM предсказание } m_W = 80362 \pm 8 \text{ MeV}$$

$$m_W - \text{«слабое звено»} \quad \text{Мечта: } 15 \text{ МэВ} \rightarrow 8 \text{ МэВ}$$

В экспериментах на LHC большая статистика событий с W-бозоном.  
Основная проблема – систематика.

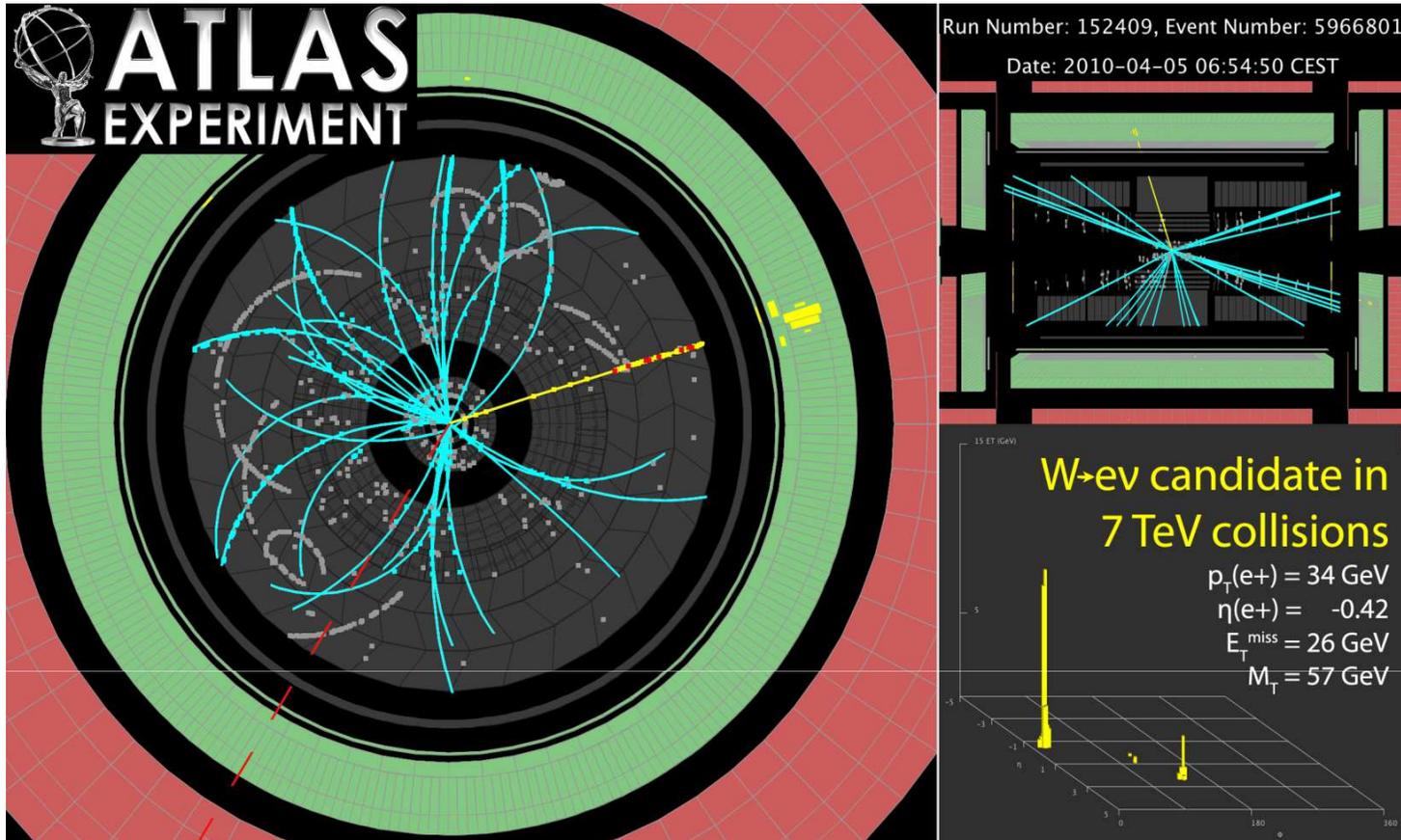
АТЛАС 2017

$$\sqrt{S} = 7 \text{ ТэВ} \quad L=4.6 \text{ fb}^{-1}$$

$$7,8 \cdot 10^6 \text{ событий } W \rightarrow \mu\nu$$

$$5,9 \cdot 10^6 \text{ событий } W \rightarrow e\nu$$

**Eur.Phys.J. C78 (2018) no.2, 110**



$p_T^\ell$

$\vec{u}_T = \sum_i \vec{E}_{T,i}$   $-\vec{u}_T$  provides an estimate of the boson transverse momentum.

$\vec{p}_T^{\text{miss}} = -(\vec{p}_T^\ell + \vec{u}_T)$  missing transverse momentum

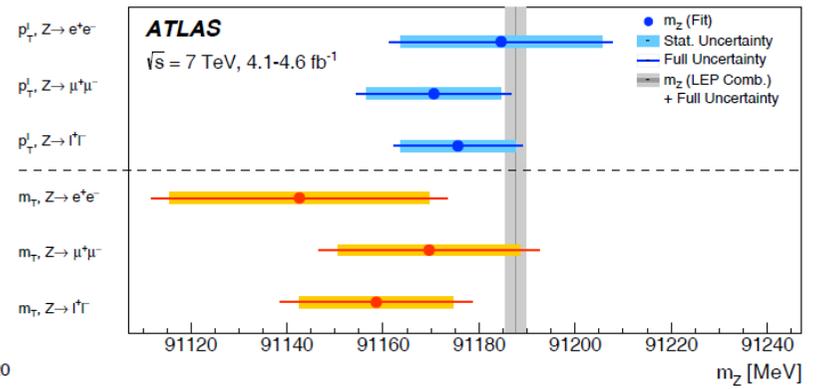
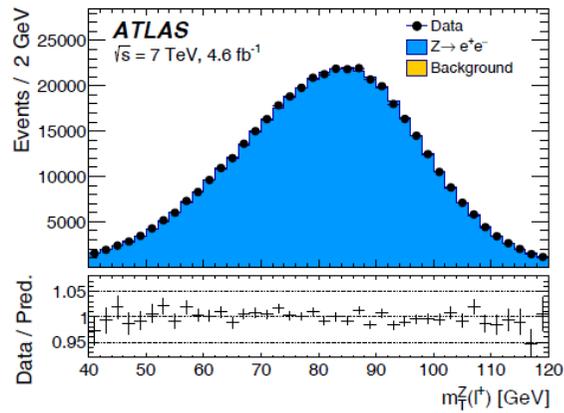
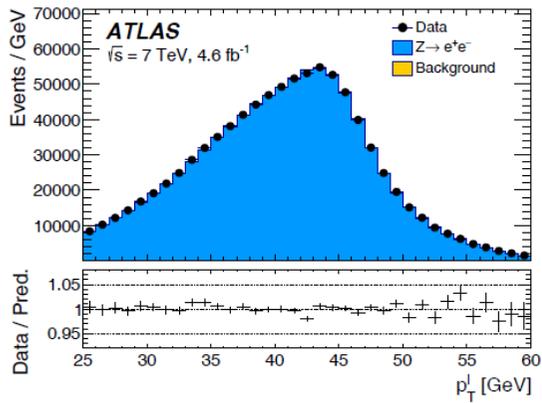
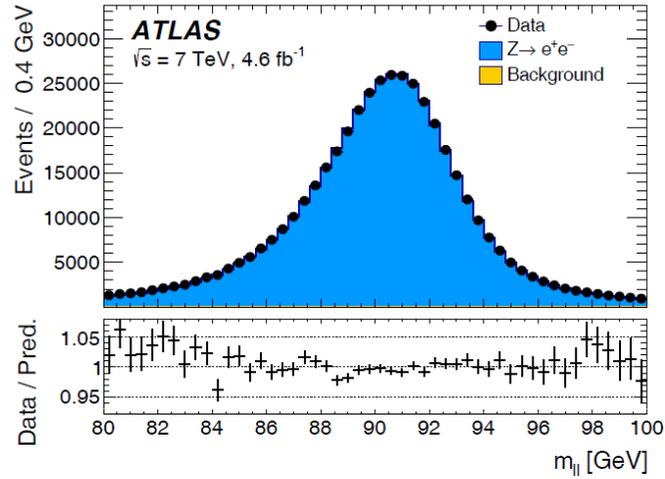
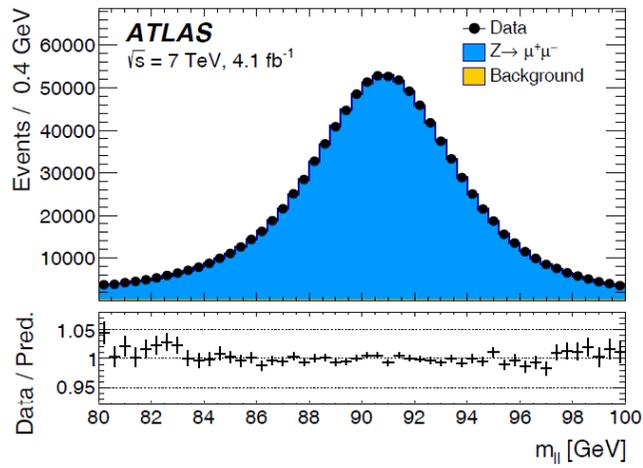
$m_T = \sqrt{2p_T^\ell p_T^{\text{miss}}(1 - \cos \Delta\phi)}$  transverse mass

## Стратегия анализа

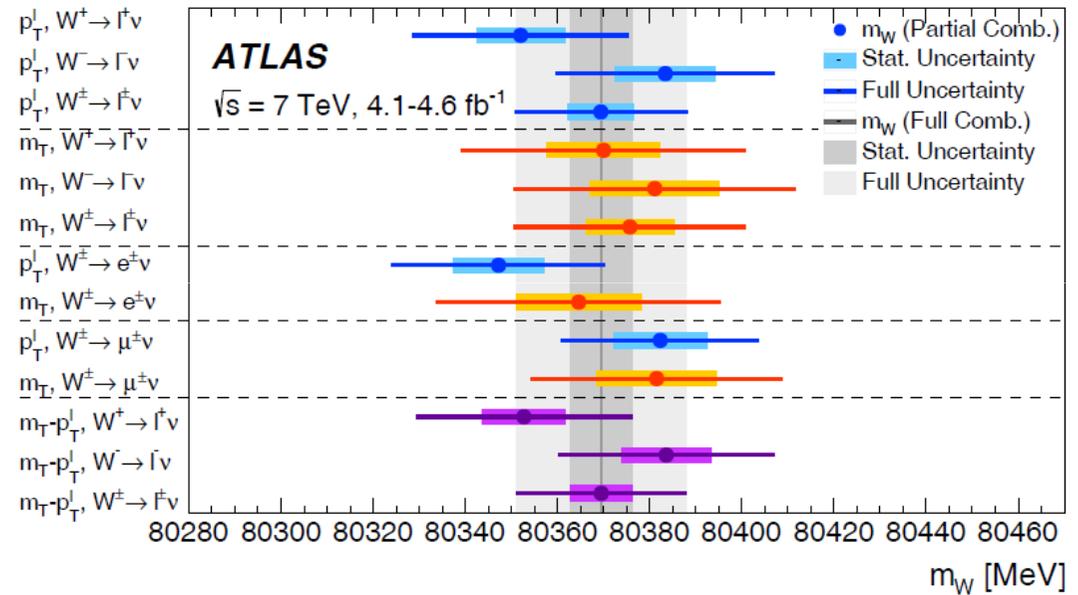
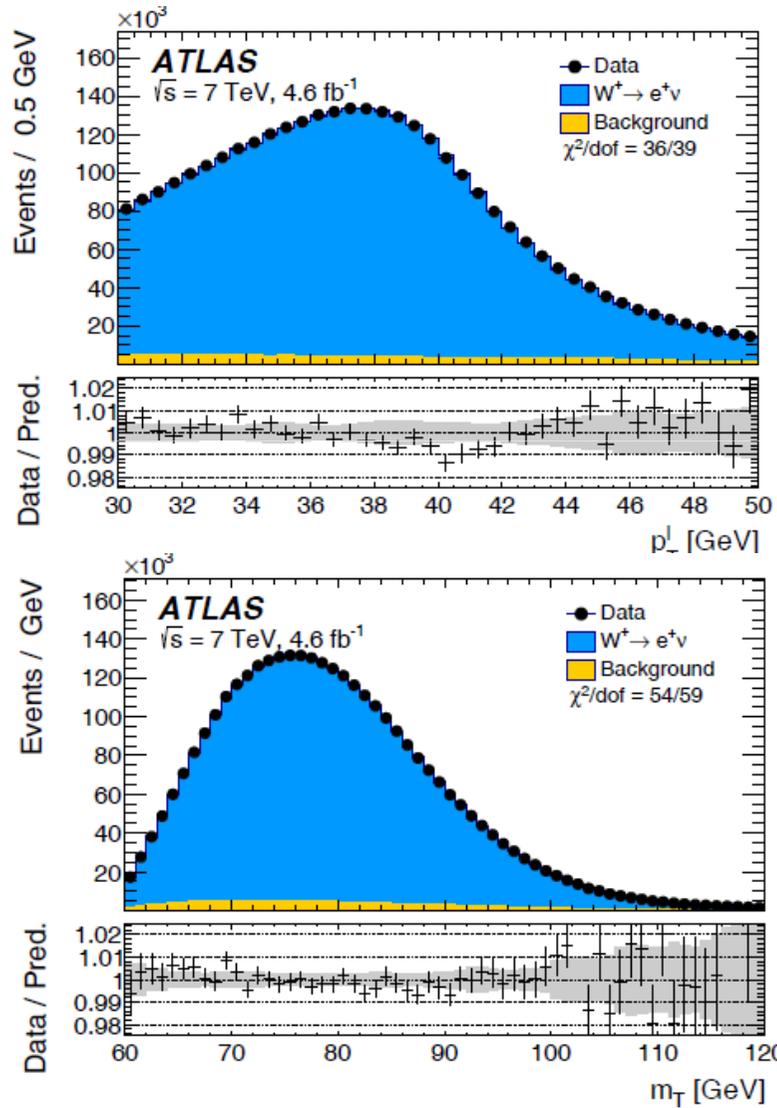
Масса  $W$ -бозона определяется в результате фитирования распределений по поперечному импульсу лептонов (Якобиан-пик на  $m/2$ ) и по поперечной массе (конец спектра на  $m$ ). В первом методе существенна зависимость  $p_T$  от поперечного импульса  $W$ -бозона и его спинового состояния, во втором – зависимость  $m_T$  от характеристик частиц «отдачи». В качестве шаблонных распределений использованы результаты МК – моделей.

Для калибровки детекторов и для настройки параметров моделей использовались события с  $Z$ - бозонами ( $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $Z \rightarrow e^+e^-$ ) при энергиях  $\sqrt{S} = 7$  и  $8$  ТэВ ( $m_Z$  для настройки  $p_T$ ,  $p_T^Z$  для настройки  $m_T^{\text{miss}}$ ).

# Tecm c m<sub>Z</sub>

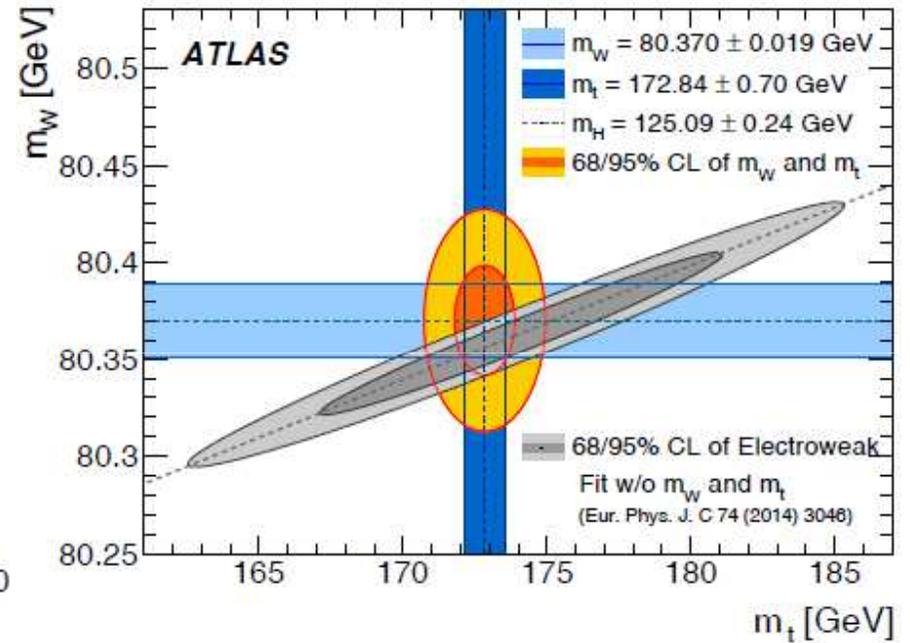
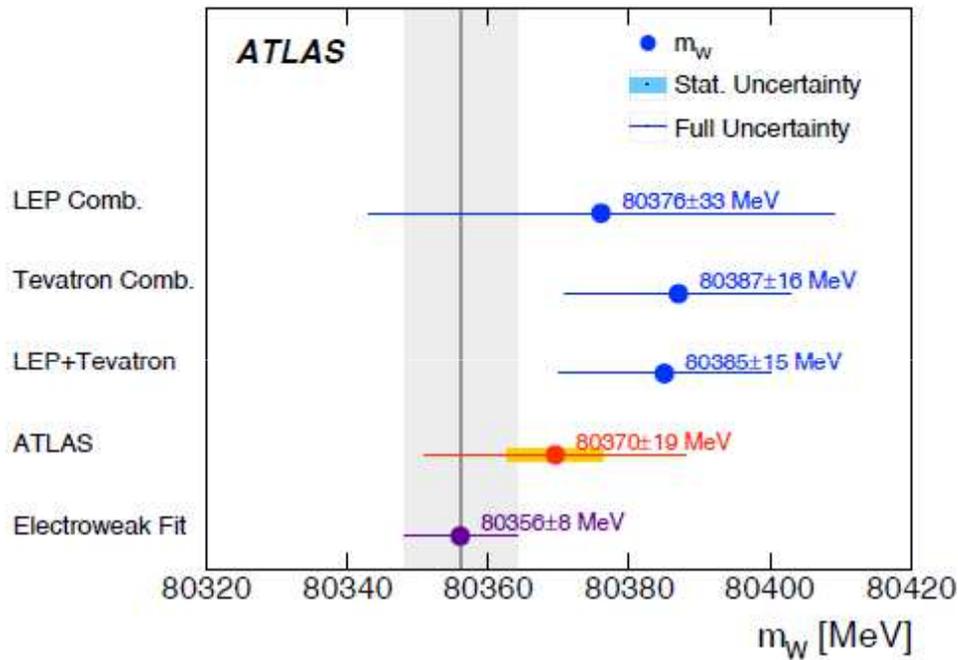


# $m_W$



**$m_W = 80370 \pm 7 \text{ MeV}(\text{stat.}) \pm 11 \text{ MeV}(\text{exp. syst.})$   
 $\pm 14 \text{ MeV}(\text{mod. syst.}) = 80370 \pm 19 \text{ MeV}$**

$$m_W : m_{top} : m_H$$



$m_{top}$

Top quark mass in the  $t \bar{t} \rightarrow$  dilepton channel

Physics Letters B 761 (2016) 350 - 371

$\sqrt{S} = 8 \text{ ТэВ}$   $L = 20,2 \text{ fb}^{-1}$

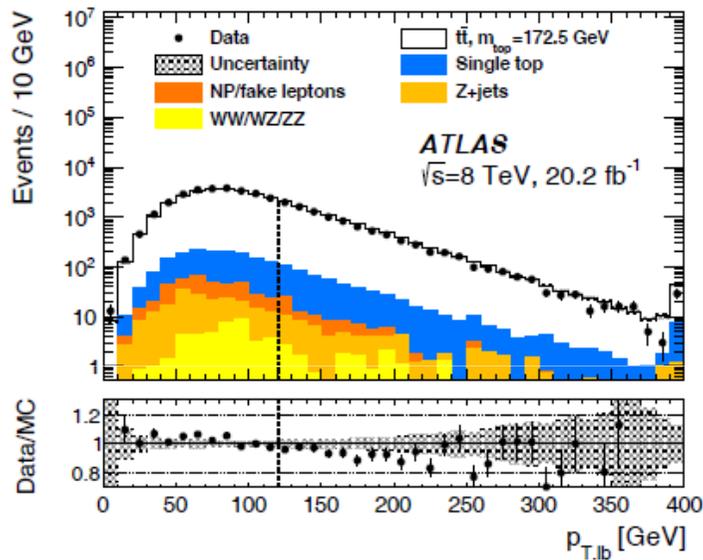
$pp \rightarrow t (b W^+ \rightarrow l^+ \nu) \bar{t} (\bar{b} W^- \rightarrow l^- \nu) + X$

$ll: e^+ e^-, e \mu, \mu^+ \mu^-, \tau^+ \tau^- \rightarrow l^+ l^- X$

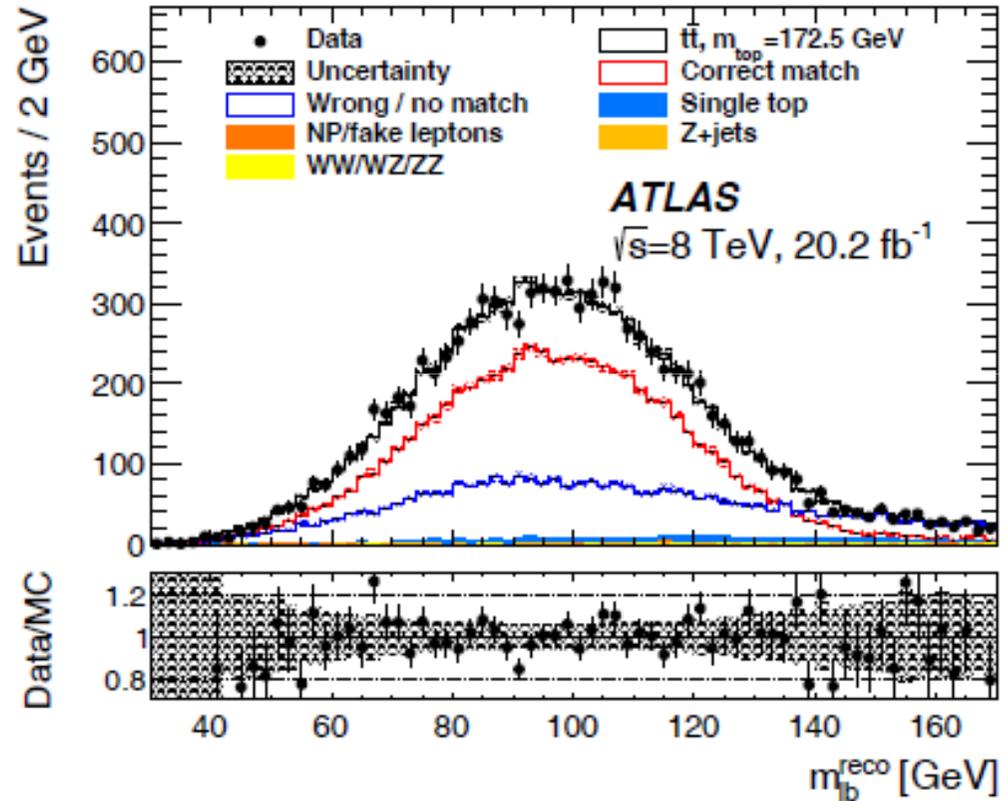
Отбор событий

1. Лептон в триггере
2. Два лептона с противоположными электрическими зарядами
3. Для событий с лептонами одинакового аромата ( $e e, \mu \mu$ )  
 $E_T^{miss} > 60 \text{ ГэВ}, m_{ll} > 15 \text{ ГэВ}, m_{ll} \neq m_z \pm 10 \text{ ГэВ}$
4. Для канала  $e\mu$   $\sum P_T > 130 \text{ ГэВ}$
5. Две струи с  $P_T > 25 \text{ ГэВ}$  и  $|\eta| < 2.5$ , хотя бы одна с признаком  $b$ -кварка

# Фитирование шаблонами



Данные хорошо описываются МК моделями. Фон мал (<1%).



В результате фита находим массу  
 $m_{top} = 172.99$  ГэВ  
и статистическую ошибку  
 $\sigma = 0.41$  ГэВ

## *Систематическая ошибка*

Signal Monte Carlo generator  
Initial- and final-state QCD radiation  
Underlying event  
Colour reconnection  
Parton distribution function  
Background normalisation  
W=Z+jets shape  
Fake leptons shape  
Jet energy scale  
Relative b-to-light-jet energy scale  
Jet energy  
Jet reconstruction efficiency  
Jet vertex fraction  
b-tagging  
Leptons  
Emiss  
Pile-up  
**Total systematic uncertainty 0.74±0.29**

$m_{top}$

$$m_{top} = 172.99 \pm 0.41(\text{стат.}) \pm 0.74(\text{сист.}) \text{ ГэВ}$$

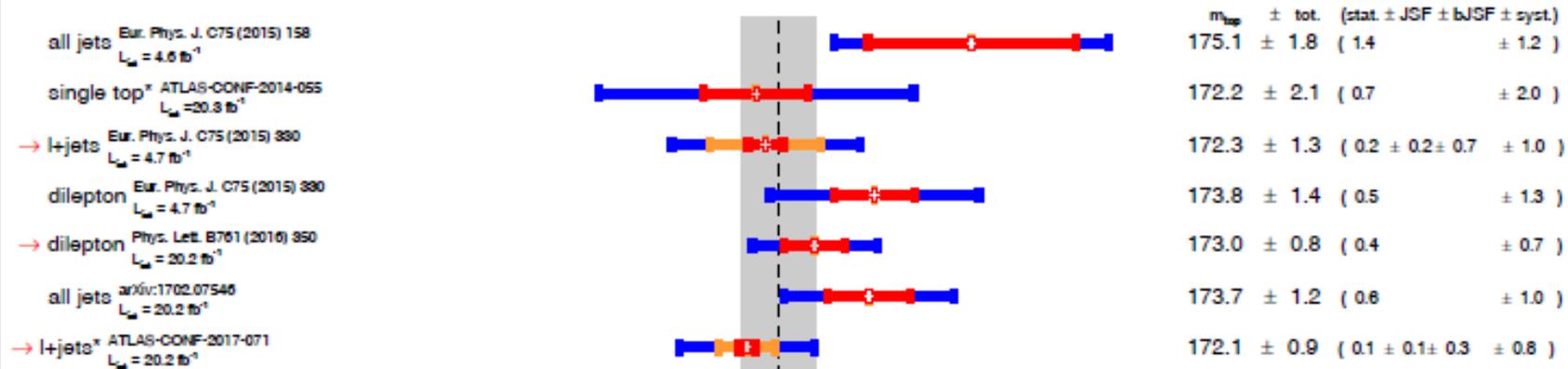
Объединение с данными АТЛАСа при  
 $\sqrt{S} = 7$  ТэВ дает

$$m_{top} = 172.84 \pm 0.34(\text{стат.}) \pm 0.61(\text{сист.}) \text{ ГэВ}$$

$$m_{top} = 172.84 \pm 0.70 \text{ ГэВ}$$

# ATLAS Preliminary

$m_{top}$  summary - September 2017,  $L_{int} = 4.6 \text{ fb}^{-1} - 20.3 \text{ fb}^{-1}$



$\sigma(t\bar{t})$  dilepton Eur. Phys. J. C74 (2014) 3109  
 $L_{int} = 4.6-20.3 \text{ fb}^{-1}$

Differential  $\sigma(t\bar{t}+1\text{-jet})$  JHEP 10 (2015) 121  
 $L_{int} = 4.6 \text{ fb}^{-1}$

Differential  $\sigma(t\bar{t})$  dilepton (8 dist.) ATLAS-CONF-2017-044  
 $L_{int} = 20.2 \text{ fb}^{-1}$

ATLAS Comb. September 2017\* ATLAS-CONF-2017-071  
 $172.51 \pm 0.50$

- - - - - ATLAS Comb.  $\pm 1\sigma$   
 - - - - - stat. uncertainty  
 - - - - - stat.  $\oplus$  JSF  $\oplus$  bJSF uncertainty  
 - - - - - total uncertainty  
 \*Preliminary,  $\rightarrow$  Input to comb.

ATLAS CONF 2017-071

$m_{top} = 172.51 \pm 0.50 \text{ GeV}$

# $m_H$

The Higgs boson mass in the  
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels

ATLAS-CONF-2017-046

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $L = 36,1 \text{ fb}^{-1}$

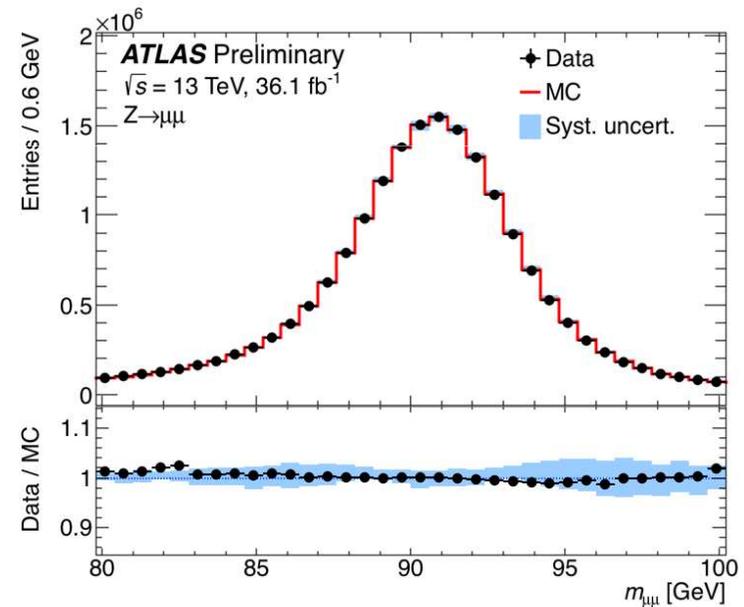
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$   $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Мюоны

1. Реконструкция, отбор
2. Калибровка ( $Z \rightarrow \mu\mu$ ,  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ )  
Поправляются импульсы (ошибка  $\sim 10^{-3}$ ) и разрешение ( $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ )

## Фотоны и электроны

1. ЭМ-кластер+трек: электрон  
ЭМ-кластер без трека: фотон
2. Поправки на потери энергии в веществе
3. Калибровка ( $Z \rightarrow e e$ ,  $J/\psi \rightarrow e e$ ,  $Z \rightarrow ll \gamma$ )



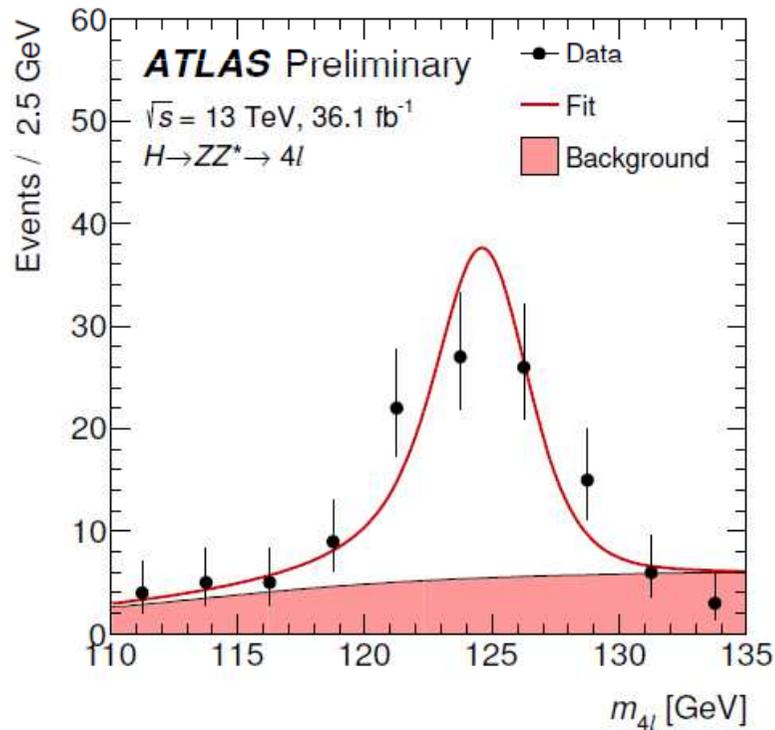
# H → 4l

110 < m<sub>4l</sub> < 135 GeV

Фоновые процессы:

- Z+jets, t  $\bar{t}$ , WZ: вклад мал
- ZZ\*: надежно вычисляется

Final state	Signal (125 GeV)	ZZ*	Z + jets, t $\bar{t}$ , WZ, ttV, VVV	Expected	Observed
4 $\mu$	20.6 ± 1.7	15.9 ± 1.2	2.0 ± 0.4	38.5 ± 2.1	38
2e2 $\mu$	14.6 ± 1.1	11.2 ± 0.8	1.6 ± 0.4	27.5 ± 1.4	34
2 $\mu$ 2e	11.2 ± 1.0	7.4 ± 0.7	2.2 ± 0.4	20.8 ± 1.3	26
4e	11.1 ± 1.1	7.1 ± 0.7	2.1 ± 0.4	20.3 ± 1.3	24
Total	57 ± 5	41.6 ± 3.2	8.0 ± 1.0	107 ± 6	122



Систематика

Systematic effect	Uncertainty on m <sub>H</sub> <sup>ZZ*</sup> [MeV]
Muon momentum scale	40
Electron energy scale	20
Background modelling	10
Simulation statistics	8

$$m_H^{ZZ^*} = 124.88 \pm 0.37 \text{ (стат)} \pm 0.05 \text{ (сист)} \text{ ГэВ} = 124.88 \pm 0.37 \text{ GeV}$$

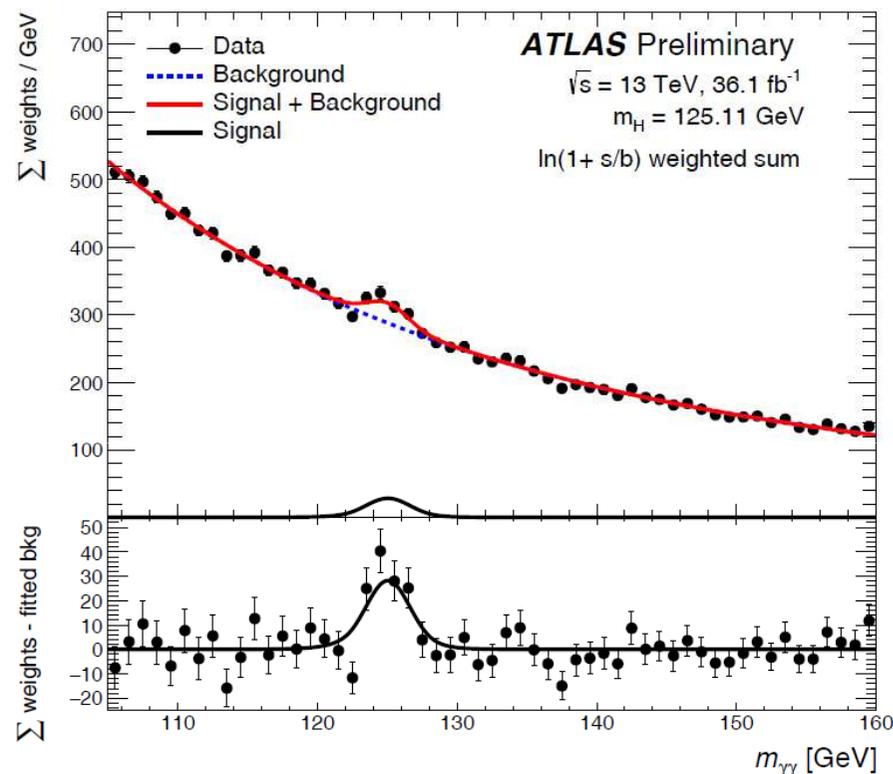
# $H \rightarrow \gamma\gamma$

Отбор, реконструкция:  
 Два «хороших»  $\gamma$ -кванта с  $E_T > 25$  ГэВ  
 Нахождение вершины  
 Классификация событий (31 класс),  
 например «ggH OJ SEN»

Разрешение:  $\sigma(m_H) = 1.42\text{--}2.14$  ГэВ

Фон: параметризуется гладкой  
 функцией для каждой категории

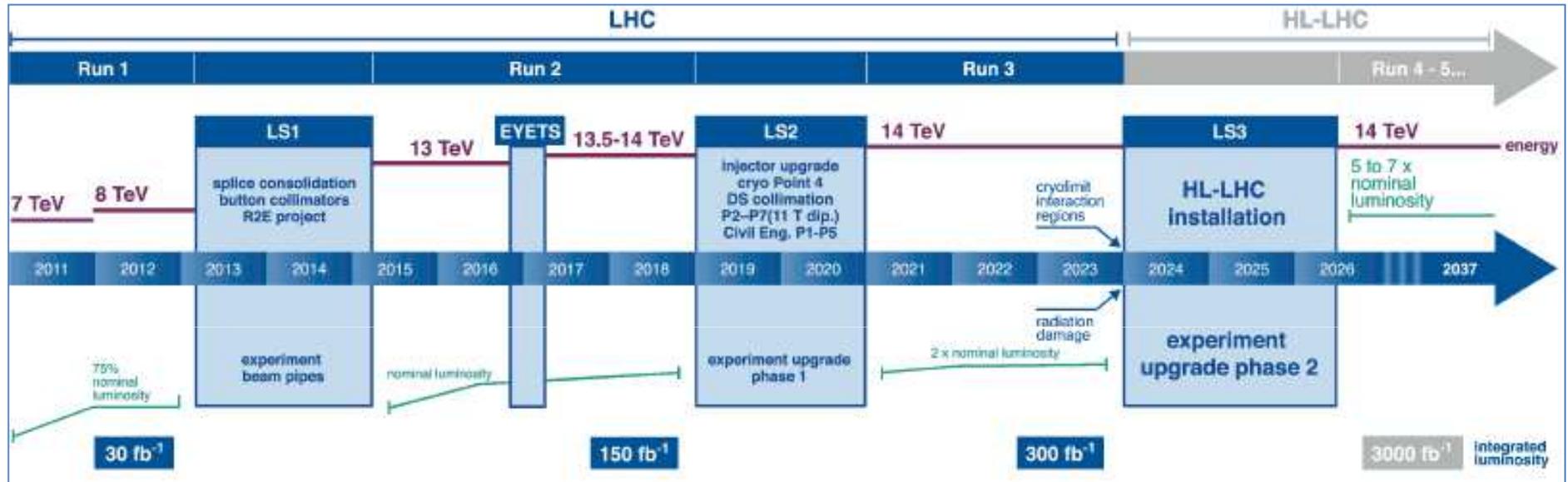
Систематика:  $\sigma(m_H) = 0.36$  ГэВ  
 - калибровка, нелинейность,  
 вещество, форма ливня, определение  
 вершины, модель фона.....

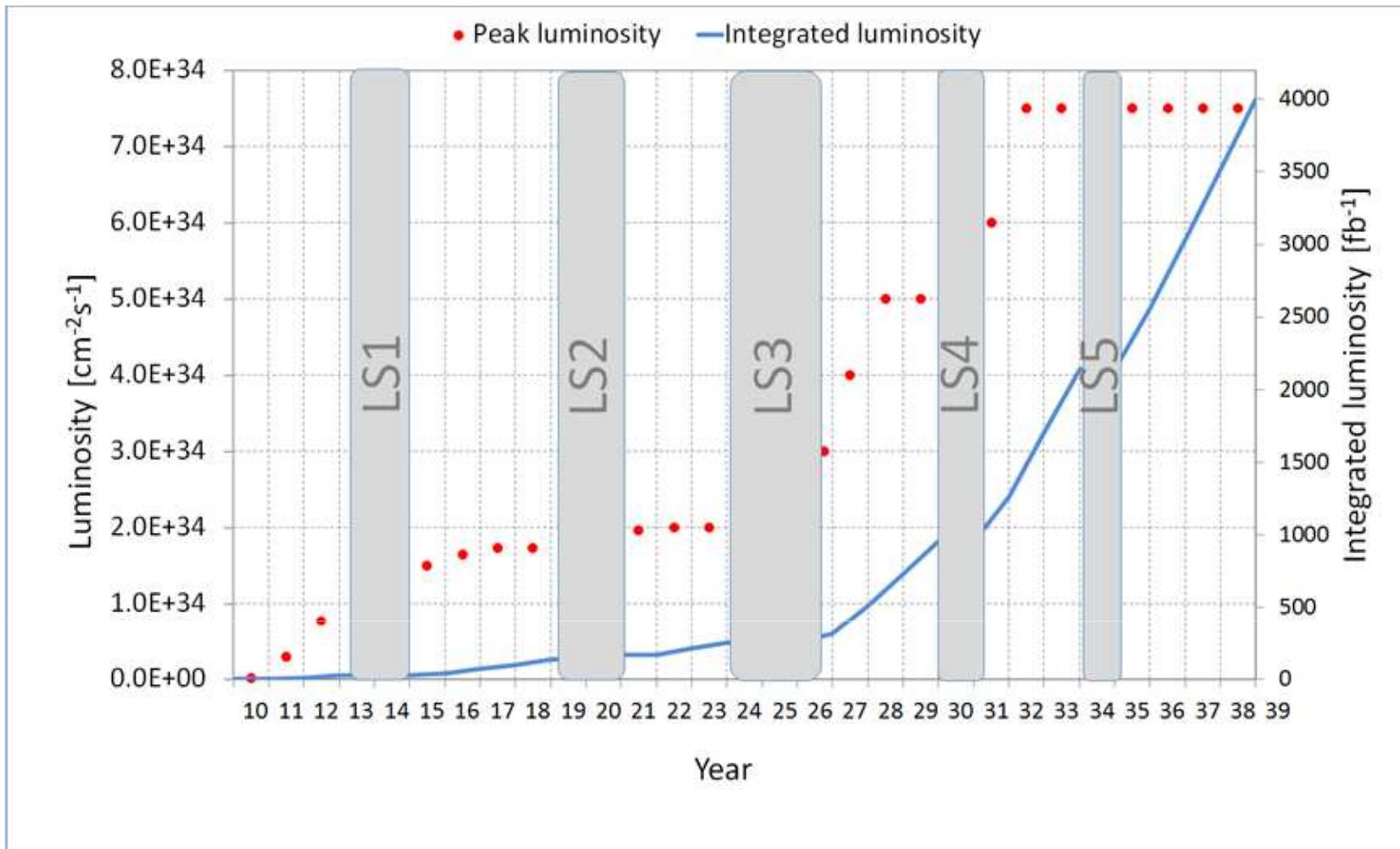


Channel	Mass measurement [GeV]
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$	$124.88 \pm 0.37$ (stat) $\pm 0.05$ (syst) = $124.88 \pm 0.37$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$125.11 \pm 0.21$ (stat) $\pm 0.36$ (syst) = $125.11 \pm 0.42$
Combined	$124.98 \pm 0.19$ (stat) $\pm 0.21$ (syst) = $124.98 \pm 0.28$

# Программа развития БАК

HILUMILHC-Del-D1-10-v1.0





Нам предстоит работать на БАК еще 20 лет. В 2038 году будет так:

$\sqrt{s}=14$  ТэВ

$L=7.5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\int L dt = 4 \text{ ab}^{-1}$  ( инт. светимость и рад. нагрузка в 50 раз выше сегодняшней)

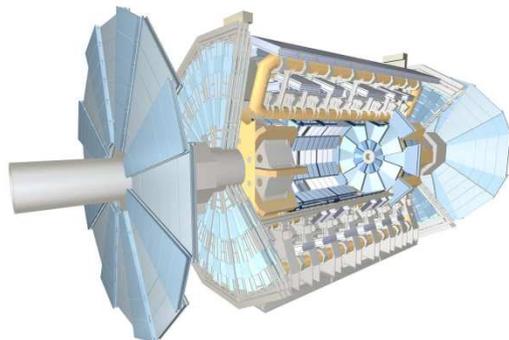
$10^4$  треков на столкновение

# *Модернизация Фаза I 2019-2020 годы*

Основные проекты:

- Новые малые мюонные колеса (New Small Wheels, NSW)
- Быстрый трекер (Fast Tracker, FTk)
- Жидкоаргоновый калориметр (LAr)
- Сцинтилляционный калориметр (TileCal)
- Триггер и система сбора данных (TDAQ)
- Разные проекты
  - мюонные детекторы
  - малоугловые детекторы

# Новые малые колеса (NSW)



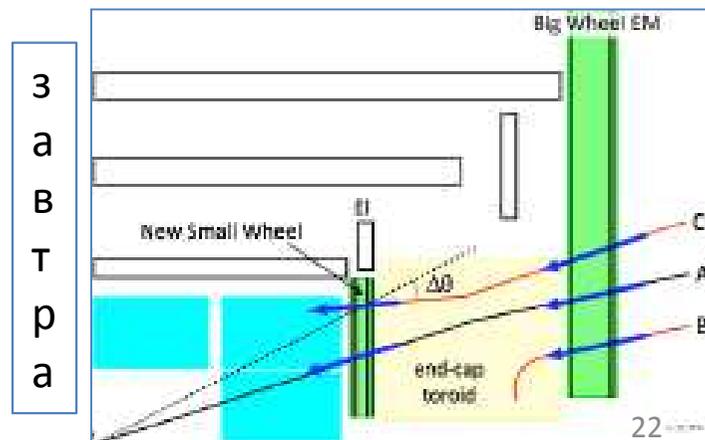
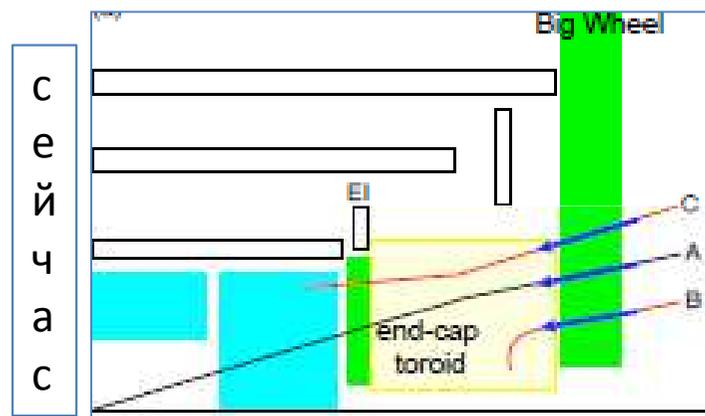
Мюонные малые колеса, внутренние торцевые мюонные детекторы, находятся в области особенно высокой загрузки.

Существующие детекторы не смогут работать при повышенной светимости:

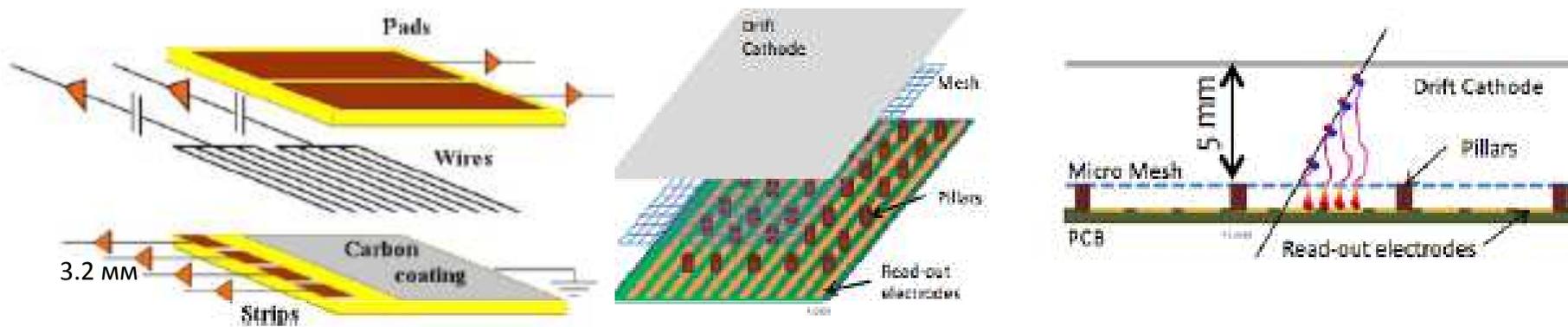
- не выдержат загрузки
- не позволят организовать триггер.

Они заменяются на новые:

- тонкоззорные камеры** с малыми полосами, **sTGC** (хороший тайминг, пространственное (угловое) разрешение достаточно для триггера)
- **МикроМегас, ММ** (основной трекер, разрешение 0.1 мм, гранулярность 0.4 мм)



# Изготовление NSW



Изготовление sTGC в НРЦ КИ-ПИЯФ

1. Намотка проволоки.
2. Готовый модуль 0

Изготовление МикроМегас в ОИЯИ

1. Изготовление считывающих панелей
2. Сборка квадруплетов

# *Модернизация Фаза II 2024-2026 годы*

Основные проекты:

- Новый внутренний трекер
- Жидкоаргоновый калориметр
- Мюонная система
- Высокогранулярный таймер
- Триггер и система сбора данных

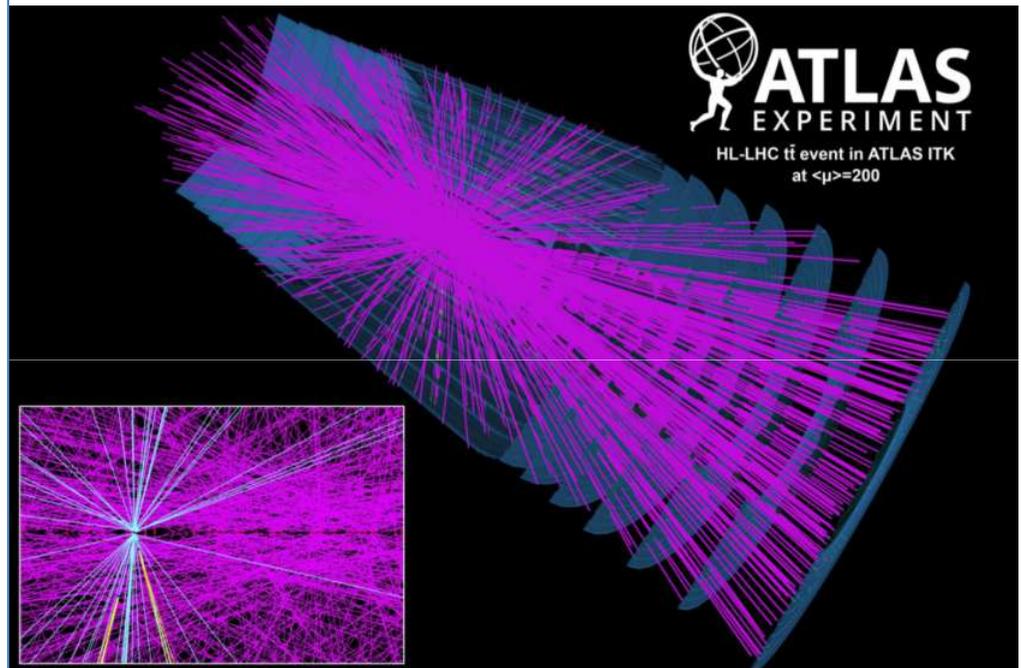
# Внутренний трекер

## Технические требования

Новый трековый детектор разрабатывается для эксплуатации в течение 10 лет при:

- светимости  $7.5 \cdot 10^{34}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>,
- 25 нс между столкновениями банчей,
- интегральной светимости до 4000 fb<sup>-1</sup>,
- среднем числе взаимодействий на столкновение банчей  $\langle \mu \rangle = 200$

Детектор должен обеспечивать высокую эффективность, разрешение, реконструкцию вершины,  $b$ -мечение в диапазоне  $|\eta| = 4$

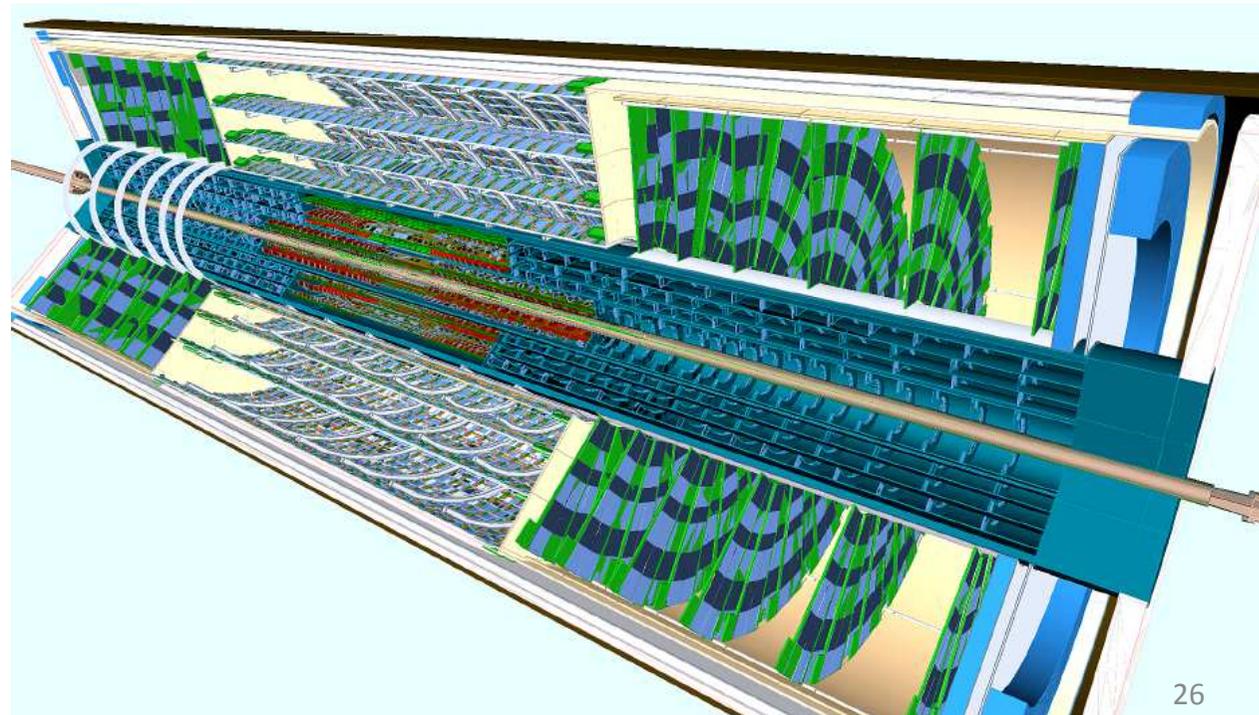
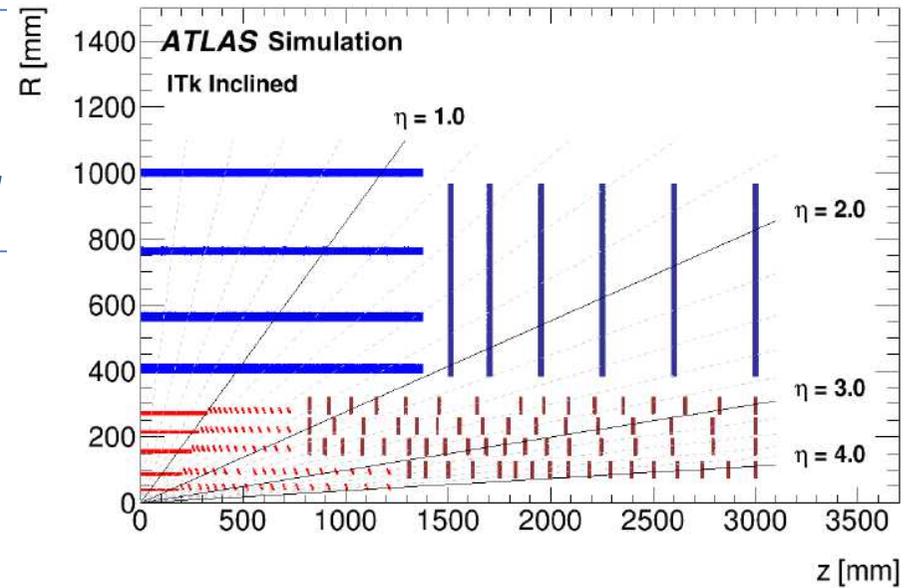


Типичное событие.  $10^4$  треков

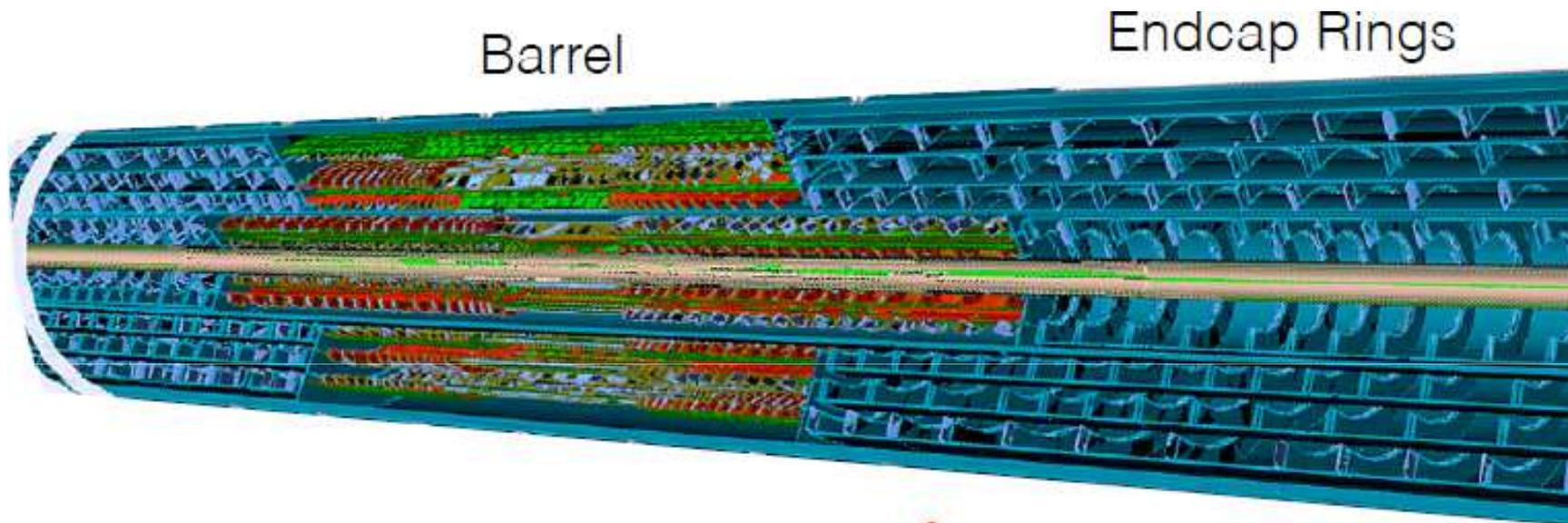
# Конструкция внутреннего трекера

Радиус 1 м, длина  $\pm 3$  м  
Все активные элементы  
кремниевые.

Внутренняя часть, 5  
слоев, - пиксельные  
детекторы,  
Внешняя часть, 4  
стерео-слоя, -  
кремниевые  
полосковые детекторы.  
Детектор находится в  
соленоидальном  
магнитном поле 2 Т.



# Пиксельный детектор



Active area: **12.7 m<sup>2</sup>**

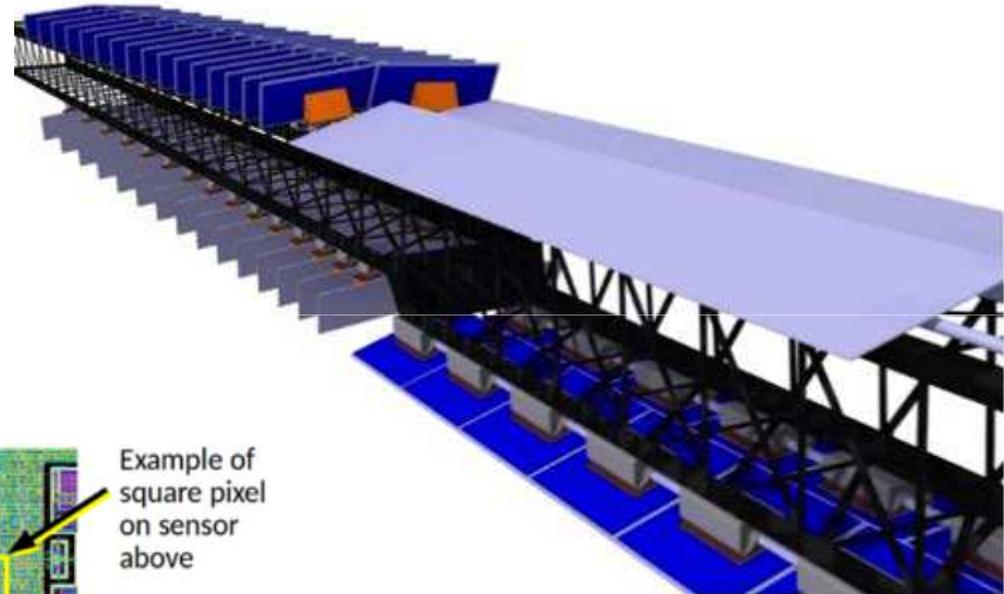
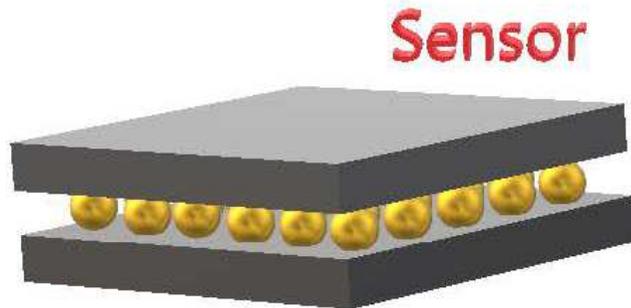
Pixel size: 50x50 (or 25x100)  $\mu\text{m}^2$

# of modules: 10276

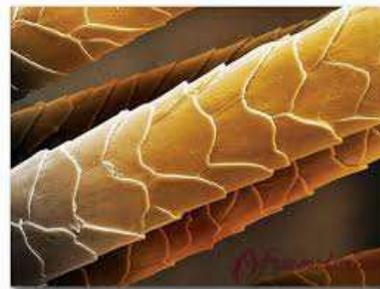
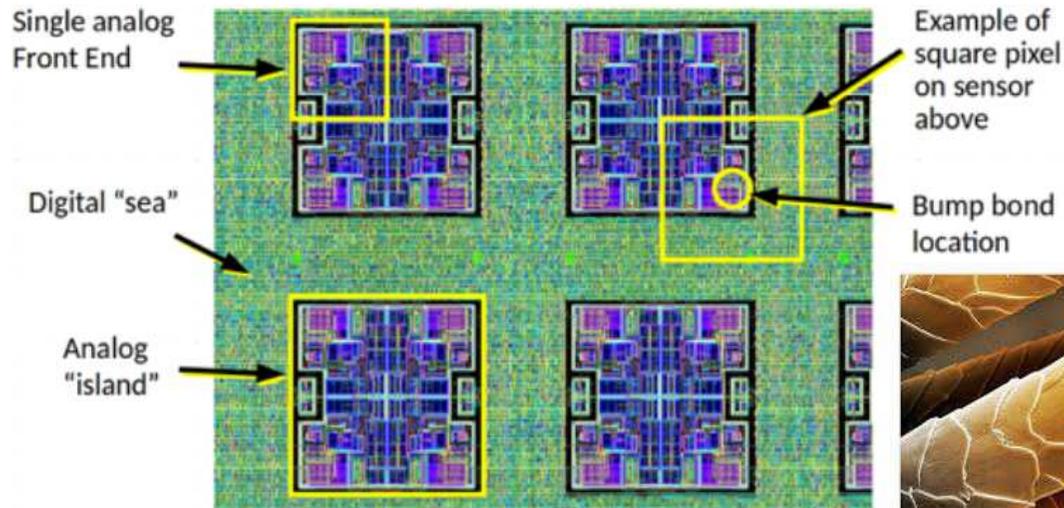
# of FE chips: 33184

# of channels:  **$\sim 5 \times 10^9$**

# Конструкция пикселя



Front-end chip

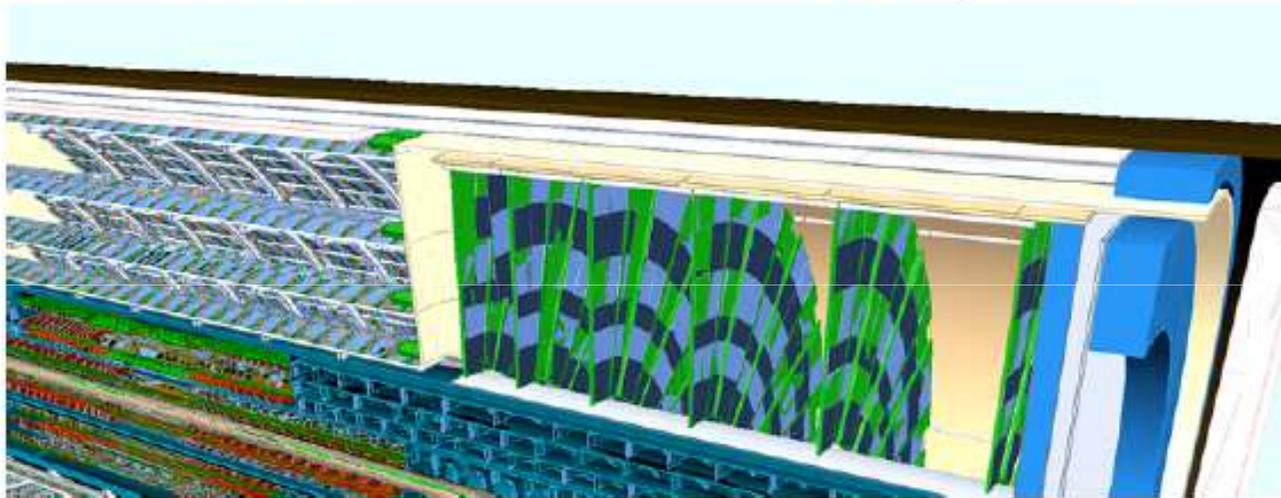


Человеческий волос  $\phi$  50 мкм

# Конструкция стрипового детектора

Barrel Staves

Endcap Petals



Active area: **165 m<sup>2</sup>**

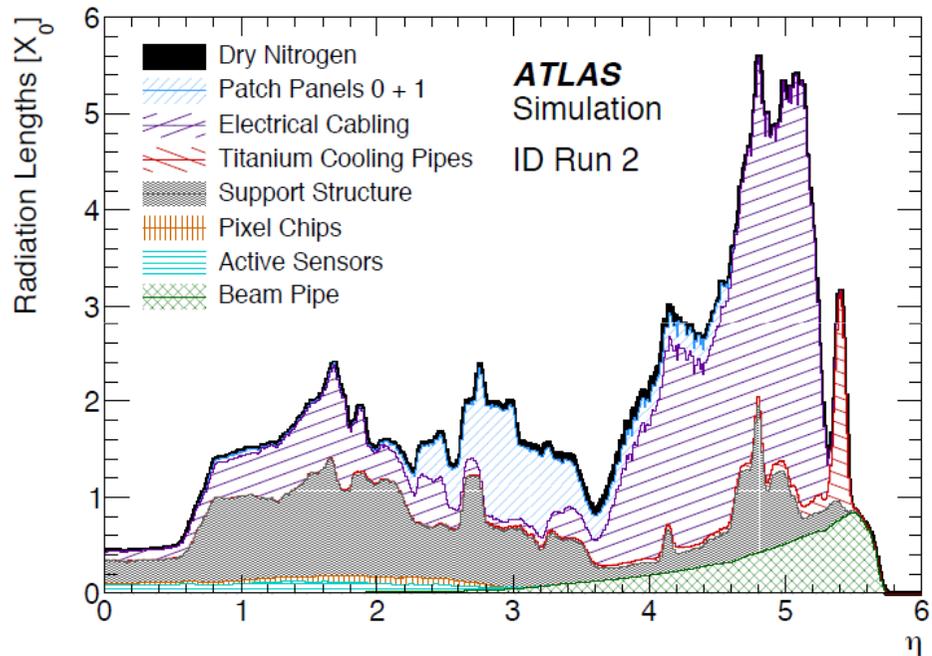
Strip pitch: 75.5  $\mu\text{m}$  (Barrel), 69 to 85  $\mu\text{m}$  (Disk)

Strip length: 24.1/48.2 mm (Barrel), 69.9 to 80.7 mm (Disk)

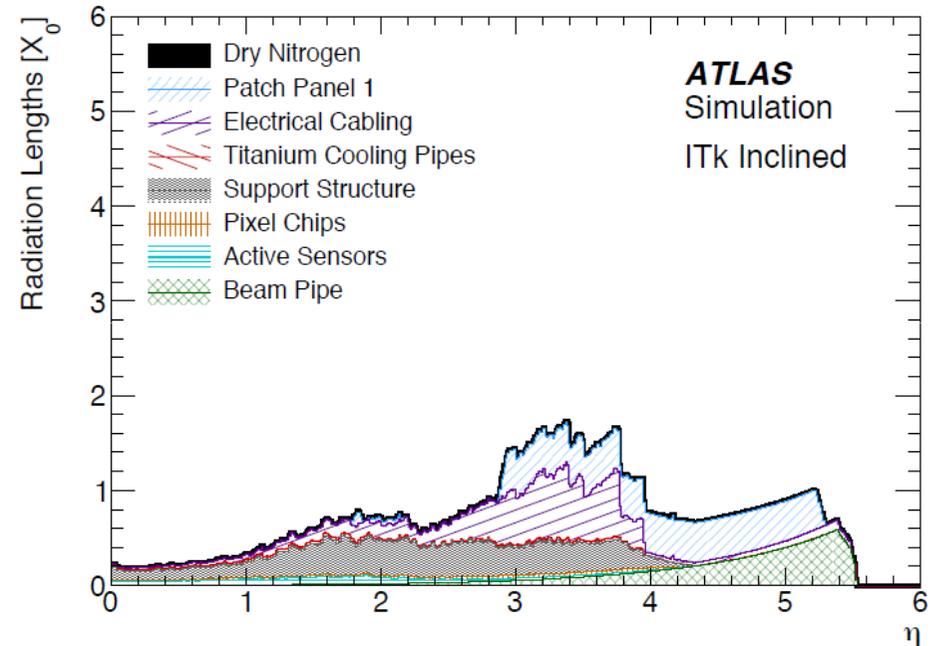
# of modules: 17888

# of channels:  **$\sim 6 \times 10^7$**

# Количество вещества

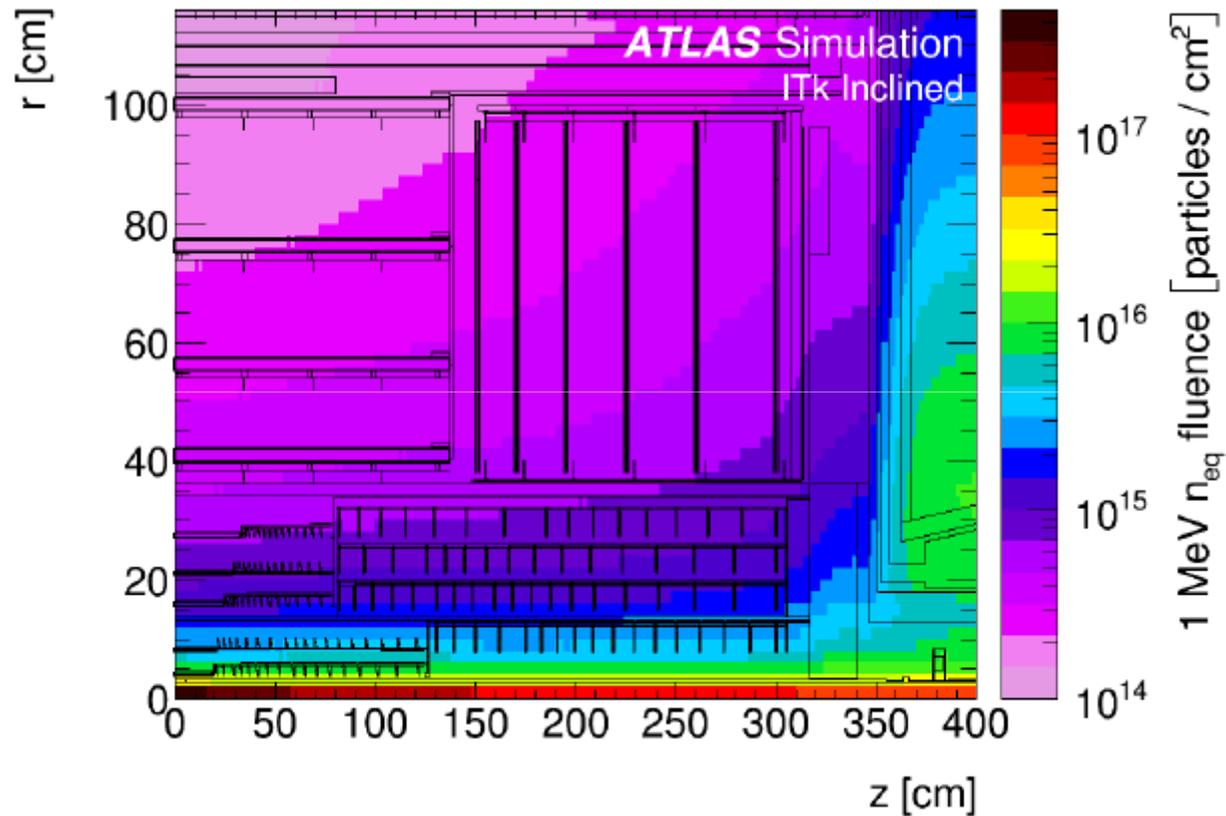


Современный внутренний трекер



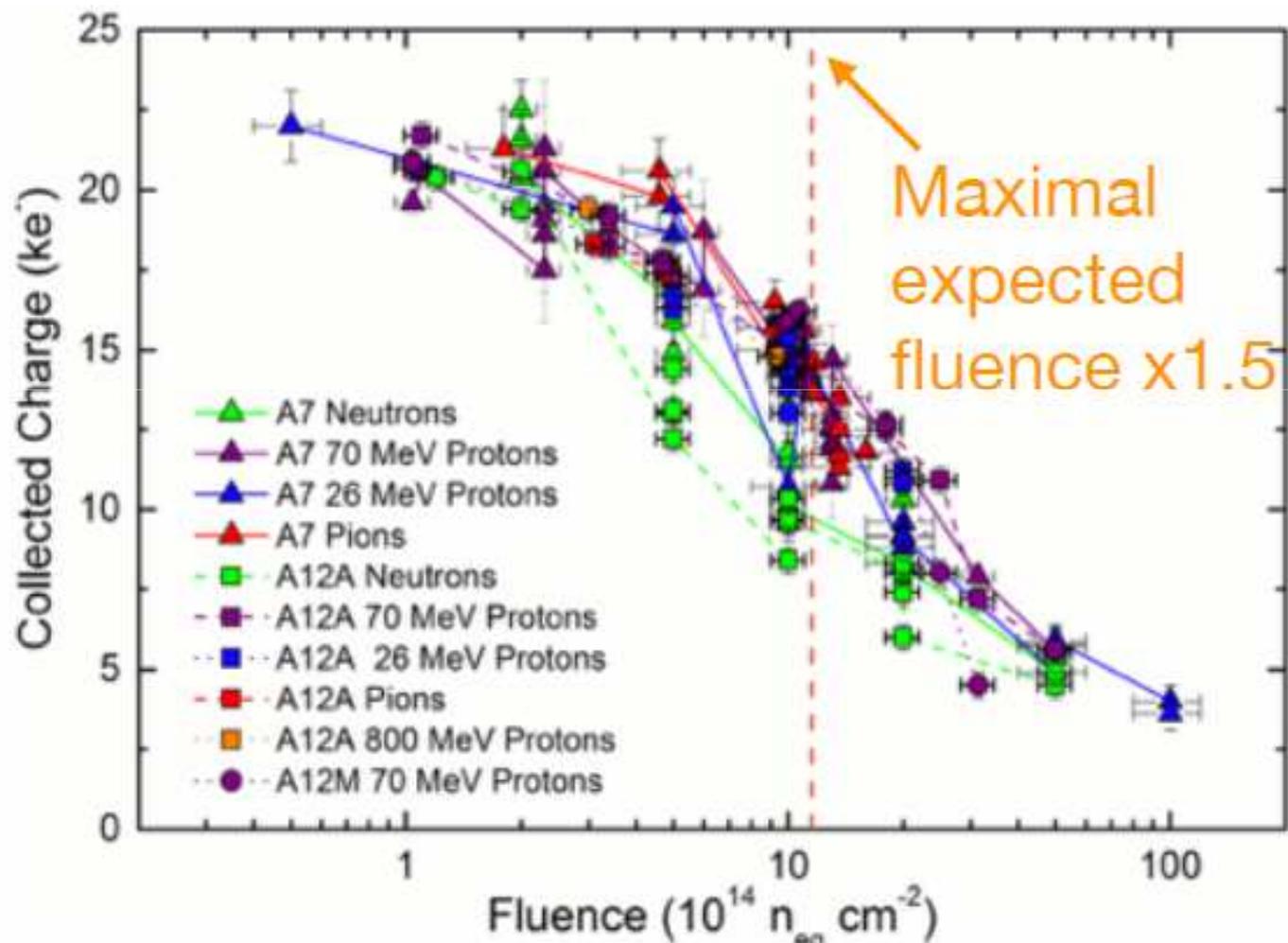
Новый внутренний трекер

# Радиационная нагрузка



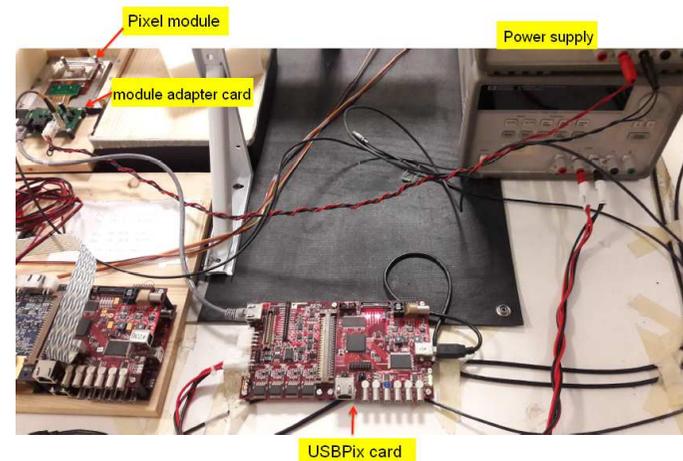
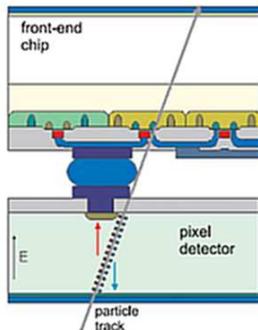
Эквивалентный флюенс 1 МэВ нейтронов для пикселей и торцевых стриповых детекторов составляет  $1.5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (1140 МРад ) и  $8.2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> (33.6 МРад) соответственно

Детекторы с такими параметрами разработаны и испытаны



# Изготовление внутреннего трекера

Внутренний трекер установки АТЛАС стоит 120 млн.шв.фр. В настоящее время изготавливаются опытные образцы, проходит проверку технология массового производства. В изготовлении детектора принимает участие ФИАН (флип-чип процесс) и НИЦ КИ-ПИЯФ (система охлаждения).



# Ожидаемые результаты

ATL-PHYS-PUB-2014-016

