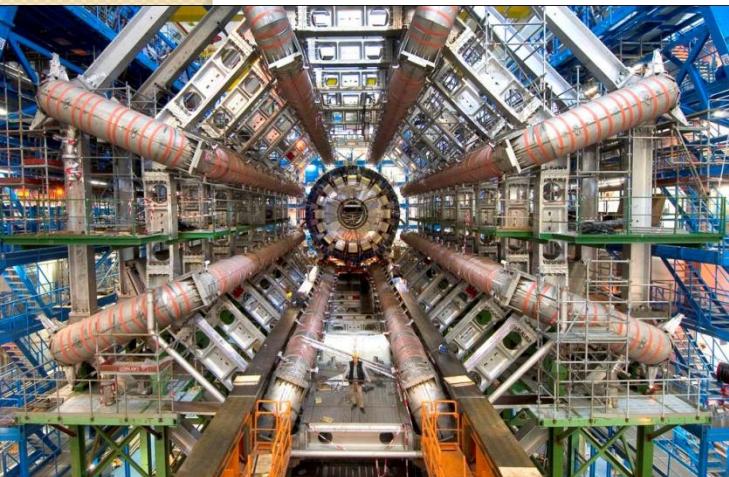
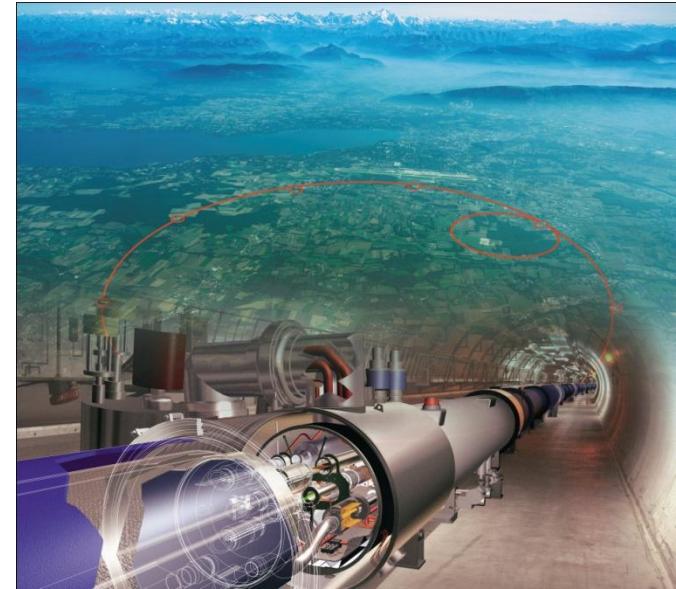


Исследования бозона Хиггса в эксперименте ATLAS



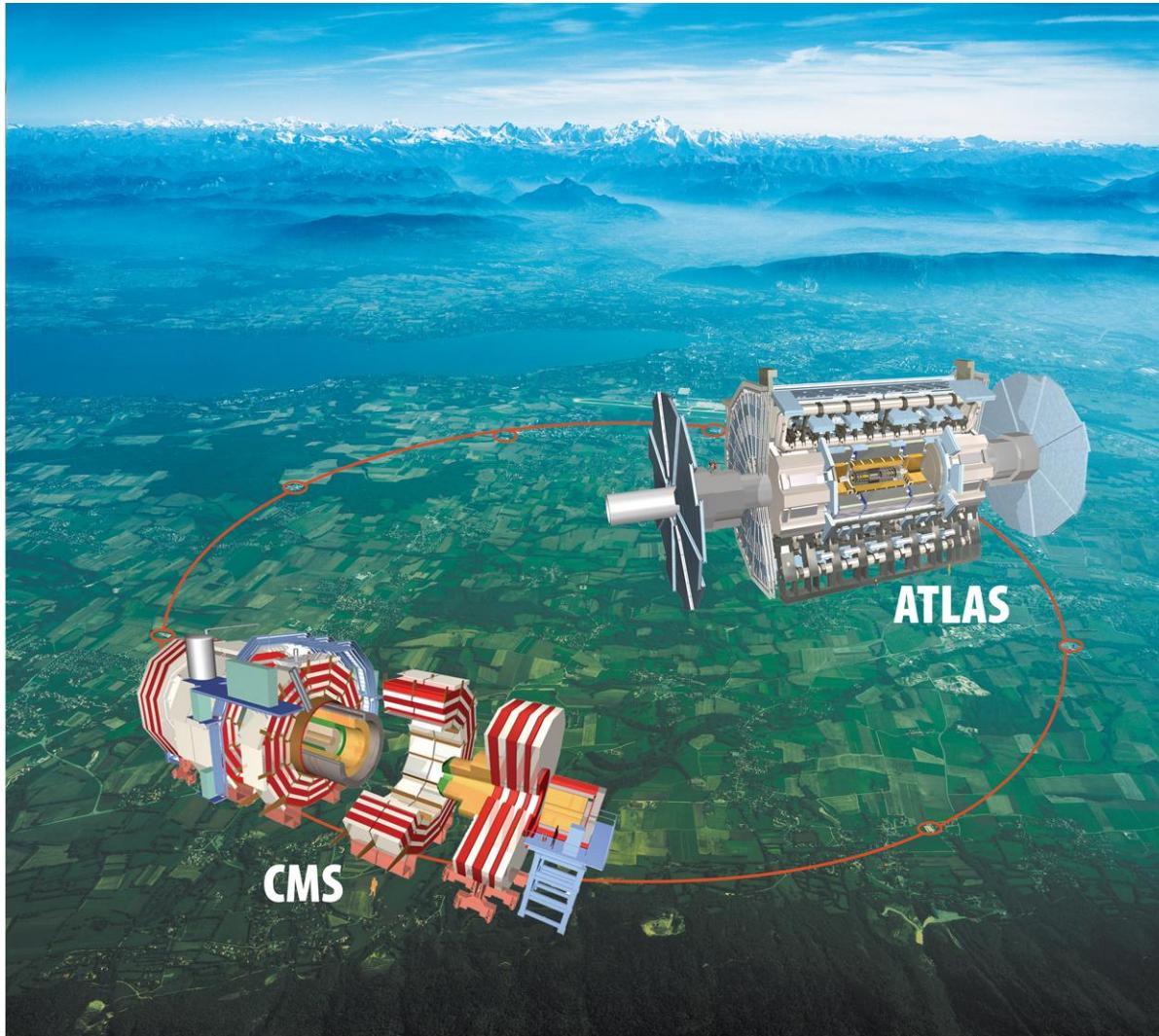
Профессор
Л.Н.Смирнова
Семинар
ОЭПВАЯ
25 ноября 2014 г.



Разделы доклада

- Что такое ATLAS
- Россия и МГУ в эксперименте ATLAS
- Новые результаты исследования бозона Хиггса в ATLAS
- Перспективы и планы исследований

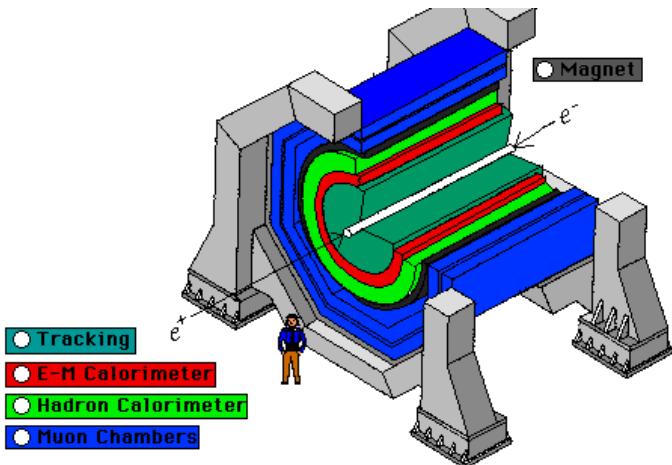
Два самых больших детектора на Большом адронном коллайдере ЦЕРН



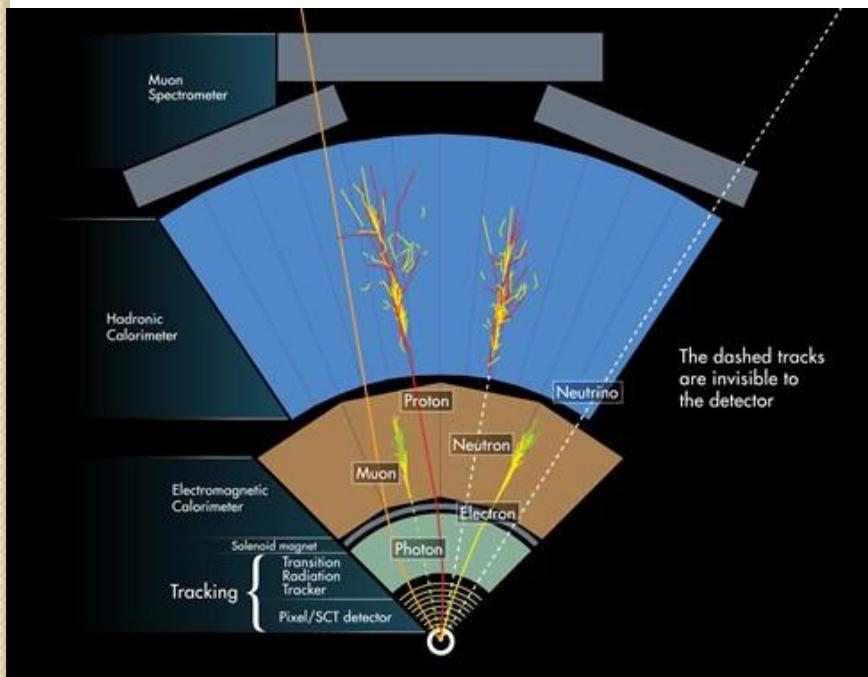
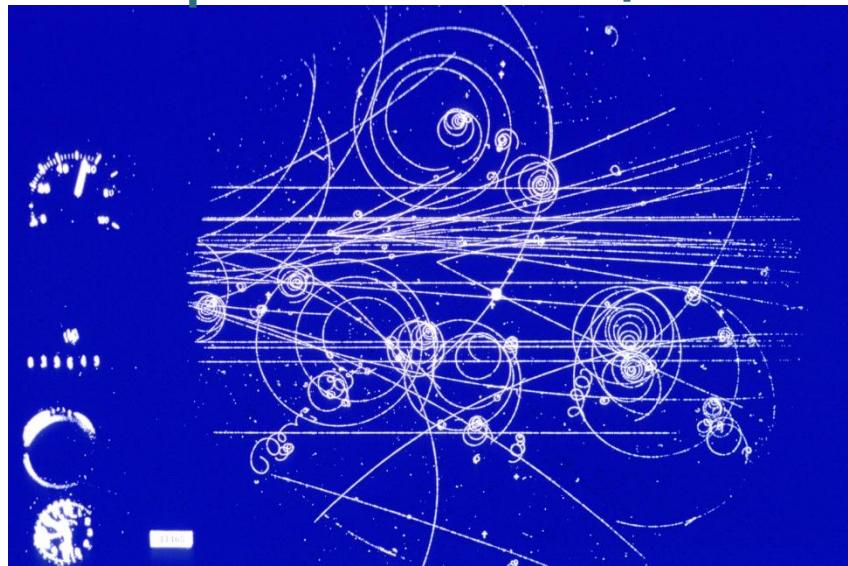
ATLAS

CMS

Эволюция детекторов частиц



Современный детектор



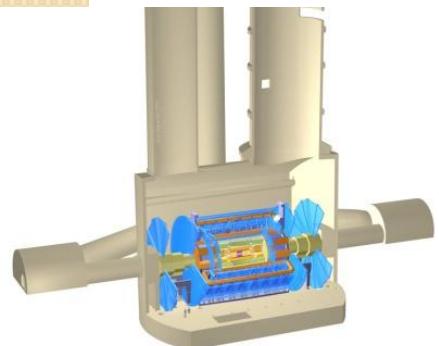
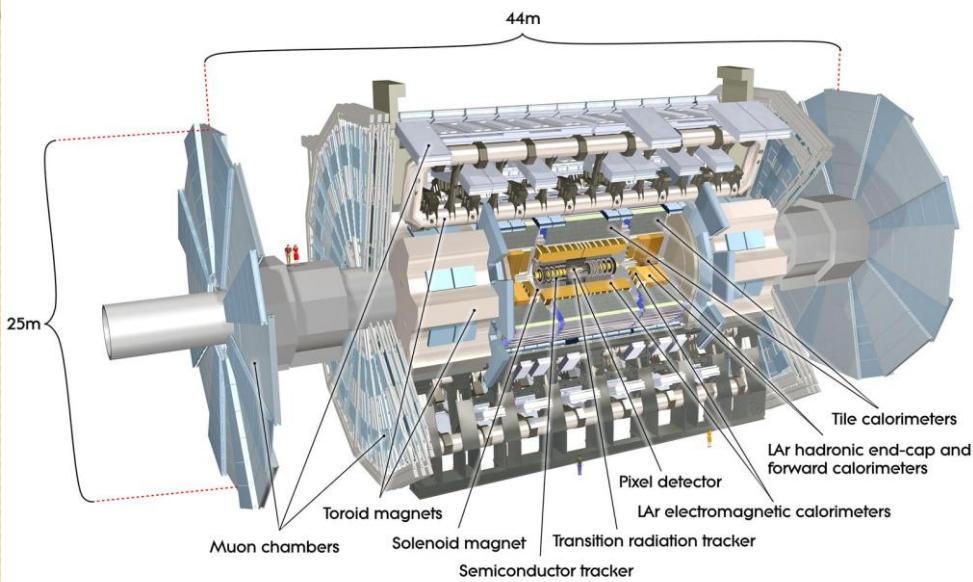
Пузырьковая камера

Структура детектора
ATLAS



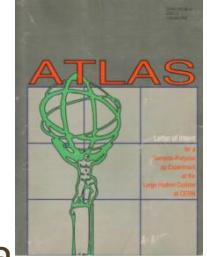
ATLAS = A Toroidal LHC ApparatuS

Установка предназначена для комплексного исследования взаимодействий при сверхвысоких энергиях и поиска новых явлений (хиггсовские бозоны, суперсимметричные частицы ...)



История детектора ATLAS

- Конец 80-х - возникновение идеи
- 1992 – Заявление о намерениях
- 1994 – Технический проект
- 1997 - начало строительства детектора
- 2008 - первый пучок в коллайдере
- 2009 - первые соударения при **0.9 ТэВ**
- 2010 – первые соударения при **7 ТэВ**
- 2012 – первые соударения при **8 ТэВ и открытие бозона Хиггса**



В настоящий момент:

- Первая большая остановка в ускорении частиц (2013-2014гг.) для подготовки коллайдера и детекторов к следующему сеансу регистрации протонных соударений с энергией 13 – 14 ТэВ при светимости $(1\text{-}2)\cdot10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в 2015г. и пучков ядер
- Завершение анализа событий, зарегистрированных в 2011-2012гг.

Работы в ATLAS ведутся коллективом
~3000 физиков из 174 институтов 38 стран



Организация эксперимента ATLAS и вклад России

В нем участвуют

ИФВЭ (Протвино), ПИЯФ (С.-Петербург),
БИЯФ (Новосибирск), ИТЭФ, ФИАН, МГУ, МИФИ(Москва)

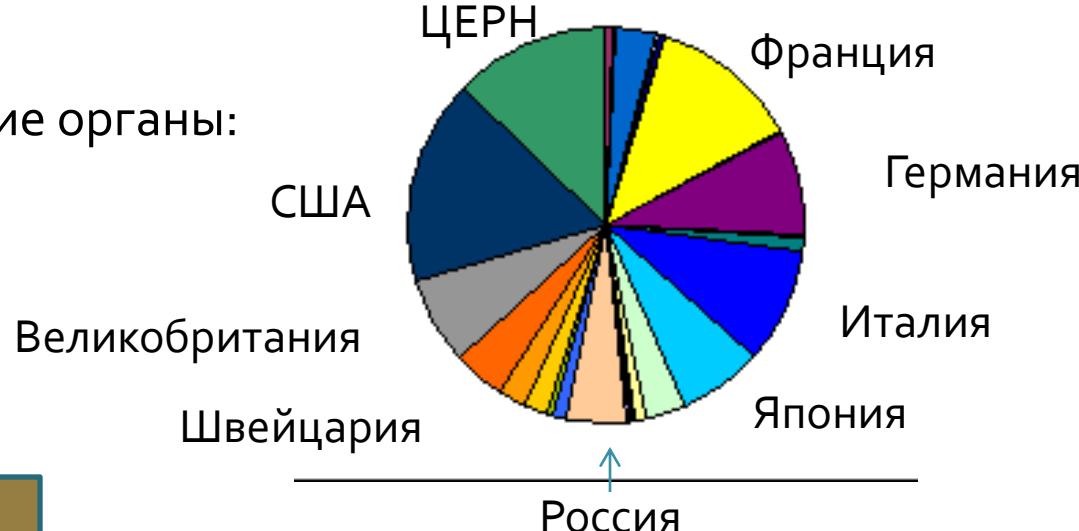
семь российских институтов и ОИЯИ

- 127 научных сотрудников (от МГУ 6 сотрудников + 2 аспиранта)
- проектная стоимость детектора – 475 М шв. фр. (в ценах 1996 г)

Организация проекта и распределение обязанностей определены в документе

«Меморандум о взаимопонимании по сотрудничеству в сооружении установки АТЛАС» (1998 г)

Распределение вкладов в проект



Основные управляющие органы:

- Совет сотрудничества
- Исполнительный комитет

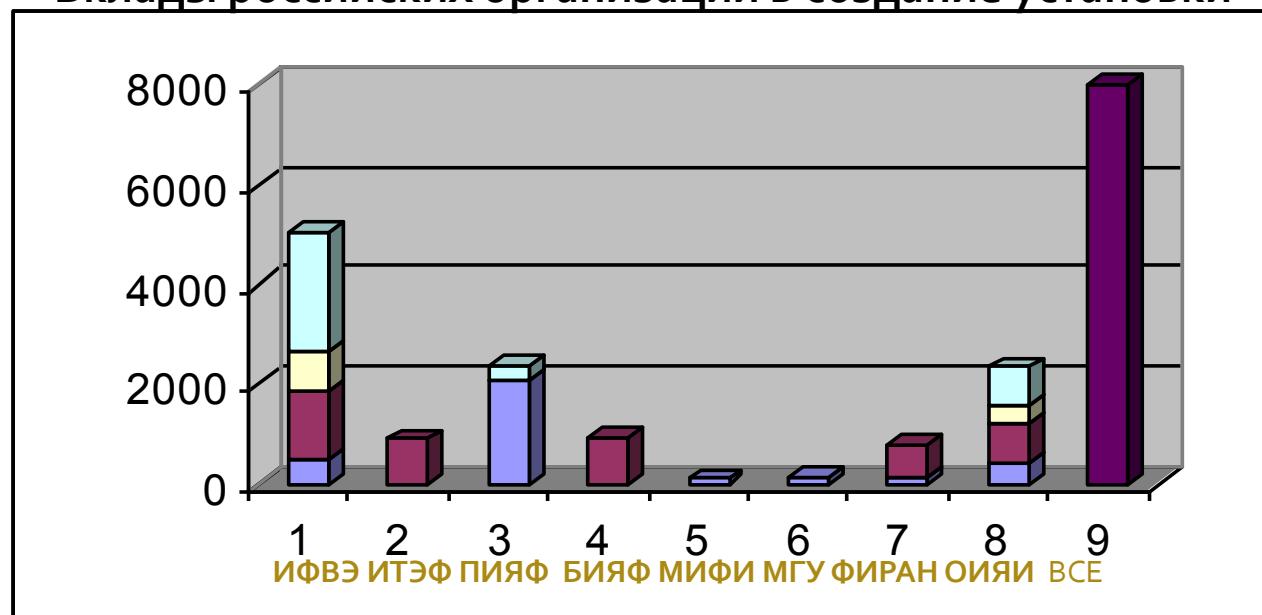
Обязательства российских участников

Российские институты вносят вклад в разработку и создание всех основных систем установки

НИИЯФ МГУ внес вклад в создание трекового детектора переходного излучения (TRT – Transition Radiation Tracker) Внутреннего детектора

Параллельно внесен вклад в разработку триггера высокого уровня и программу исследований физики b и с-кварков (распадов В и D-адронов)

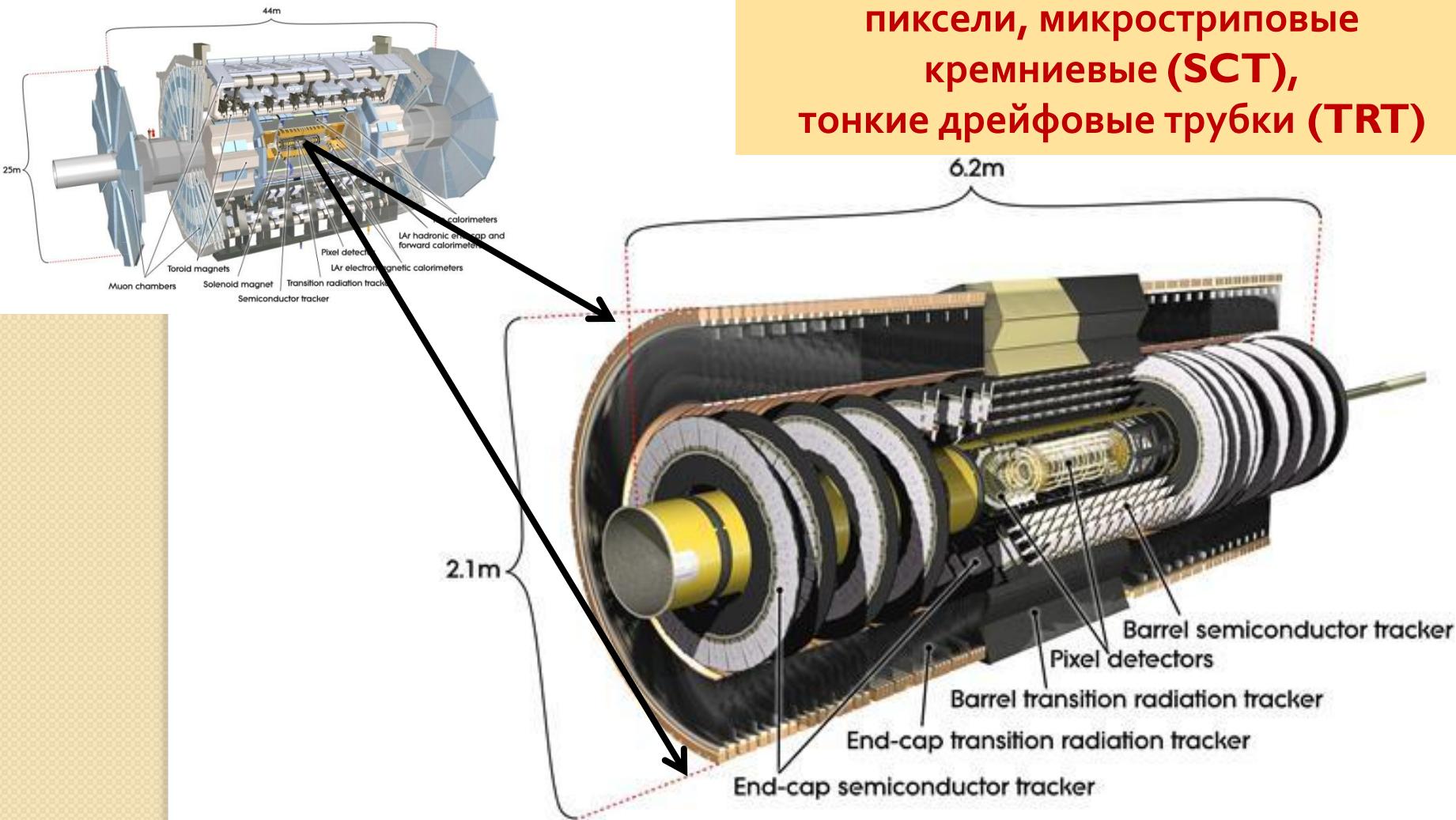
Вклады российских организаций в создание установки



Отн. Ед.(k\$)
материального
вклада

Внутренний детектор ATLAS

Три типа детекторов :
пиксели, микростриповые
кремниевые (**SCT**),
тонкие дрейфовые трубы (TRT)



Внутренний детектор ATLAS: вклад России

Центральная рама предназначена для монтажа элементов центрального детектора. Изготовлена из углепластика, обладающего рядом специальных характеристик.

Участники: ГНЦ ИФВЭ, ОНПП «Технология», РКЗ «Хруничева»

Изготовители отмечены почетными грамотами сотрудничества АТЛАС.

Подложки для кремниевого детектора из пиролитического графита и легкой керамики. Участники: ГНЦ ИФВЭ, «Атомграф», НИИТАП, Зеленоград.

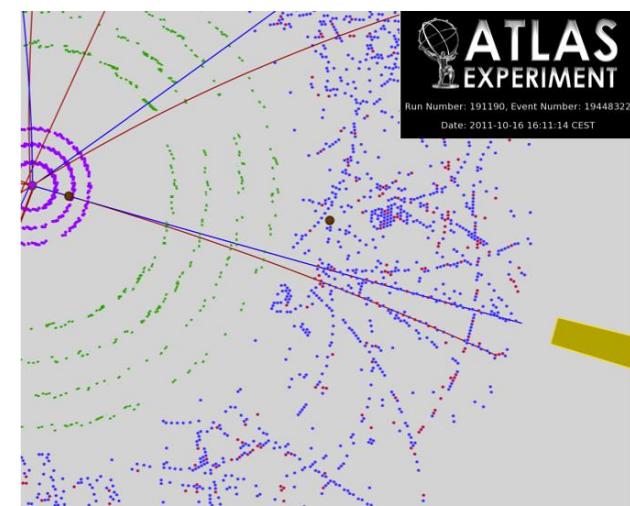
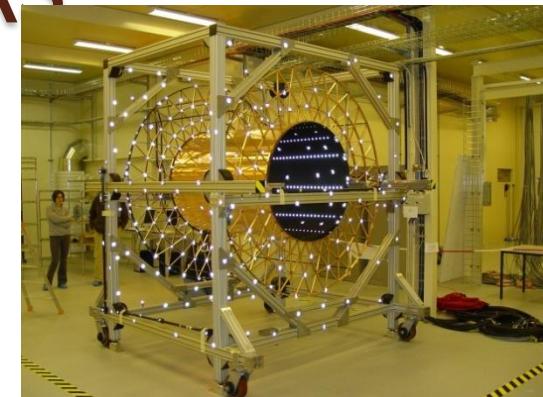
Детектор переходного излучения (TRT) предназначен для регистрации заряженных частиц и идентификации электронов.

Концепция прибора предложена МИФИ. Изготовление основной части детекторов произведено в ПИЯФ и ОИЯИ.

В проекте также участвуют НИИЯФ МГУ и ФИАН.

В НПО «Машиностроитель», Пермь для этого детектора изготовлены прецизионные конструкции из композитных материалов.

Общий объем выполненных в России работ составляет
5,2 м шв.фр.



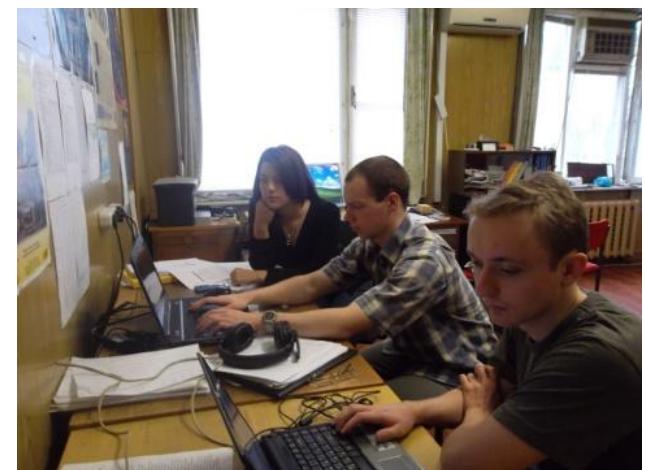
Вклад НИИЯФ МГУ в создание детектора TRT

Создание циркуляционной газовой
системы трекового детектора
переходного излучения (TRT)
(совместно с МИФИ и ФИАН)

Исследование эффектов старения для
обеспечения 10 лет непрерывной
работы под действием радиации



Участие в физическом
анализе



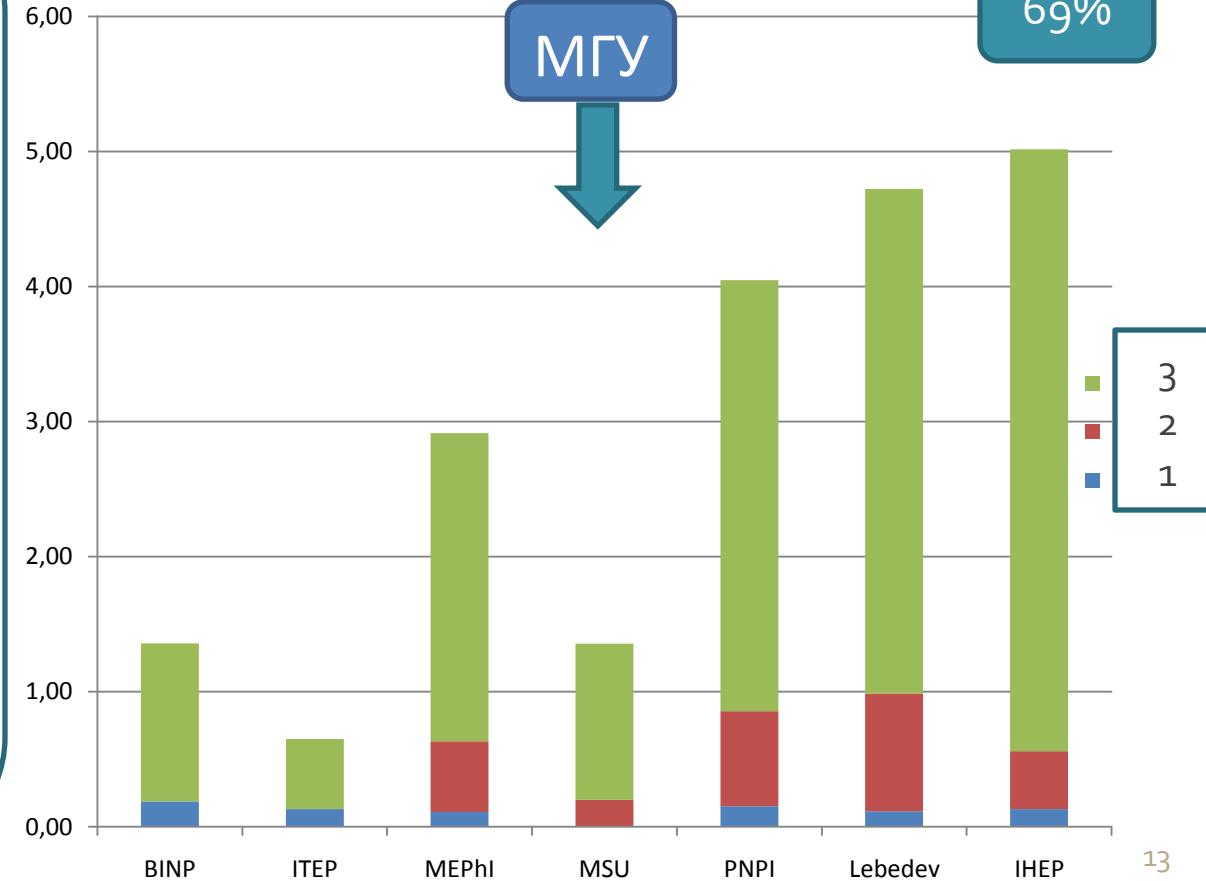
Участие МГУ в эксплуатации установки ATLAS 2010-2014гг.

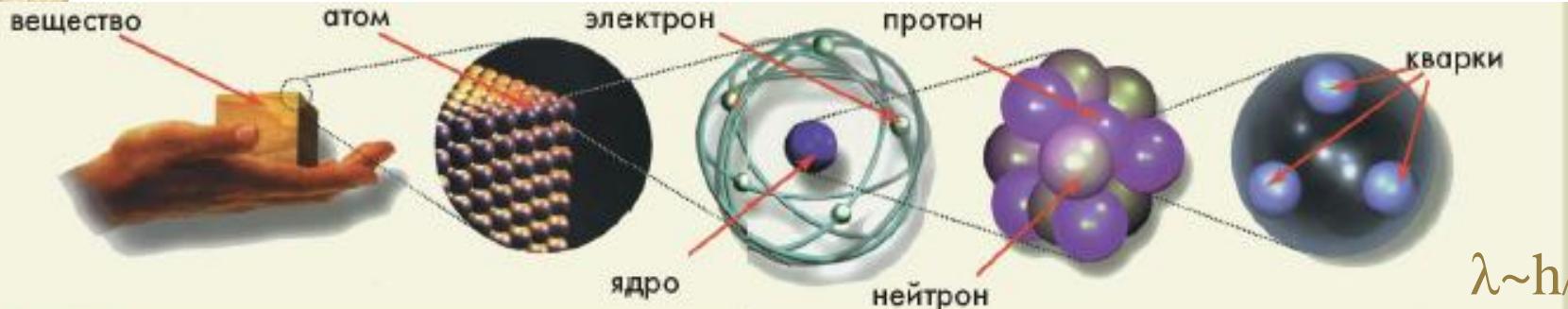
		2010			2011			2012			2013			2014			All Years		
		Alloc	Req	%	Alloc	Req	%	Alloc	Req	%	Alloc	Req	%	Alloc	Req	%	Alloc	Req	%
Moscow SU	Class 1	0,10	0,12	84%	0,14	0,078	178%		0,062	0%		0,018	0%		0	0%	0,24	0,3171	76%
	Class 2	0,19	0,324	60%	0,10	0,269	37%	0,20	0,235	85%	0,09	0,115	75%		0,09	0%	0,58	1,126	52%
	Class 3	0,73	1,527	48%	0,86	1,683	51%	1,35	1,617	83%	1,28	2	64%	0,97	0,65	150%	5,19	7,8988	66%

Направления работ:

- Газовая система TRT и эксплуатация детектора
- Математическое моделирование TRT
- Разработка алгоритмов триггера двух мюонов
- Участие в проектах модернизации детектора (NSW,TDAQ)
- Физический анализ распадов В и D- мезонов

OTP в 2012





$$\lambda \sim h/p$$

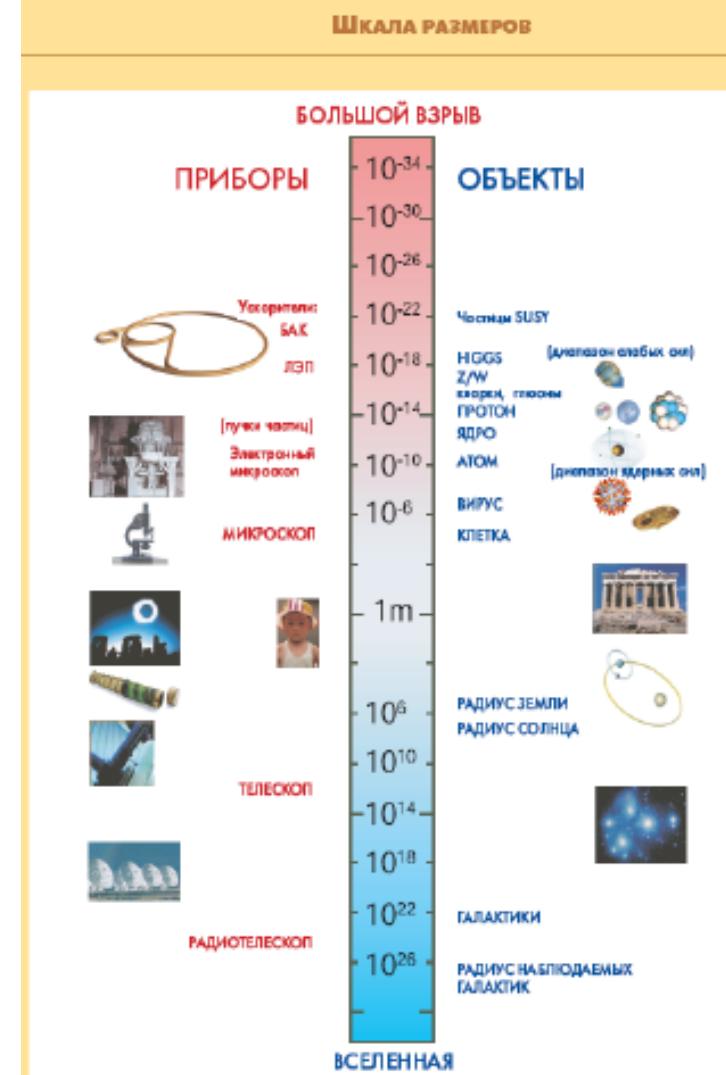
Стандартная модель

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	ПРИБОРЫ
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	ОБЪЕКТЫ
Leptons	V_e electron neutrino	V_μ muon neutrino	V_τ tau neutrino	W W boson	Ускорители БАК ЛЭП
	e electron	μ тион	τ тав	g gluon	[пучки частиц] Электронный микроскоп

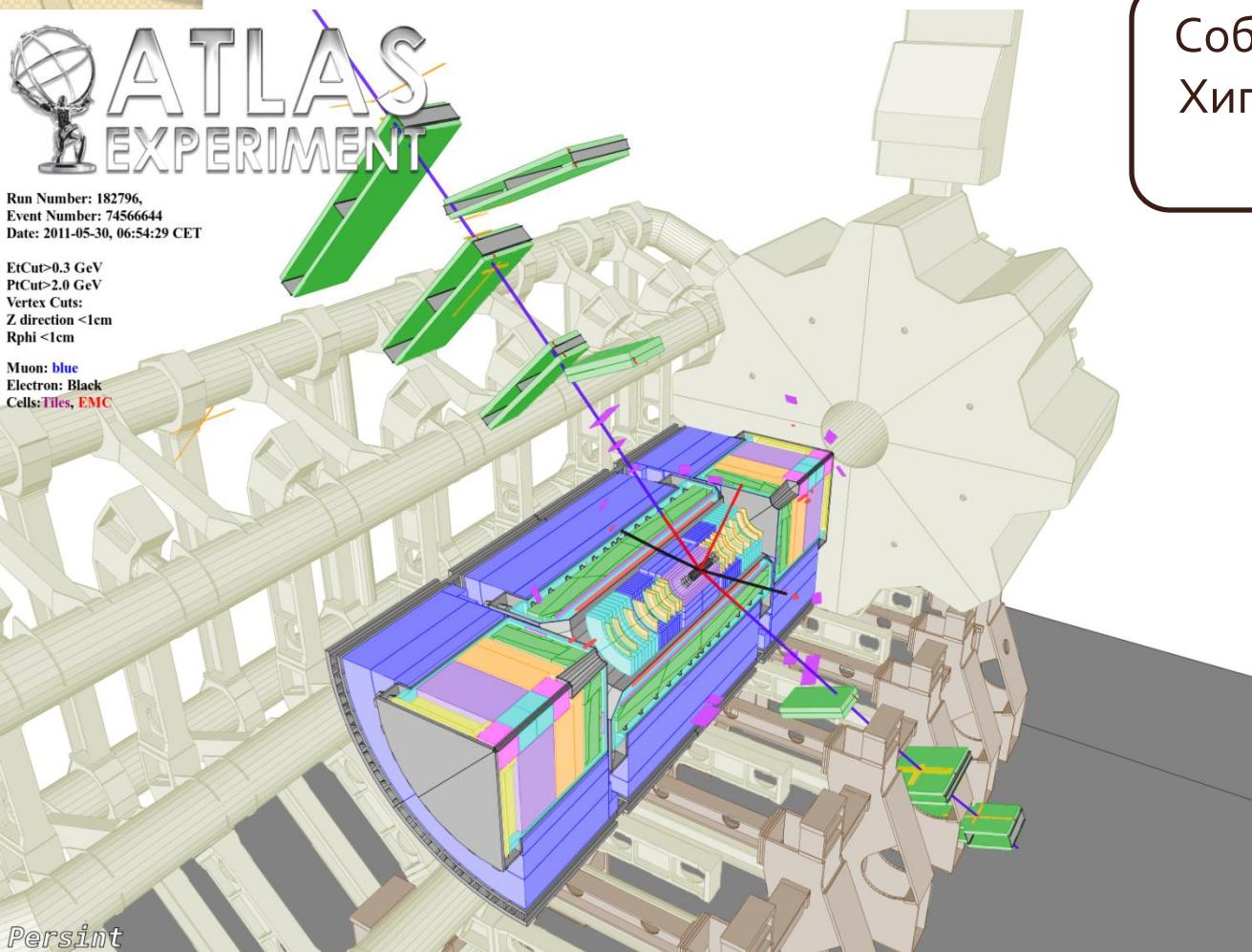
Higgs*
boson

Source: AAAS

*подтвержден



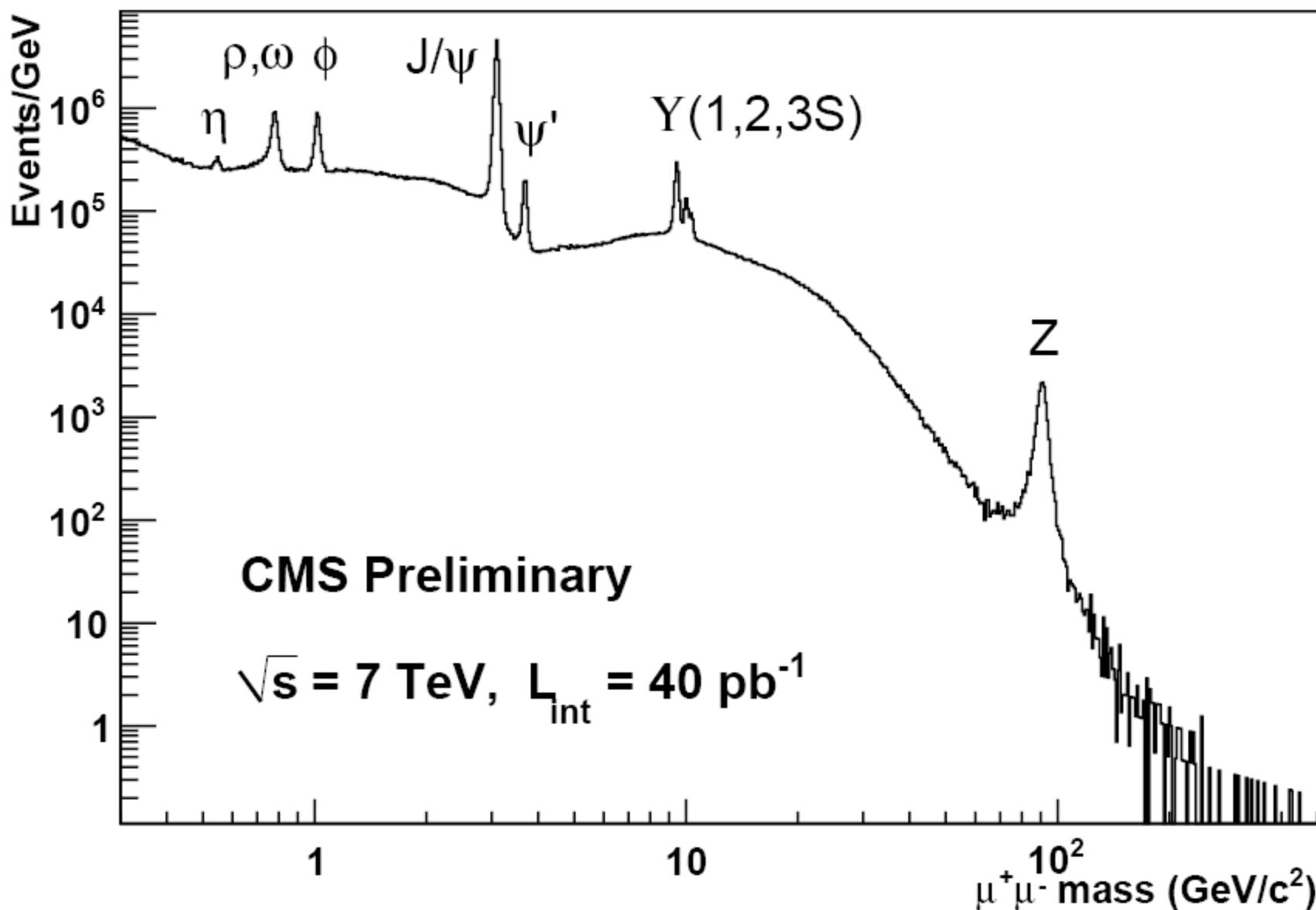
Результаты исследования бозона Хиггса в эксперименте ATLAS



Событие распада бозона Хиггса на два электрона и два мюона

Основные каналы наблюдения новой частицы – распады на два фотона и четыре лептона (электрона или мюона)
 $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow 4l$

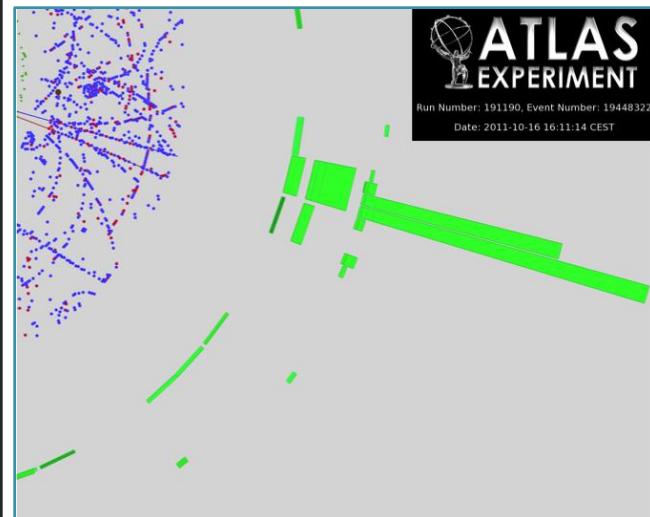
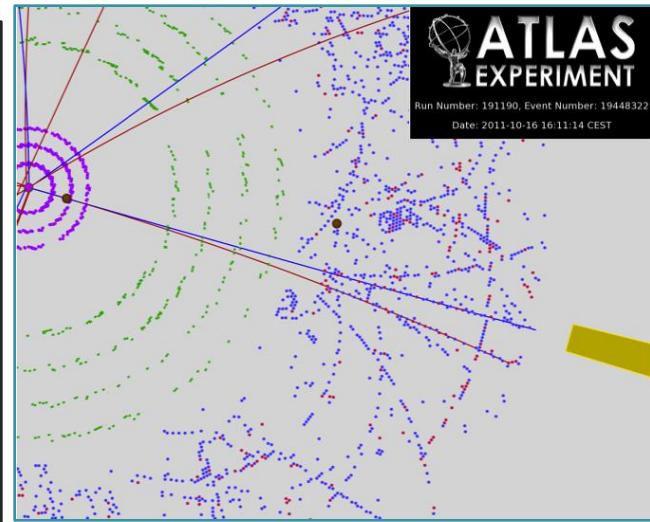
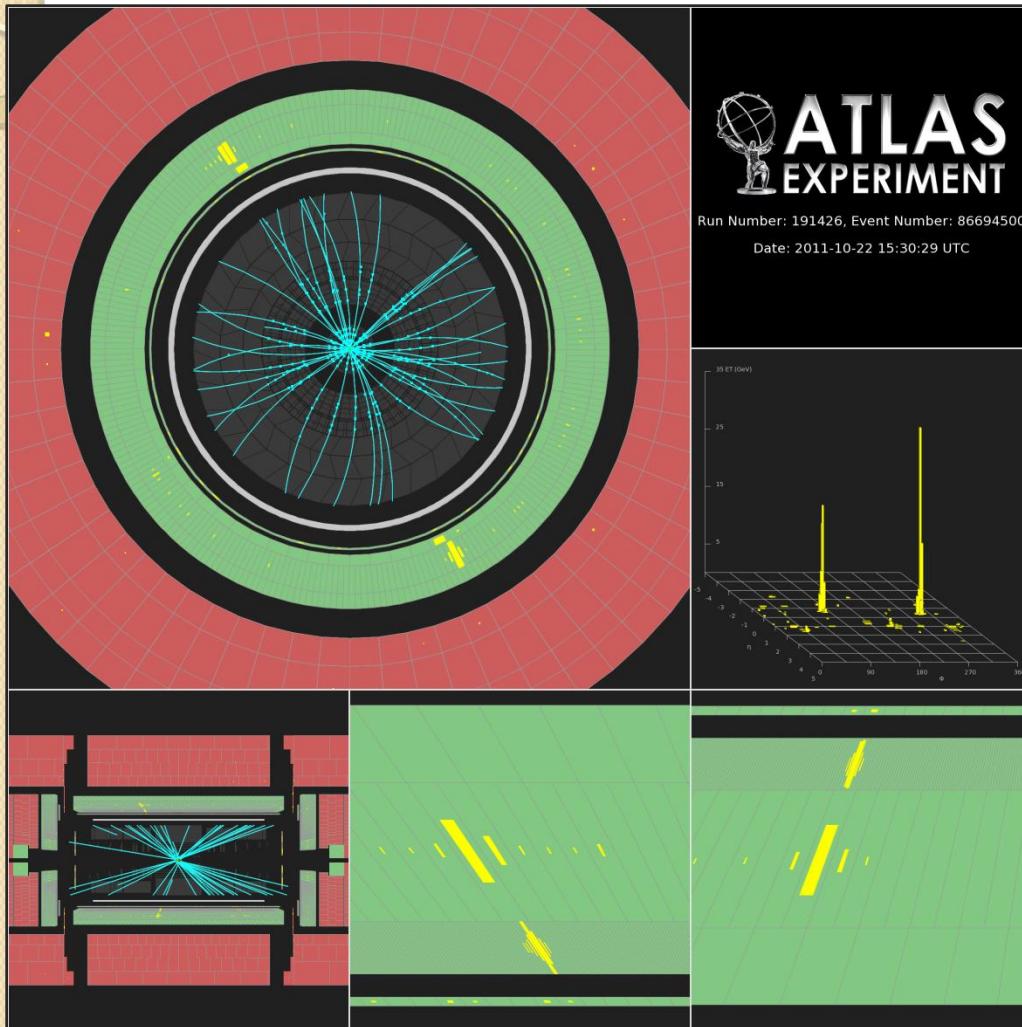
Первые результаты измерения инвариантных масс пар мюонов с противоположными зарядами



$H \rightarrow \gamma\gamma$ событие без (слева) и с конверсией фотона

Expected fraction of converted photons

– $\sim 20\%$ at $|\eta| \sim 0$ – $\sim 45\%$ $|\eta| \sim 1.6$



Новые измерения массы бозона

Хиггса в распадах $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow 4l$

CERN-PH-2014-122, 15 June 2014

Table 5: Summary of Higgs boson mass measurements.

Channel	Mass measurement [GeV]
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$125.98 \pm 0.42 \text{ (stat)} \pm 0.28 \text{ (syst)} = 125.98 \pm 0.50$
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$	$124.51 \pm 0.52 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)} = 124.51 \pm 0.52$
Combined	$125.36 \pm 0.37 \text{ (stat)} \pm 0.18 \text{ (syst)} = 125.36 \pm 0.41$

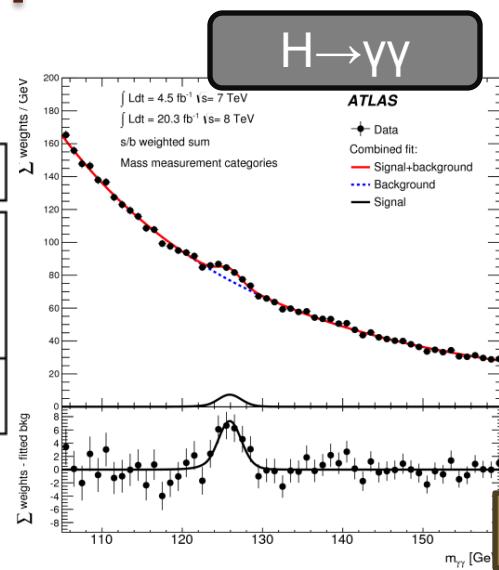
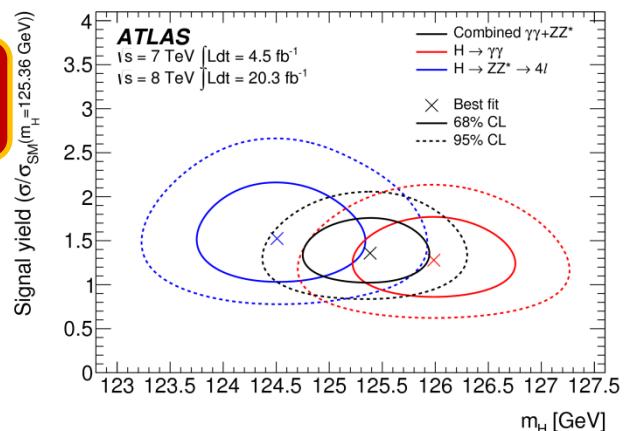
С момента открытия было увеличено количество данных (в ~ 2.5 раза) - 2013г. и качество методов анализа - лето 2014г.

$$\Delta m_H = 1.47 \pm 0.67 \text{ (stat)} \pm 0.28 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

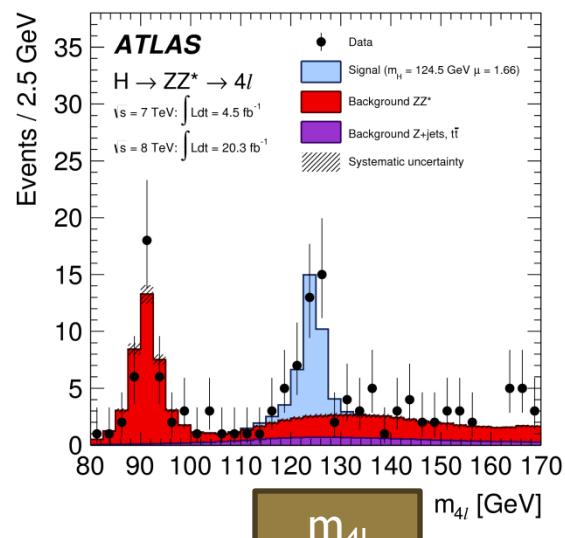
$$= 1.47 \pm 0.72 \text{ GeV}$$

$2.5\sigma \rightarrow 2\sigma$ и соотв. 4.5% вероятности согласия

Основной вклад в систематику измерения массы дает шкала энергии фотонов



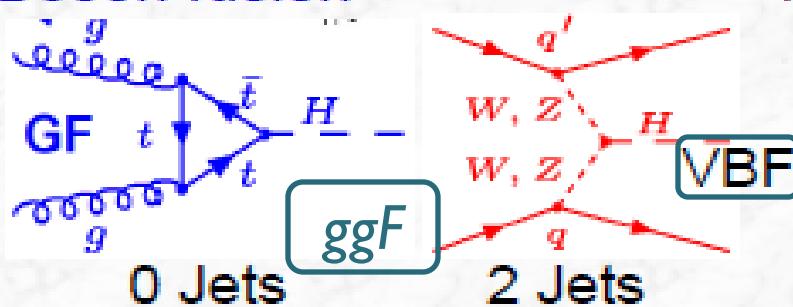
$m_{\gamma\gamma}$



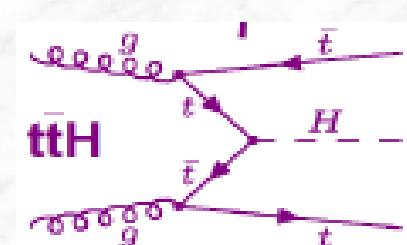
m_{4l}

Механизмы рождения бозона Хиггса в Стандартной модели

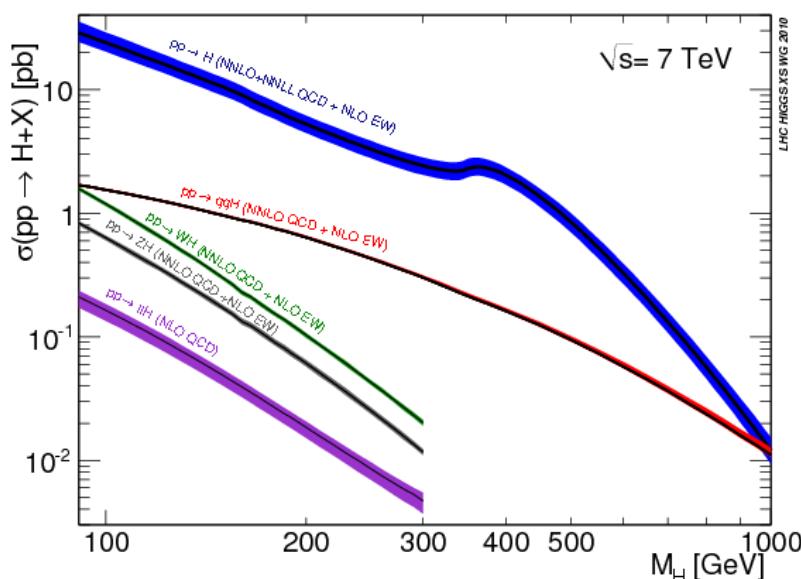
Boson fusion



Associated production: Tag W, Z, T



Higgs strahlung $VH + \tilde{t}\bar{t}H$



Сигнал измеряется по отношению к расчетному сечению Стандартной модели ($\mu = \sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{см}}$)

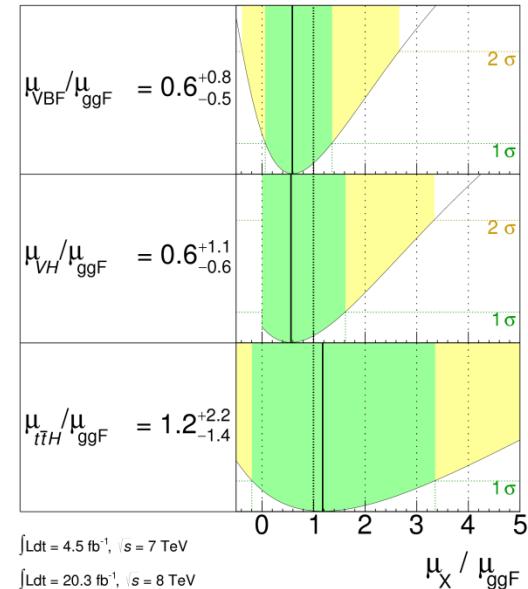
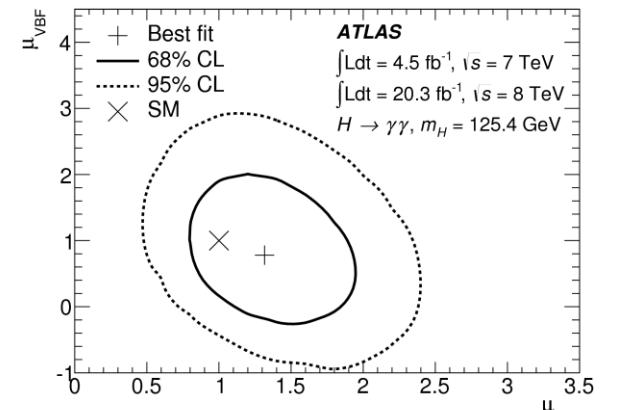
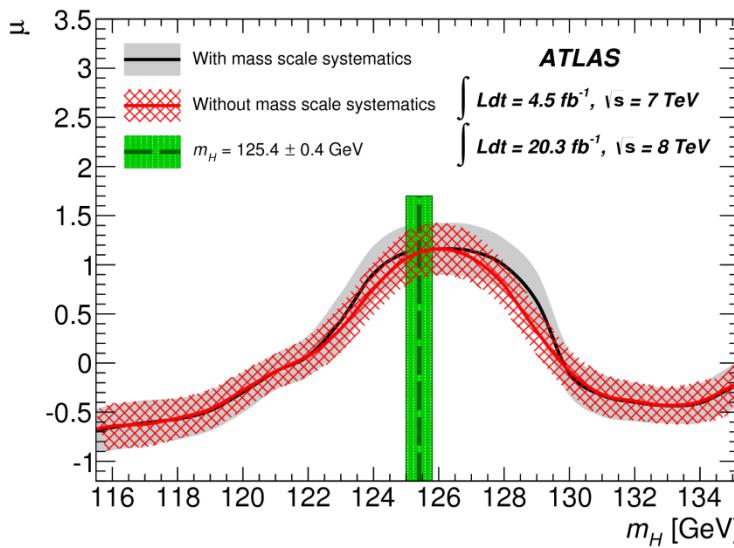
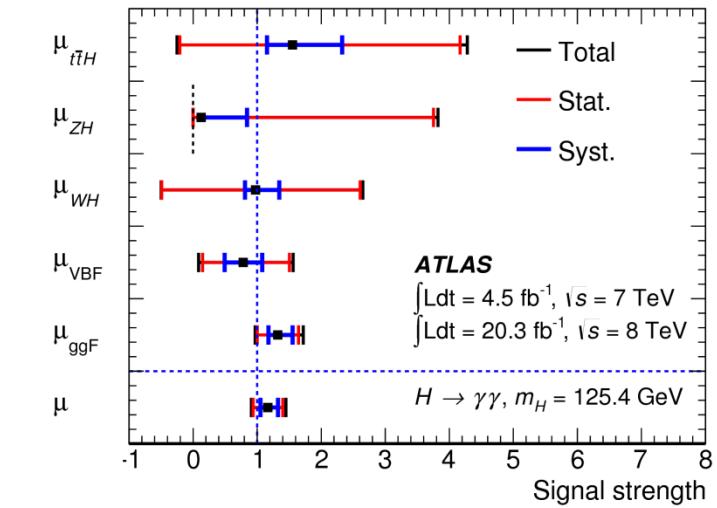
Выделение категорий событий позволяет увеличить чувствительность при определении констант связи бозона Хиггса

ggF	VBF	WH	ZH	$\tilde{t}\bar{t}H$	Total
19.52	1.58	0.70	0.39	0.13	22.32

Сечения каналов ($n\text{б}$) при 8 ТэВ
($m_H = 125$ ГэВ)

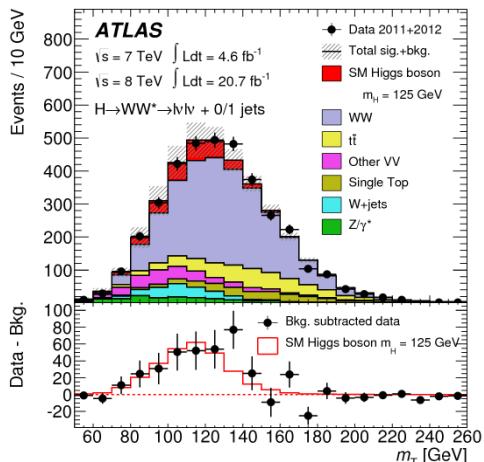
Higgs boson production in the diphoton decay channel

arxiv:1408.7084, 27 August 2014

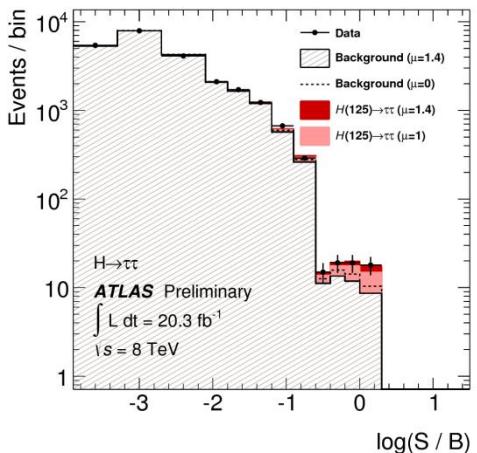


Регистрация сигнала Н в других каналах распада

$H \rightarrow WW^* \rightarrow l l l l v$

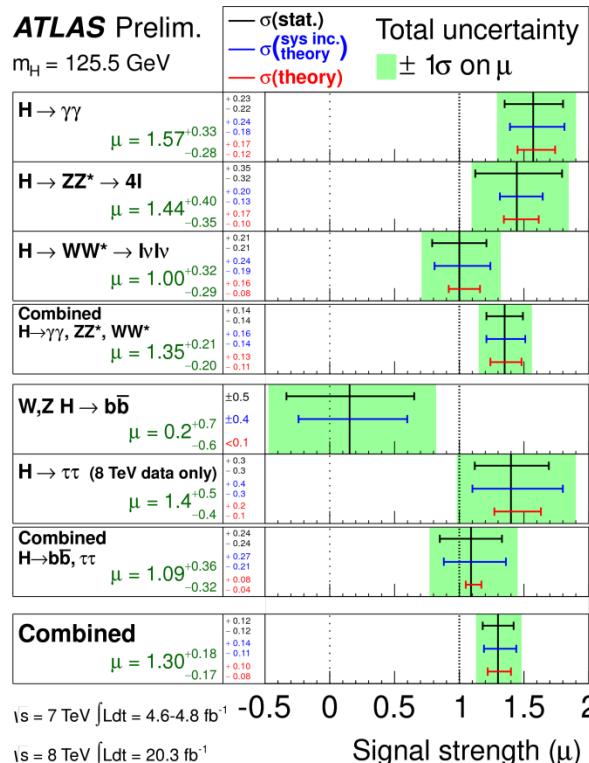
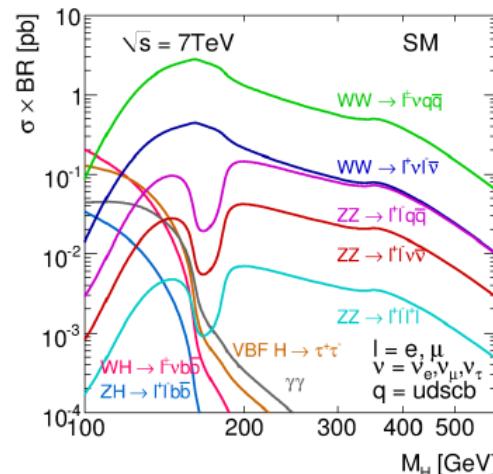


$H \rightarrow \tau\tau$

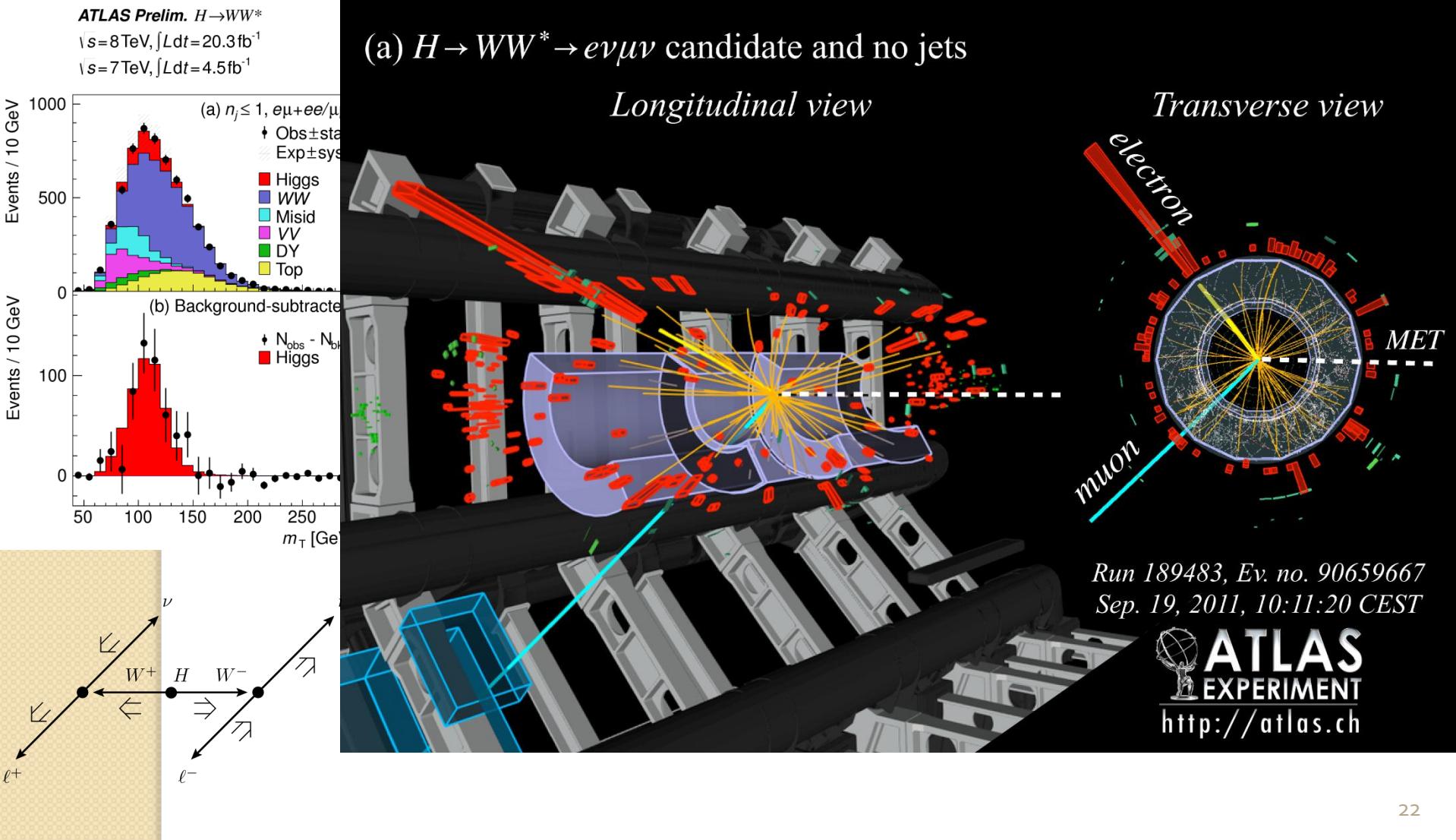


События, отвечающие распадам бозона Хиггса СМ, выделены для пяти каналов распада.
Уровень сигнала в каждом из каналов и суммированное значение величины сигнала согласуется с расчетными в СМ:
 $\mu = \sigma/\sigma_{\text{CM}} = 1.30^{+0.18}_{-0.17}$
(ATLAS-CONF-2014-009)

20.03.2014)

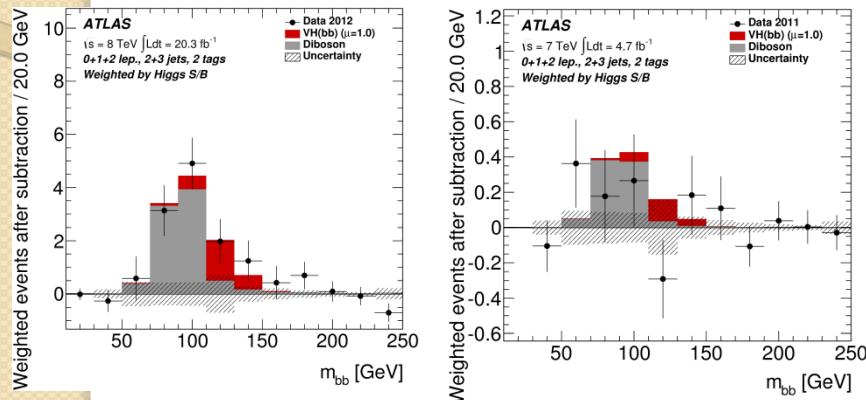


Observation and measurement of Higgs boson decays to WW^* with ATLAS at the LHC (ATLAS-CONF-2014-060, 12 October 2014)

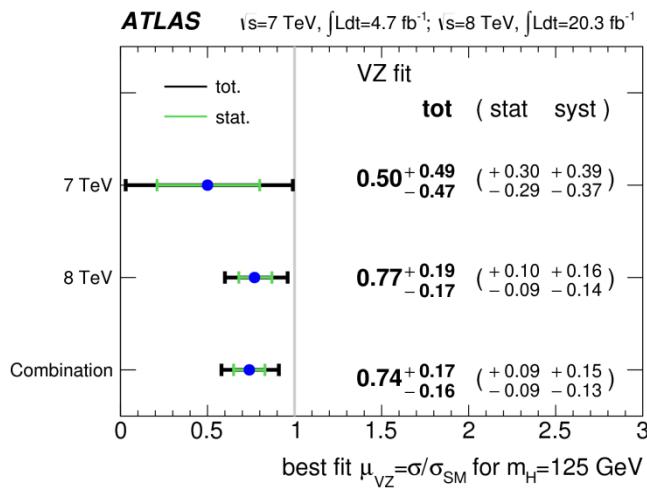


Данные о распадах бозона Хиггса на фермионы $H \rightarrow b\bar{b}$

<http://arxiv.org/abs/1409.6212>, 22 Sept 2014



Результаты контрольного измерения $(W,Z)Z \rightarrow b\bar{b}$



ATLAS Prelim.

$m_H = 125.36 \text{ GeV}$

arXiv:1408.7084

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$$\mu = 1.17^{+0.27}_{-0.27}$$

arXiv:1408.5191

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

$$\mu = 1.44^{+0.40}_{-0.33}$$

ATLAS-CONF-2014-060

$H \rightarrow WW^* \rightarrow llvv$

$$\mu = 1.08^{+0.22}_{-0.20}$$

arXiv:1409.6212

$W, Z \rightarrow b\bar{b}$

$$\mu = 0.5^{+0.4}_{-0.4}$$

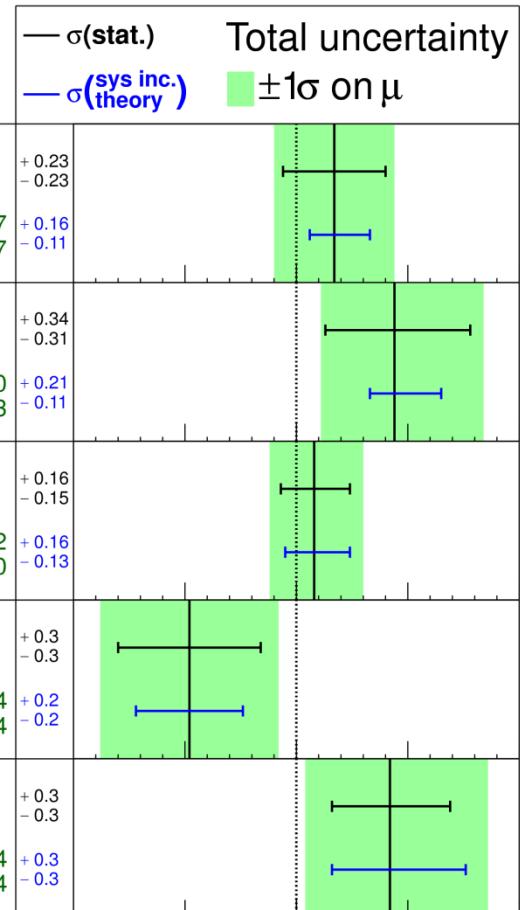
ATLAS-CONF-2014-061

$H \rightarrow \tau\tau$

$$\mu = 1.4^{+0.4}_{-0.4}$$

$\text{t}\bar{s} = 7 \text{ TeV}, \int Ldt = 4.5-4.7 \text{ fb}^{-1}$

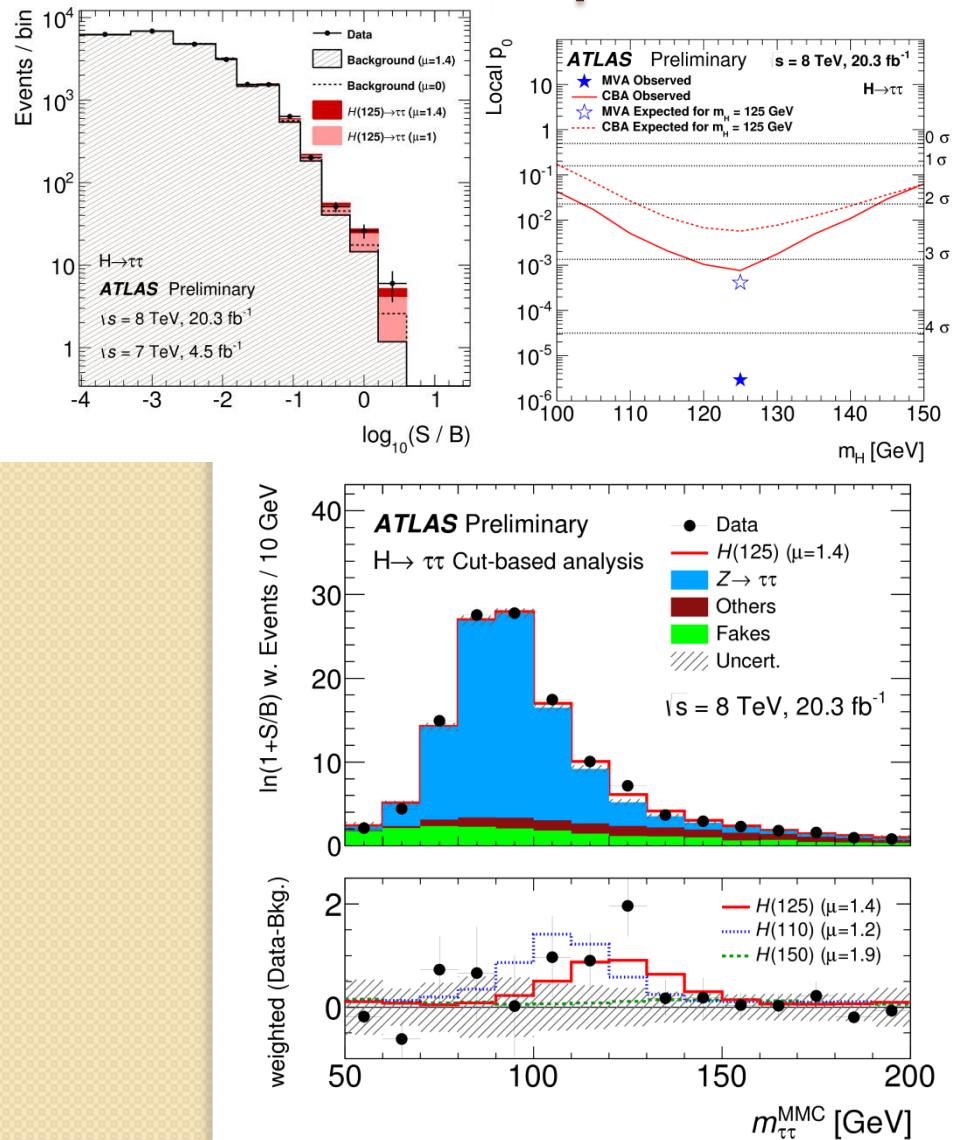
$\text{t}\bar{s} = 8 \text{ TeV}, \int Ldt = 20.3 \text{ fb}^{-1}$



Signal strength (μ)

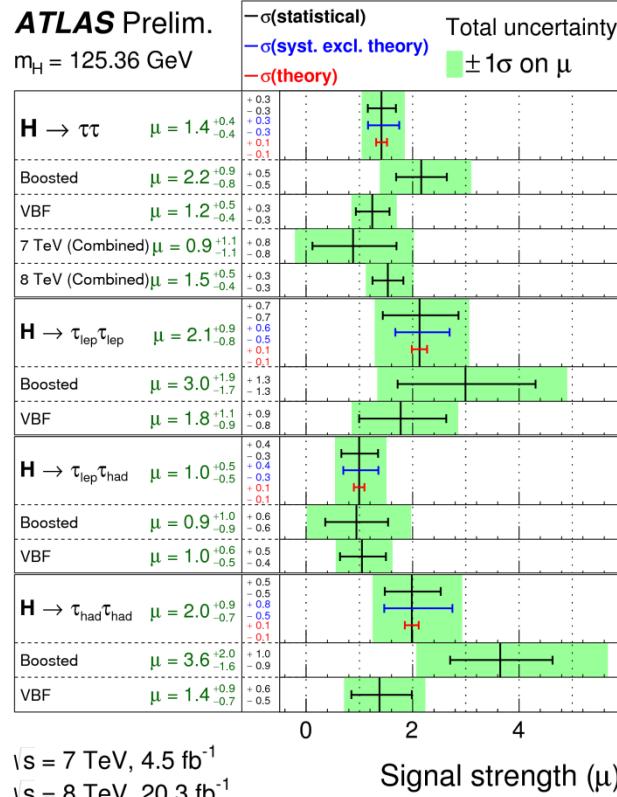
Данные о распадах бозона Хиггса на фермионы $H \rightarrow \tau\bar{\tau}$

ATLAS-CONF-2014-061, 7 October 2014



ATLAS Prelim.

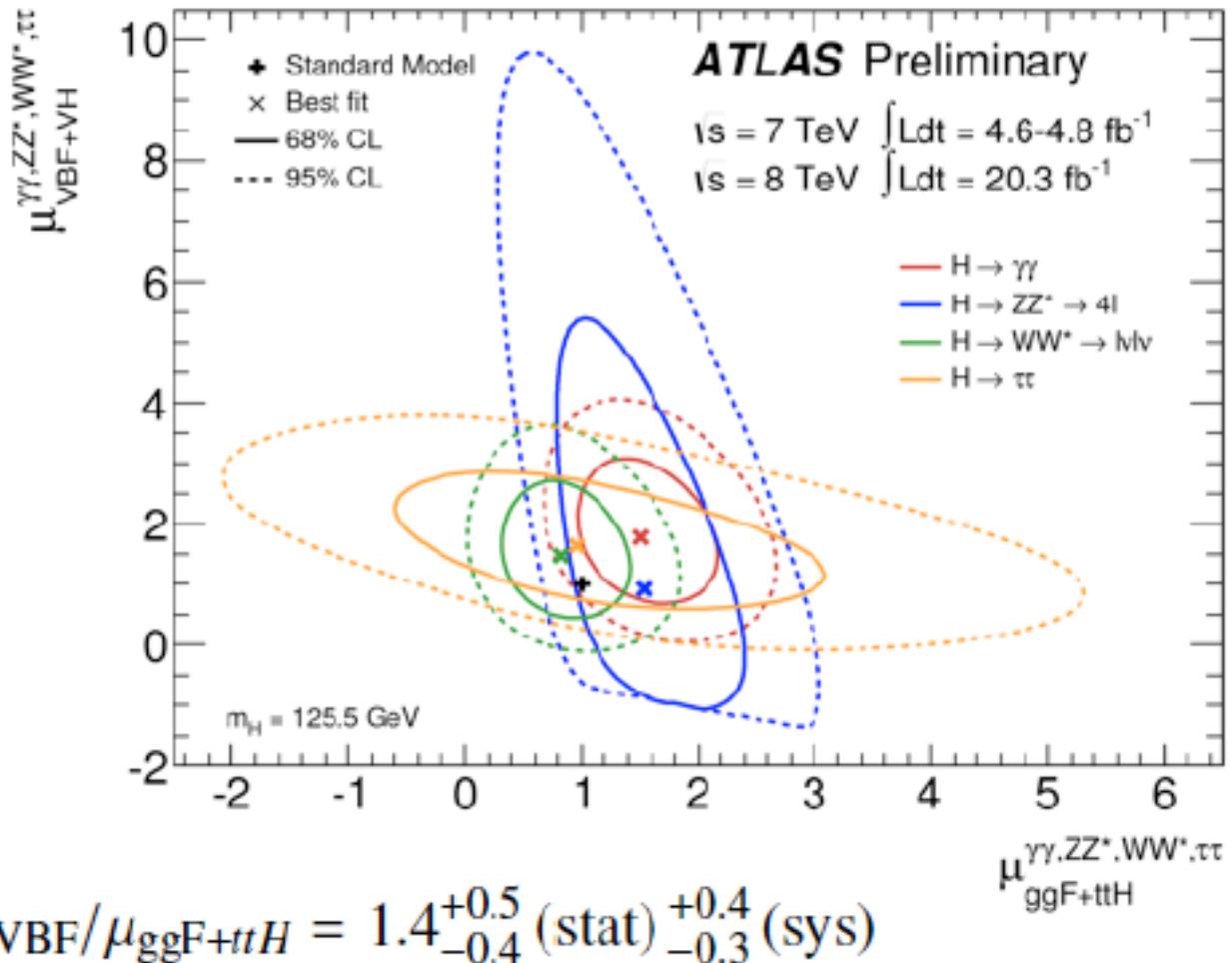
$m_H = 125.36$ GeV



$\sqrt{s} = 7$ TeV, 4.5 fb^{-1}
 $\sqrt{s} = 8$ TeV, 20.3 fb^{-1}

Сигнал наблюдается на уровне 4.5σ (3.5 ожидаемых) и сила сигнала $\mu = 1.42 + 0.44 - 0.38$, что согласуется с предсказанием для Юкавской константы в СМ

Новые данные о константах связи бозона Хиггса



- This result provides evidence at the 4.1σ level that a fraction of Higgs-boson production occurs through vector boson fusion

Higgs boson decays to WW*

(ATLAS-CONF-2014-060, 12 October 2014)

For a Higgs boson mass of **125.36 GeV**, the ratio of the observed to expected values of the total production cross section times branching fraction is $\mu = 1.08^{+0.16}_{-0.15}$ (stat.) $^{+0.16}_{-0.13}$ (syst.).

The corresponding ratios for the gluon-gluon fusion and vector-boson fusion production mechanisms are

1.01 ± 0.19 (stat.) $^{+0.20}_{-0.17}$ (syst.) and $1.28^{+0.44}_{-0.40}$ (stat.) $^{+0.29}_{-0.21}$ (syst.), respectively.

At $\sqrt{s} = 8$ TeV, the total production cross sections are measured to be $\sigma(gg \rightarrow H \rightarrow WW^*) = 4.6 \pm 0.9$ (stat.) $^{+0.8}_{-0.7}$ (syst.) pb and

$\sigma(VBF H \rightarrow WW^*) = 0.51^{+0.1}_{-0.15}$ (stat.) $^{+0.13}_{-0.08}$ (syst.) pb.

The fiducial cross section is determined for the gluon-gluon fusion process in exclusive final states with zero or one associated jet.

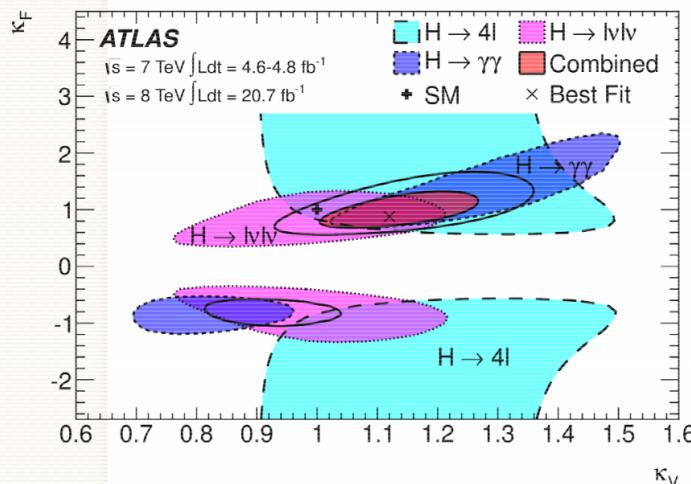
Измерение констант связи с фермионами и бозонами

Используются предположения:

- Существует одно состояние с массой $m_H = 125.5$ ГэВ
- Это состояние имеет малую ширину, позволяющее использовать приближение для его нулевой ширины: $\sigma \cdot \text{BR}(i \rightarrow H \rightarrow f) = \sigma_i \cdot \Gamma_f / \Gamma_H$
- Структура тензора в лагранжиане соответствует Стандартной модели, состояние является CP-четным скаляром; k_j есть масштабный фактор константы связи j -й частицы относительно предсказаний Стандартной модели (с k_j^2). Нет вклада BSM явлений.

Пример: $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$(\sigma \cdot \text{BR})(gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma) = \sigma_{\text{SM}}(gg \rightarrow H) \cdot \text{BR}_{\text{SM}}(H \rightarrow \gamma\gamma) \cdot \frac{\kappa_g^2 \cdot \kappa_\gamma^2}{\kappa_H^2}$$



В предположении

$$k_V = k_W = k_Z; \quad k_F = k_b = k_t = k_{\tau} \quad \text{и} \quad k_V > 0;$$

Получено

- Согласие двухмерного анализа с СМ наблюдается на уровне 12% ($\sim 2\sigma$)
- Значения констант при 68% CL находятся в областях
 $k_F = [0.76, 1.18]$ $k_V = [1.05, 1.22]$

Отношение констант связи с W и Z

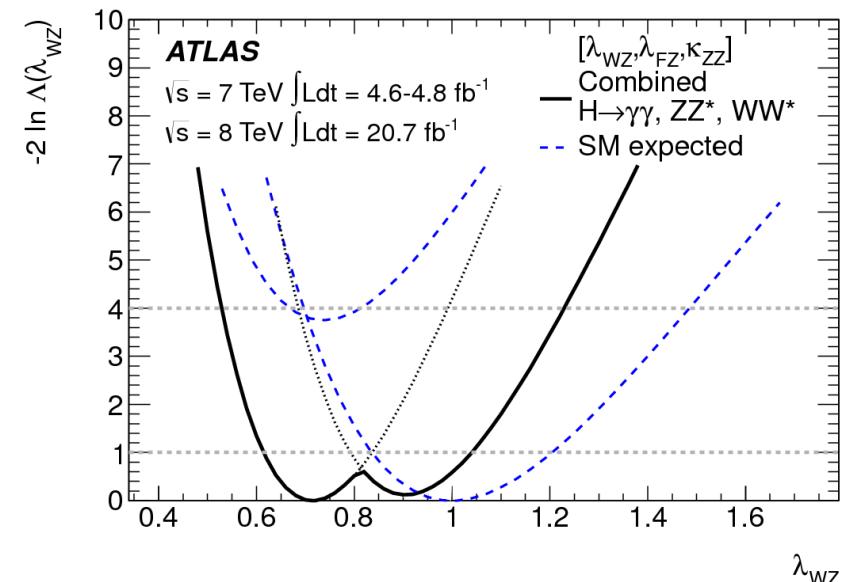
- Проверка соотношения констант связи Хиггса с W и Z проверялась через определение отношения $\lambda_{WZ} = k_W/k_Z$ из инклюзивных данных для уровня сигнала в каналах $H \rightarrow WW^*$ и $H \rightarrow ZZ^*$;
- Величина найдена равной $\lambda_{WZ} = 0.81^{+0.16}_{-0.15}$.

Результат большей точности получен с учетом каналов рождения WH и ZH и приведен на рисунке справа.

Расширенный фит определения λ_{WZ} с учетом возможного вклада эффектов BSM дает величину

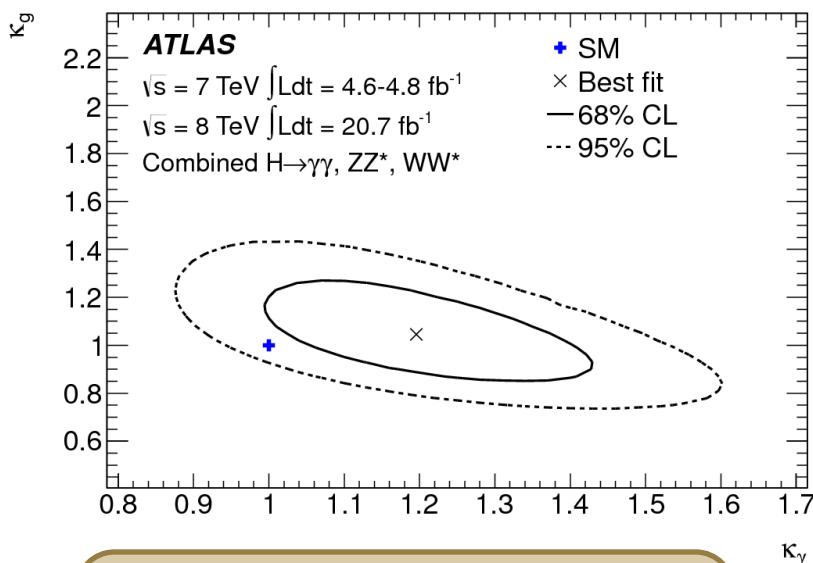
$$\lambda_{WZ} = 0.82 \pm 0.15$$

(4D – совместимость со Стандартной моделью составляет 20%)



Оценка вклада BSM частиц в диаграммы рождения и распада Хиггса

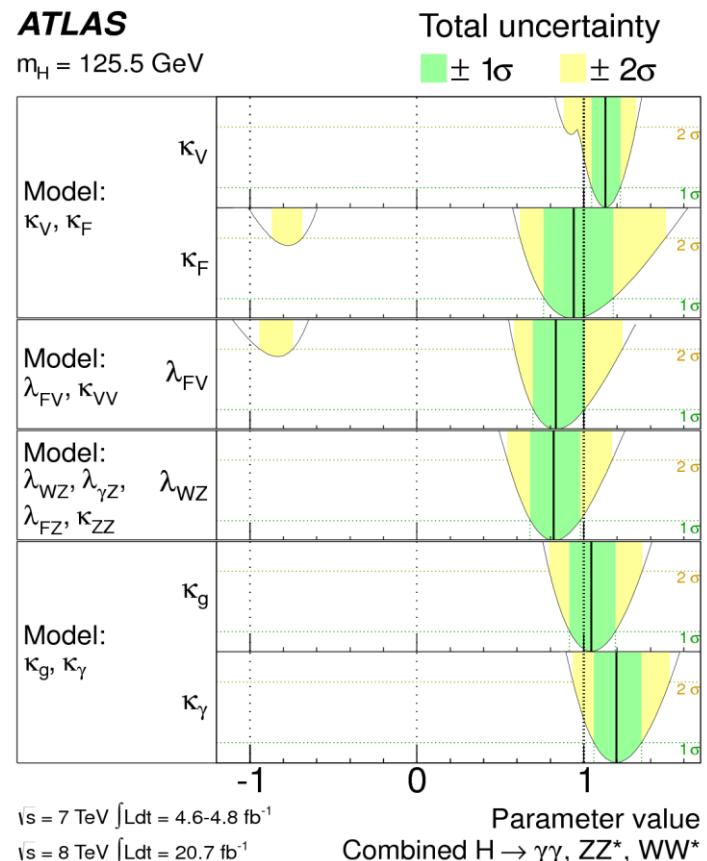
- Рассмотрены возможные сценарии вклада BSM частиц в петли диаграмм процессов рождения $gg \rightarrow H$ и распада $H \rightarrow \gamma\gamma$;
- k_g and k_γ – параметризация этих эффектов



$$k_g = 1.04 \pm 0.14$$

$$k_\gamma = 1.20 \pm 0.15$$

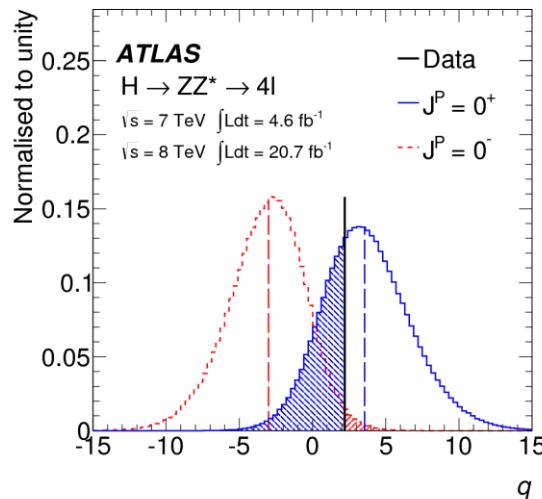
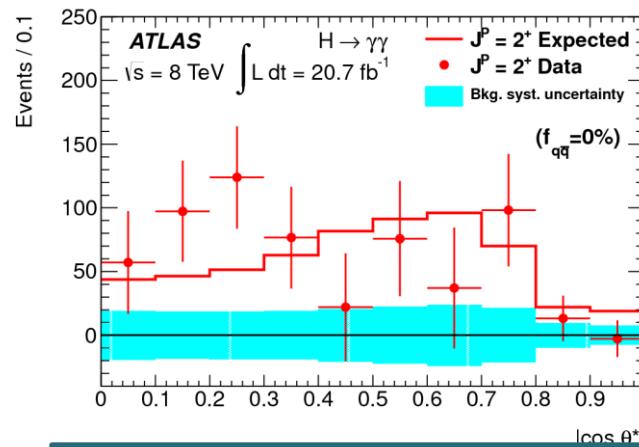
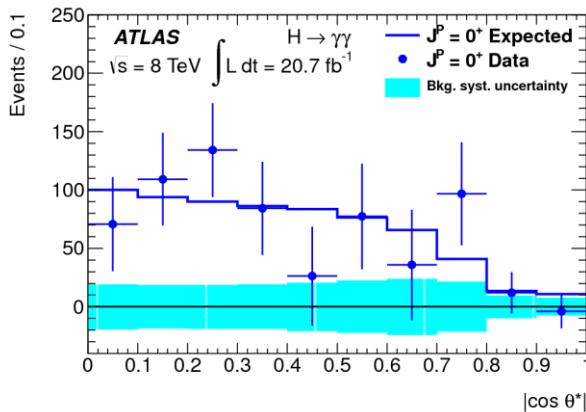
Масштабные факторы для констант связи бозона Хиггса массы $m_H = 125.5 \text{ ГэВ}$



Определение спина частицы

Сравнение гипотез $J^P = 0^+$ и 0^- , 2^+

Phys.Rev.Lett.726(2013)120

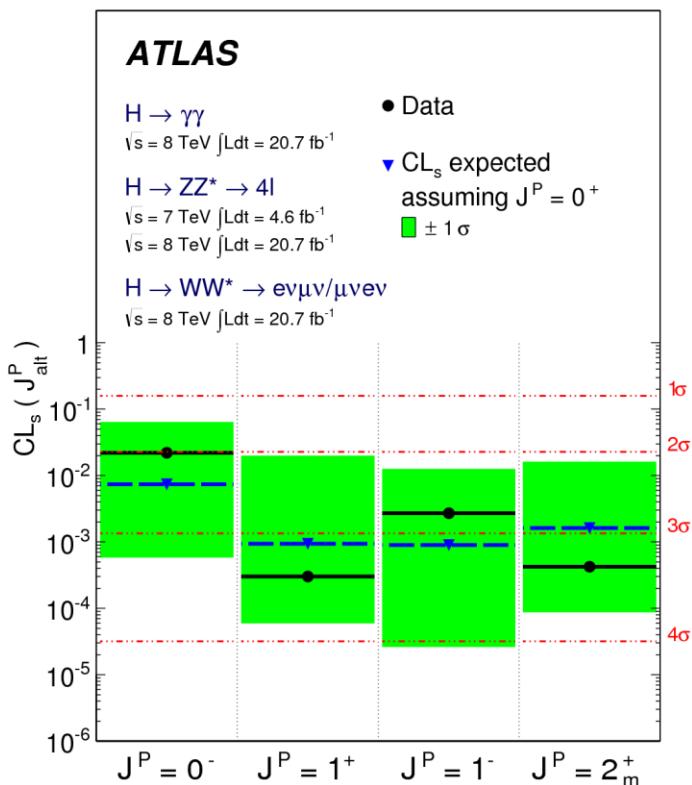


Анализируются распределения по косинусу угла θ^* фотонов относительно оси z в системе Колина-Сопера

$$|\cos \theta^*| = \frac{|\sinh(\Delta\eta^{\gamma\gamma})|}{\sqrt{1 + (p_T^{\gamma\gamma}/m_{\gamma\gamma})^2}} \frac{2p_T^{\gamma 1} p_T^{\gamma 2}}{m_{\gamma\gamma}^2}$$

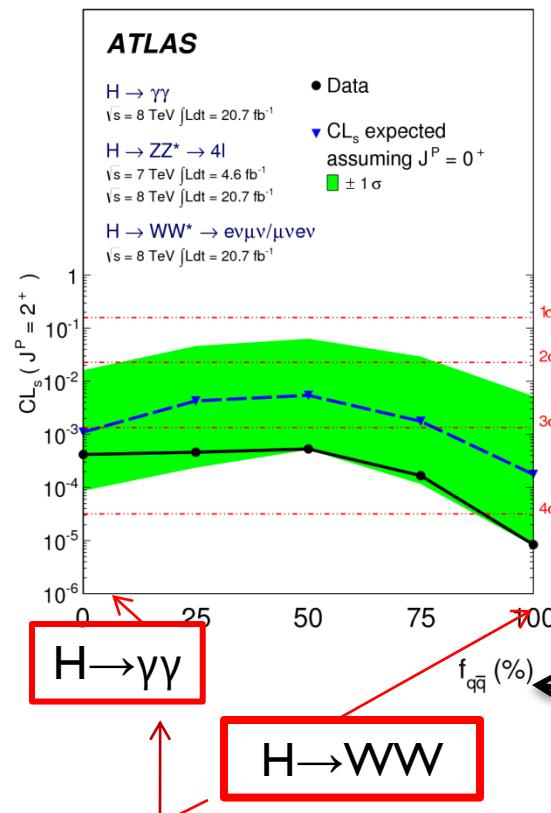
Определение спина частицы (arXiv:1307.1432)

$H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$
и их комбинации



Суммарный уровень исключения находится на уровне $2\text{-}3\sigma$

Квантовые числа бозона Хиггса Стандартной модели $J^P = 0^+$ сравниваются с альтернативными значениями $0^-, 1^-, 1^+, 2^+$; они исключены на уровне достоверности выше 97.8%

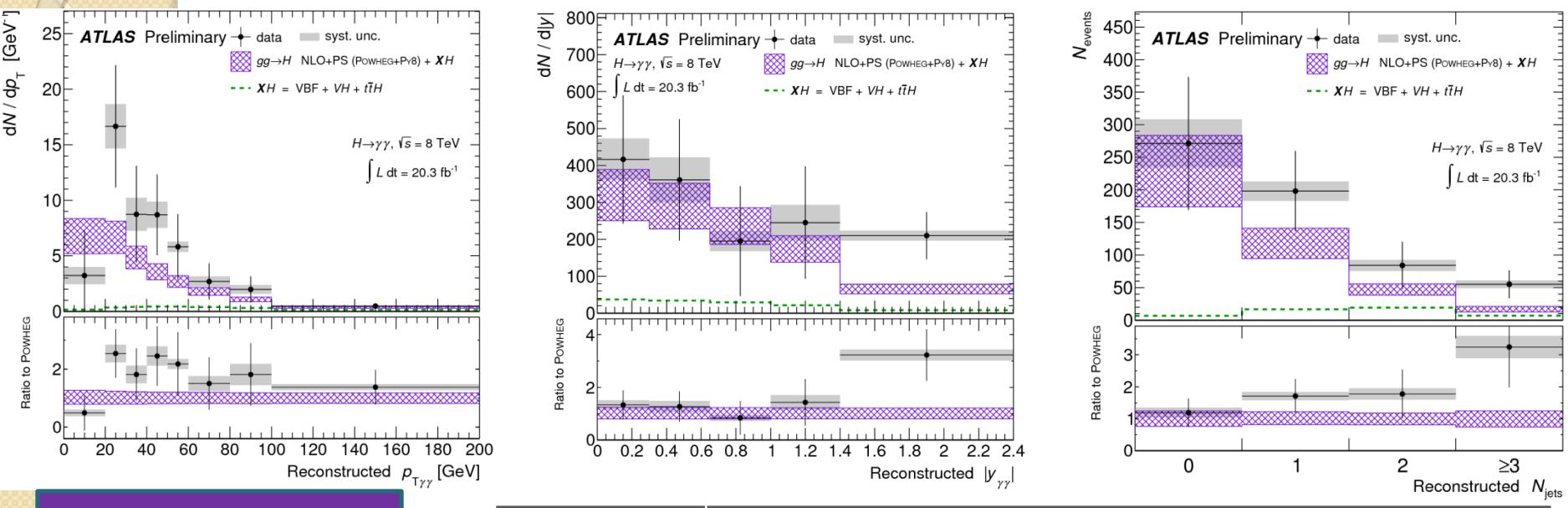


Наибольшие вклады

Исключение квантовых чисел состояния $J^P=2^+_m$ находится на уровне $3\text{-}4\sigma$

Вклады рождения кварк-антикварковых пар для частицы со спином 2

Дифференциальные сечения рождения бозона Хиггса для канала распада $H \rightarrow \gamma\gamma$



$$m_H = 126.8 \text{ GeV}$$

В пределах погрешностей измерений не наблюдается отклонений от предсказаний СМ

Fiducial signal MC Incl.

Fully Simulated and Selected Signal [%]
At $\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$ and $m_H = 125 \text{ GeV}$

Yield	ggH	VBF	WH	ZH	$t\bar{t}H$
407	87.9	7.3	2.8	1.6	0.5

Поиск новых гипотез о природе скаляра массы 125 ГэВ

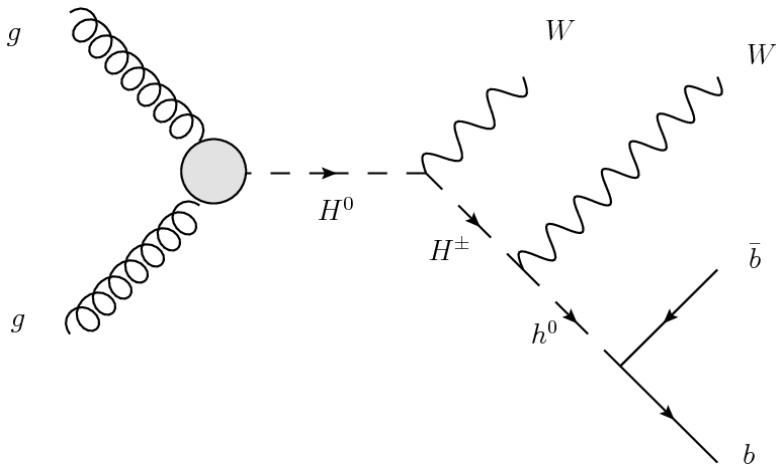
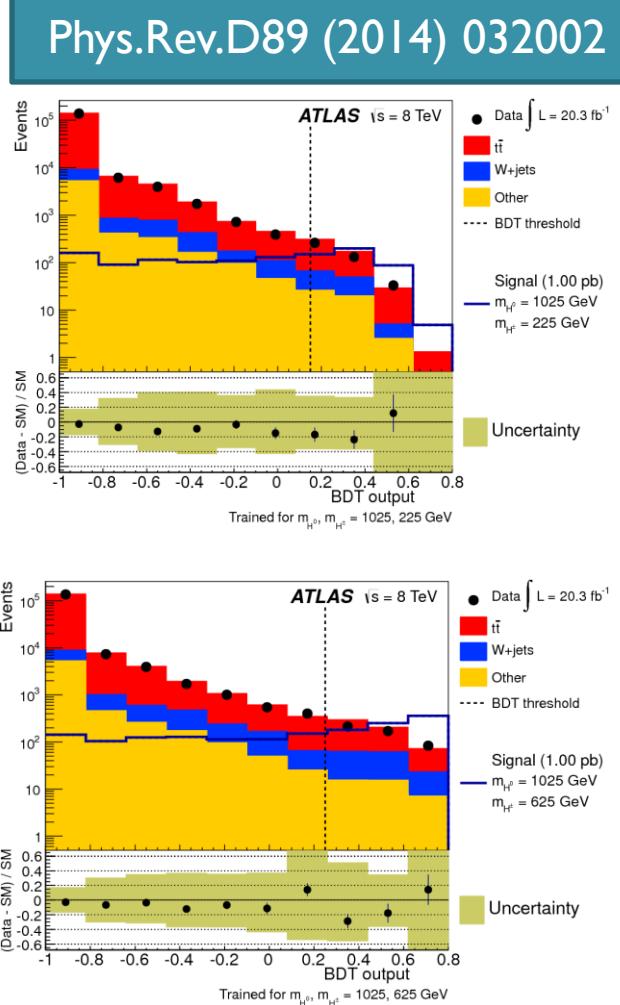


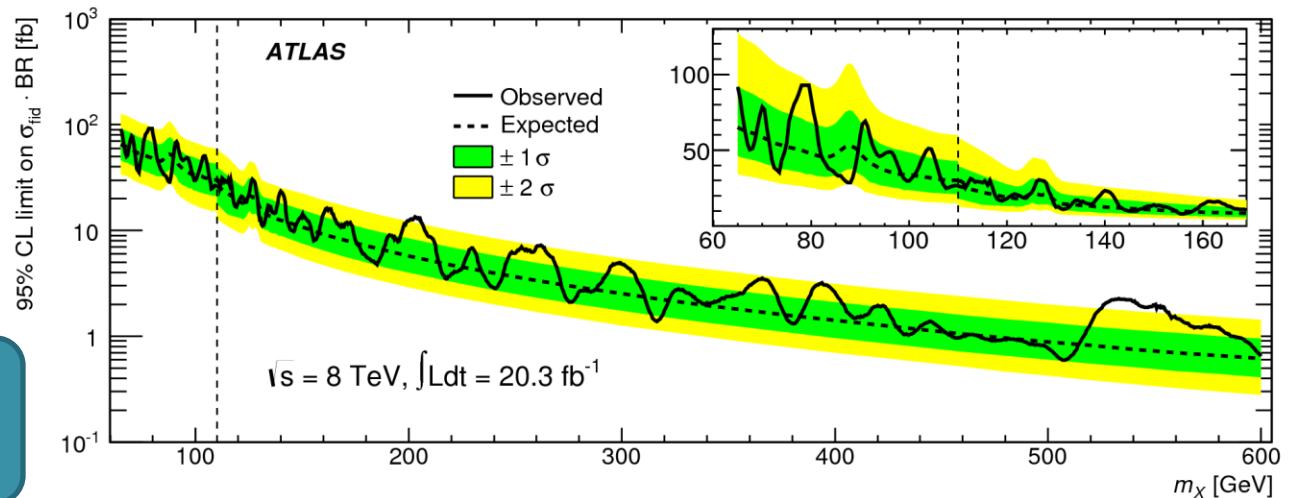
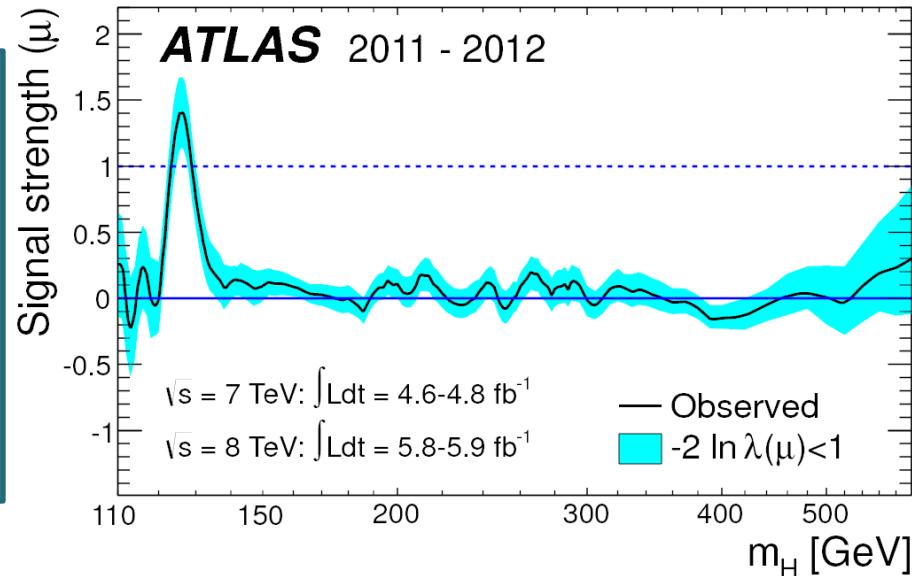
Диаграмма каскадного распада тяжелого бозона Хиггса $H^0 \rightarrow WH^\pm \rightarrow WW h^0 \rightarrow WW\bar{b}b$



Значения выходных классификаторов BDT для экспериментальных данных и модельных событий с разными гипотезами о массах H^0 и H^\pm : 1025 и 225 ГэВ (верх); 1025 и 625 ГэВ (вниз). Сечение сигнала предполагалось равным 1 пб

Важный результат – отсутствие других частиц до масс ~ 600 ГэВ

Сигнал бозона Хиггса другой массы (справа вверху)
Наличие резонанса с системе $\gamma\gamma$ в условиях, когда Хиггс с массой 125 ГэВ включен в фон (справа внизу)



Higgs boson width

- In the Standard Model and at 125 GeV, the Higgs boson width is 4.2 MeV
- Experimental width is a few GeV
- From width of observed peaks, derived direct 95% CL limit on the width:
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$: observed limit ATLAS 5.0 GeV (6.2 expected) CMS 2.4 GeV (3.1 expected)
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$: observed limit ATLAS 2.6 GeV (6.2 expected) CMS 3.4 (2.8 expected)
 - CMS as well
- ~3 orders of magnitude larger than SM
- However it recently turns out that indirect limit on the width can be set, less than 1 order of magnitude larger than SM
- What is the magic ? See next slides...

□ ATLAS: $\Gamma_H < 23-50.0$ MeV @95%CL (depending of $gg \rightarrow ZZ$ background K factor)

ATLAS-CONF-2014-042

Заключение

Измерены свойства бозона Хиггса:

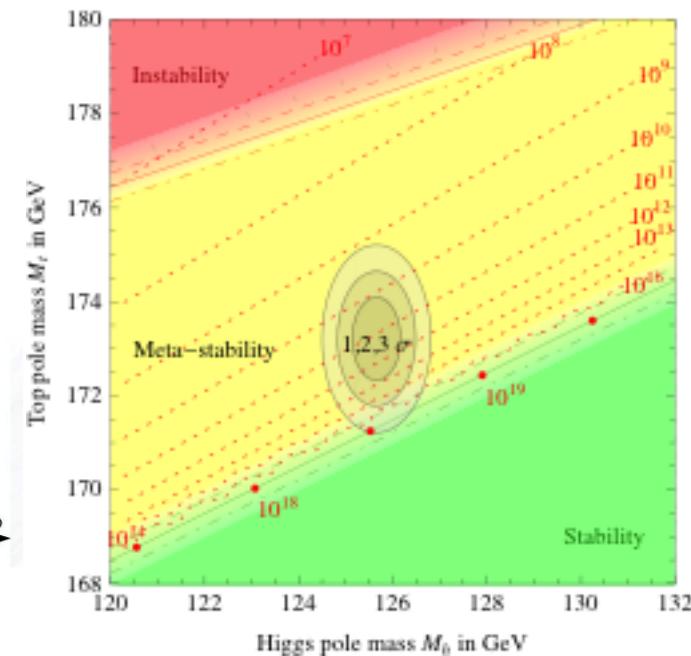
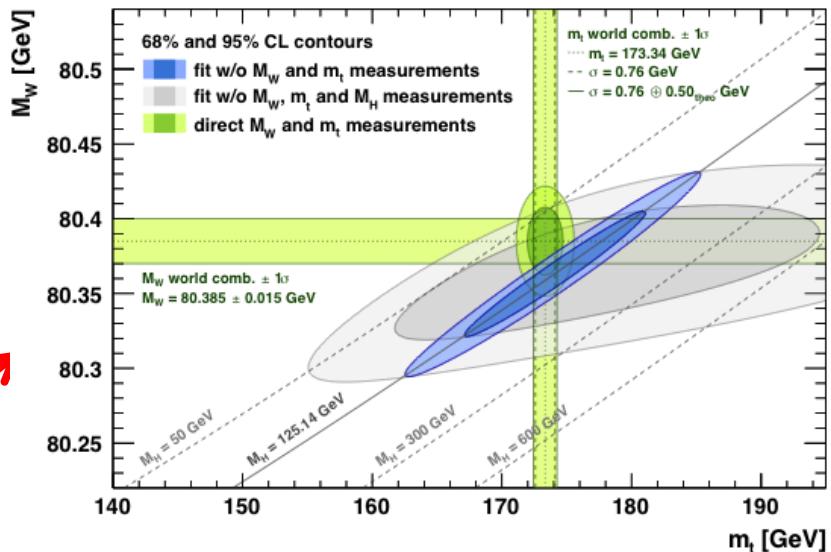
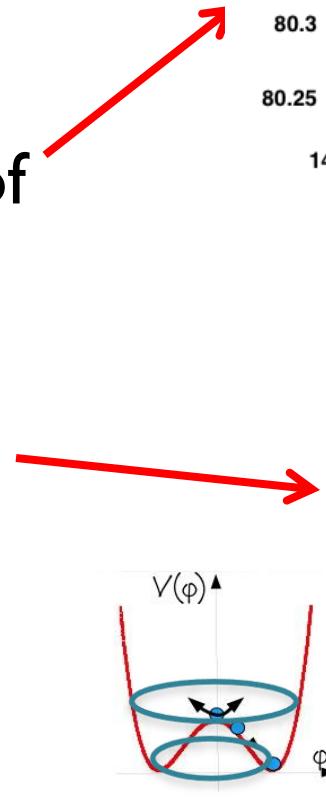
- Массы в различных каналах распада (125.36 ± 0.41) ГэВ
- Спин и четность частицы $J^P = 0^+$
- Относительная величина сигнала в разных каналах и для разных механизмов рождения: $\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1.30^{+0.18}_{-0.17}$
- Инвариантность к W и Z бозонам
- Получена оценка ширины распада H : $\Gamma_H/\Gamma_{SM} < 5.7$

Выполнен анализ для альтернативных механизмов рождения наблюдаемого состояния

Все результаты согласуются с предсказаниями стандартной модели

Higgs boson mass

- Fundamental parameter of the Standard Model
- SM predictions need it
- Self consistency of the model (global EW fit)
- Vacuum stability



Планы и перспективы ATLAS

- Стартующий в 2015г. второй сеанс (до 2018г.) принесет 10-кратное увеличение количества событий рождения бозона Хиггса (100 фб^{-1})
- Это позволит улучшить наблюдения в новых каналах распада и исследовать свойства частицы
- Многое зависит от обнаружения явлений новой физики и новых частиц в следующий сеансах работы коллайдера

Спасибо за внимание!

A FRACTION OF THE WOMEN FROM THE ATLAS EXPERIMENT





8 марта 2010г.



Практическое участие

Май 2014

