

Новые направления
физических исследований
после запуска
модифицированного БАК

Григорий Александрович Феофилов

*Лаборатория физики сверхвысоких энергий, НИИ физики им.В.А.Фока,
Санкт-Петербургский государственный университет*

*Лекция на Секции физики, Дом Ученых, СПб, Дворцовая наб. 26, малый лекционный зал
16.05.2022, 18-00 + ZOOM*

<https://cern.zoom.us/j/67052059152?pwd=VGJUSjZ3bDlvRDlzMW1uVTd5Zmx4dz09>

<https://indico.cern.ch/event/1160694/>

Содержание

Введение.

- 1) Поиск отклонений от Стандартной модели ATLAS, CMS, LHCb, ALICE + новые установки
- 2) ALICE: исследования сильного взаимодействия между разными адронами
- 3) СПбГУ в эксперименте ALICE

Zoom: <https://cern.zoom.us/j/68695006331?pwd=OGc5VzJFQlZ0amQwZDVJb0h4NTN2dz09>

<http://raen-spb.ru/Семинары-секции-физики>

Слайды доклада: <https://indico.cern.ch/event/1160694/>

Содержание

Введение.

- 1) Поиск отклонений от Стандартной модели ATLAS, CMS, LHCb, ALICE + новые установки
- 2) ALICE: исследования сильного взаимодействия между разными адронами
- 3) СПбГУ в эксперименте ALICE

«Никто не обнимет необъятного!»

КОЗЬМА ПРУТКОВ

→ поэтому в докладе ниже делается попытка представить только некоторую выборку из весьма насыщенной программы ЦЕРН



Две международные конференции (СПбГУ)

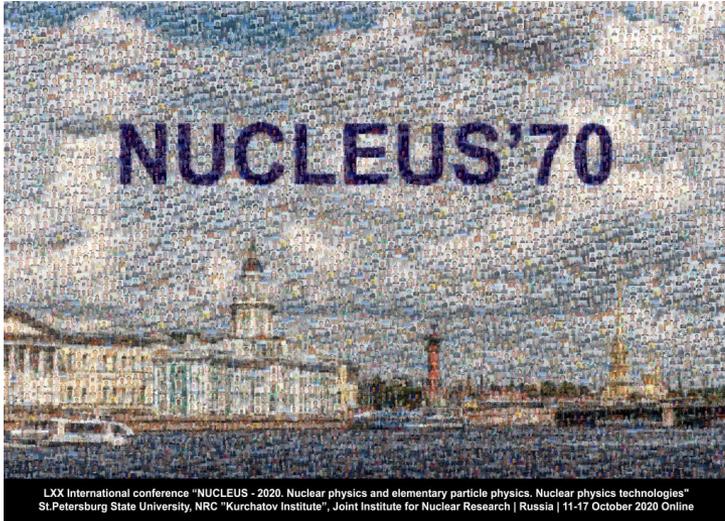
NUCLEUS-2020 и NUCLEUS-2021 --- старейшие в России

- LXX International conference "NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies".
11-17 Oct 2020.

<https://events.spbu.ru/events/nucleus-2020>

- LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies".
20 – 25 Sept. 2021.

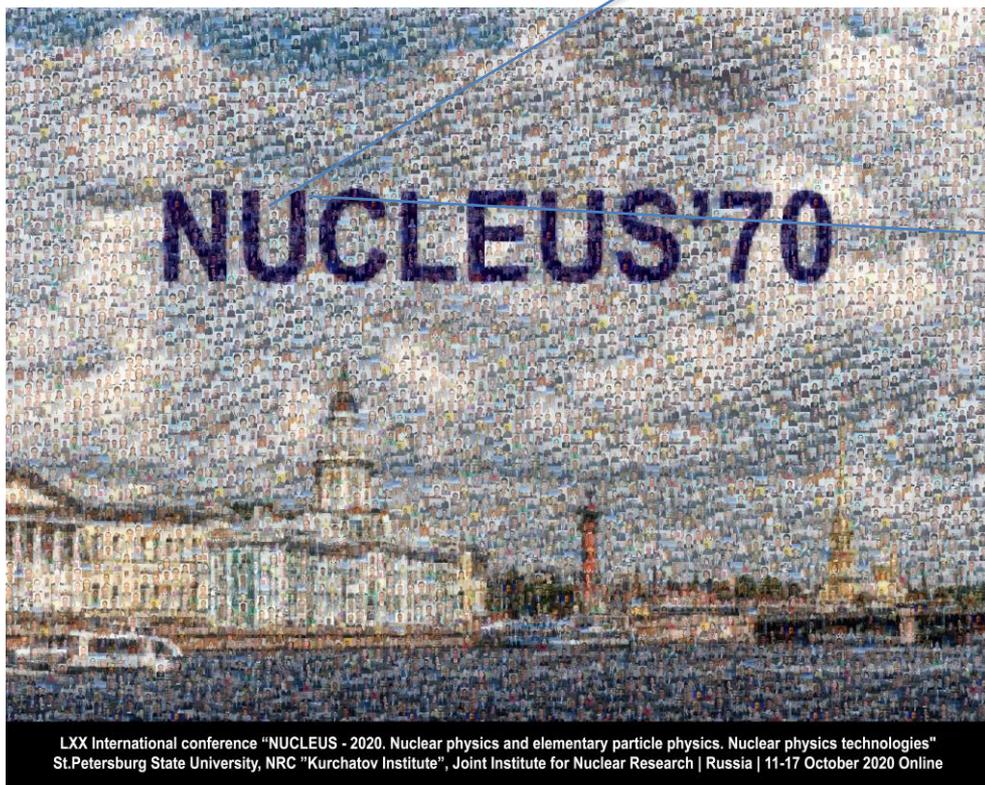
<https://events.spbu.ru/events/nucleus-2021>



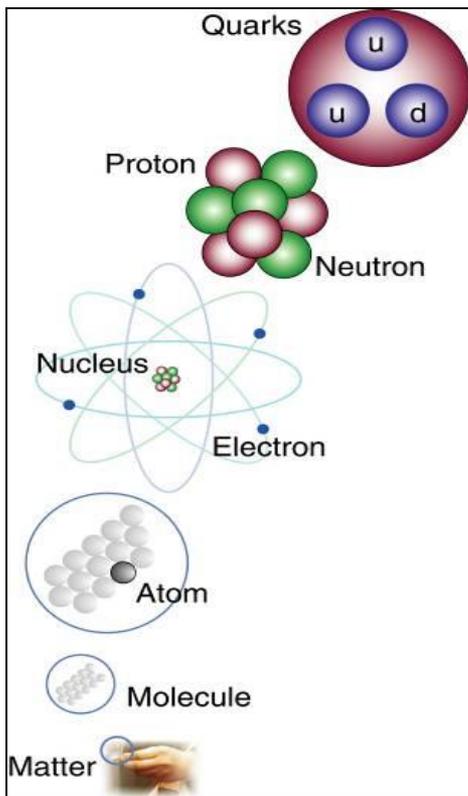
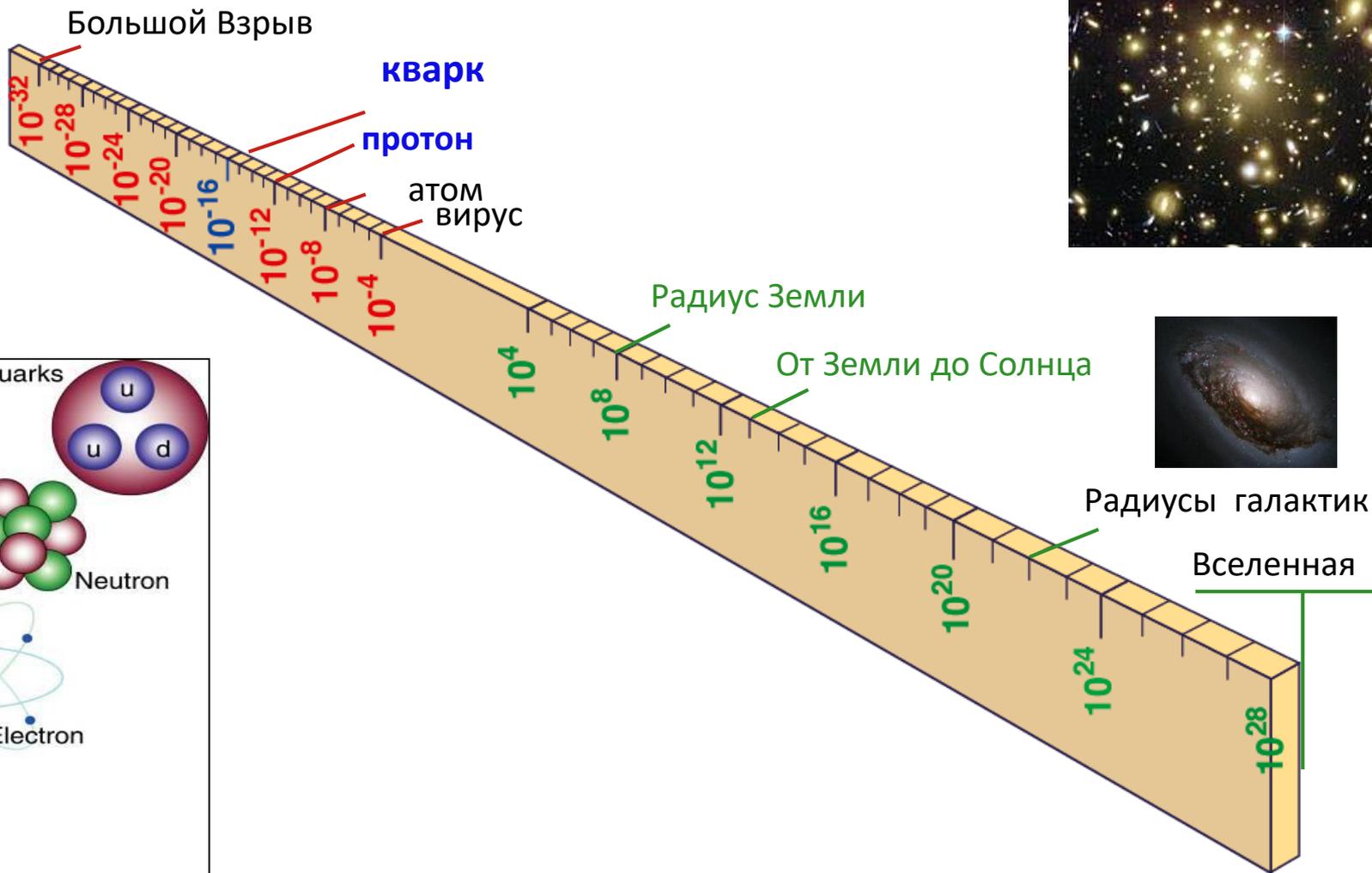
Международная конференции в Кракове

Quark Matter 2022, <https://indico.cern.ch/event/895086/>

Две международные конференции в СПбГУ - цифровые технологии «на службе науки» 😊



Масштабы расстояний в современной физике (см)



Полезная ссылка для Введения:

«Перспективы физики частиц и «висячие концы» Стандартной модели»

[1] https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/436279/Perspektivy_fiziki_chastits_i_visyachie_kontsy_Standartnoy_modeli

[«Троицкий вариант» №2, 2022](#) • [Космология](#)

Валерий Рубаков, Борис Штерн

[«Троицкий вариант» №2\(346\), 25 января 2022 года](#)

Большой адронный коллайдер в ЦЕРН



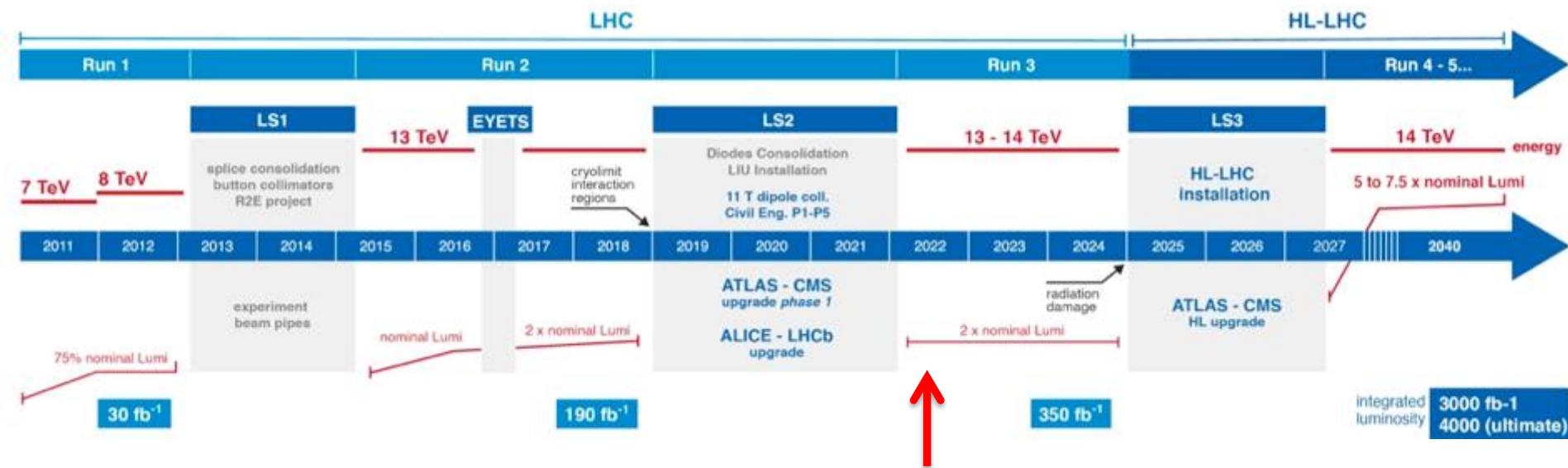
Большой адронный коллайдер в ЦЕРН: работы по модификации в 2019-2021 года



Модифицированный БАК

- Большой адронный коллайдер (БАК) – крупнейший в мире ускоритель частиц. БАК состоит из 27 км сверхпроводящих магнитов и ускорительных секций в дополнение к ранее созданной в ЦЕРН ускорительной инфраструктуре.
- БАК начал успешную работу 10 сентября 2008 года и был остановлен в 2018 году на техническое обслуживание и модернизацию, которая завершилась в 2021-м (затянулась из-за COVID-19).
- Многие компоненты коллайдера заменены на более совершенные или серьезно модернизированы. Из основных целей - энергия столкновений нуклонов в СЦМ 13,6 ТэВ и увеличение светимости.
- В рамках нового цикла исследований на сеанса RUN 3 RUN 4 будет проведено больше столкновений, чем за оба предыдущих – с тем, чтобы подвергнуть Стандартную модель физики частиц строжайшим испытаниям.
- Успешный сеанс прошел 27 октября – 03 ноября 2021 на пилотном протонном пучке модифицированного БАК
- С 22 апреля 2022 – циркулируют пучки протонов с энергией 450 ГэВ и идет подготовка к началу физических сеансов летом (в июле 2022).

Планы модернизации БАК на 2018-2020 и 2024-2027 годы

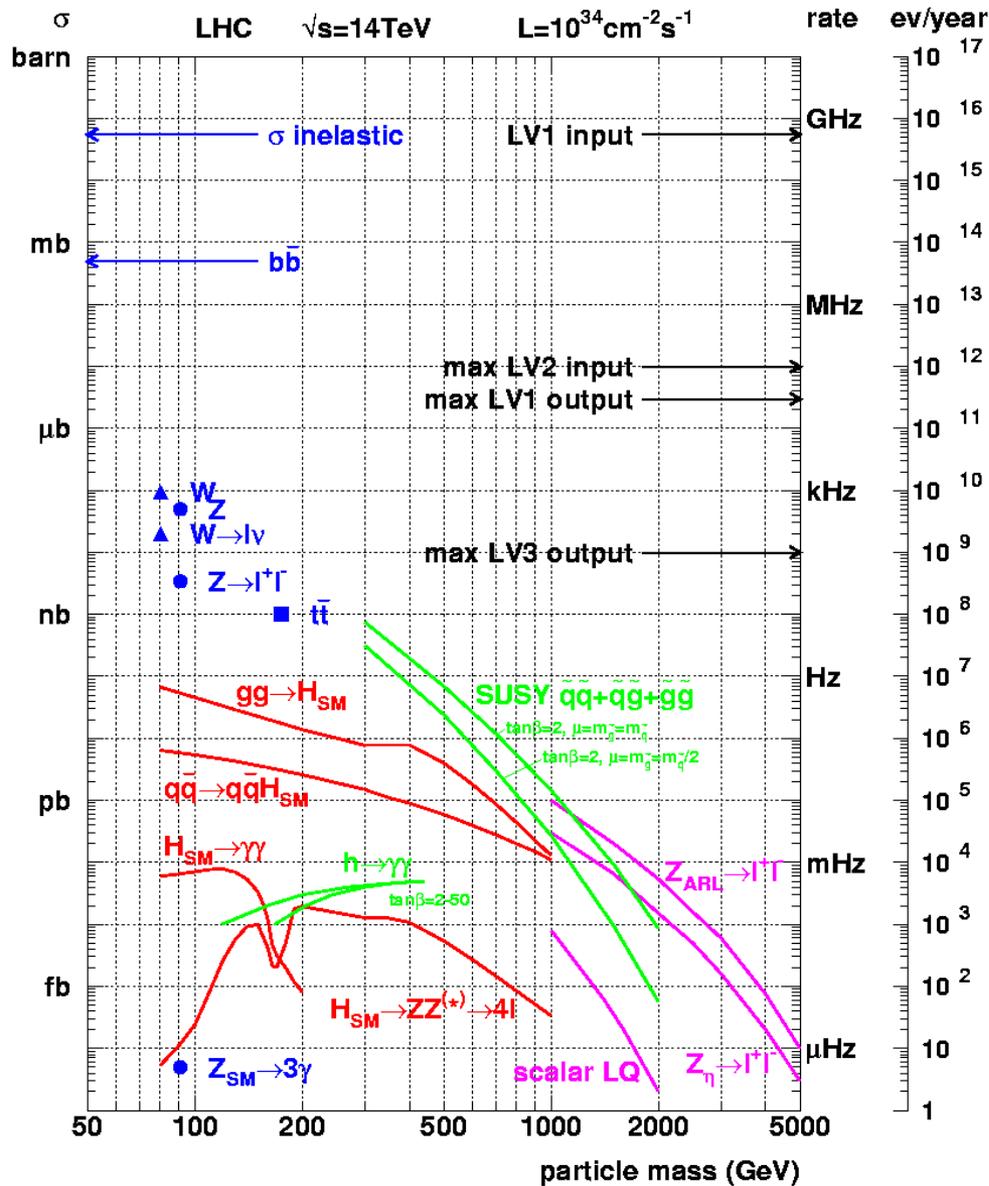


СЕГОДНЯ МЫ ЗДЕСЬ

- За 10 лет успешной работы LHC 2008-2018 гг., в 2016 г. штатно получена светимость в **pp**-столкновениях до $1,2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.
- Предполагается, что после длительного останова 2 (LS2) БАК увеличит частоту столкновений **Pb-Pb** в сеансе RUN 3 с 10 кГц до 50 кГц, что соответствует мгновенной светимости $6 \times 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

[1] <https://project-hl-lhc-industry.web.cern.ch/content/project-schedule>

Новая физика - Редкие события



← Ожидаемое число событий за год

«Хорошо изученные процессы»,
нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

«Новая Физика»
Это мы хотим измерить и записать для дальнейшего анализа...

Физика частиц

и некоторые открытые вопросы

- Какова природа *нашей Вселенной*?
- Куда делось *антивещество*?
- Что такое *«темная материя»* и можно ли ее получить в лаборатории?
- *Природа массы* частиц?
- Откуда берется масса у *нейтрино*?
- Какова *природа конфайнмента* кварков?
- Что такое *кварк-глюонная плазма*?

Кварковая модель элементарных частиц, 1964 год

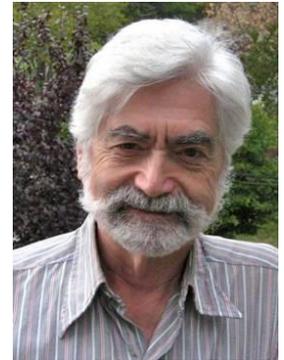


1969 год: Нобелевская премия по физике «За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий»



Марри Телл-Ман

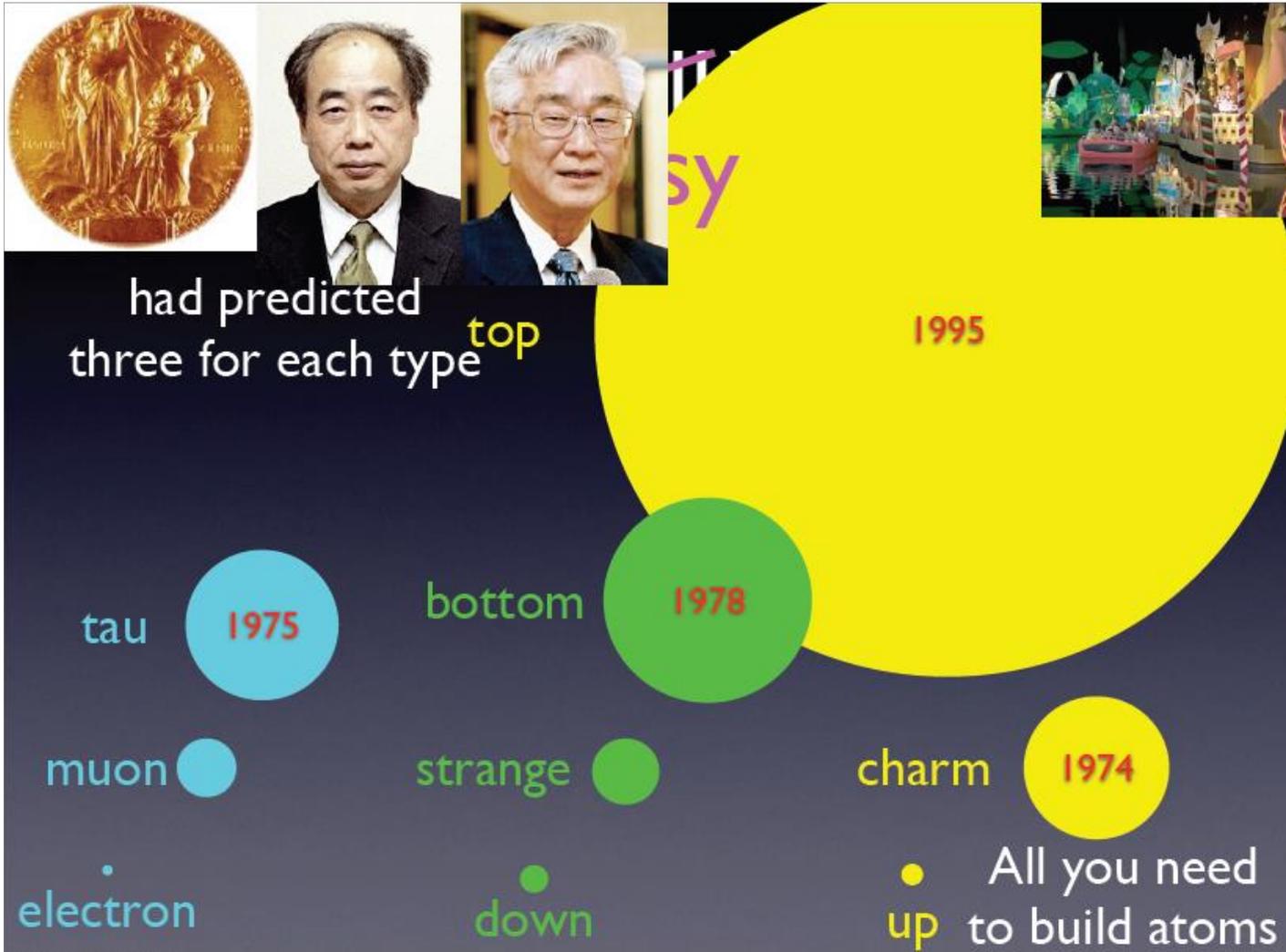
2015 г. Премия Дж. Сакураи в области теоретической физики частиц, присуждаемая Американским Физическим Обществом. «За его независимое предложение о том, что адроны состоят из дробно заряженных фундаментальных частиц, называемых кварками или эйсами, и за развитие революционных последствий этого для масс адронов и их свойств».



Джордж Цвейг



1990 год: Джером Фридман Генри Кендалл , Ричард Тейлор «За пионерские исследования глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, что имело большое значение для развития кварковой модели в физике частиц»



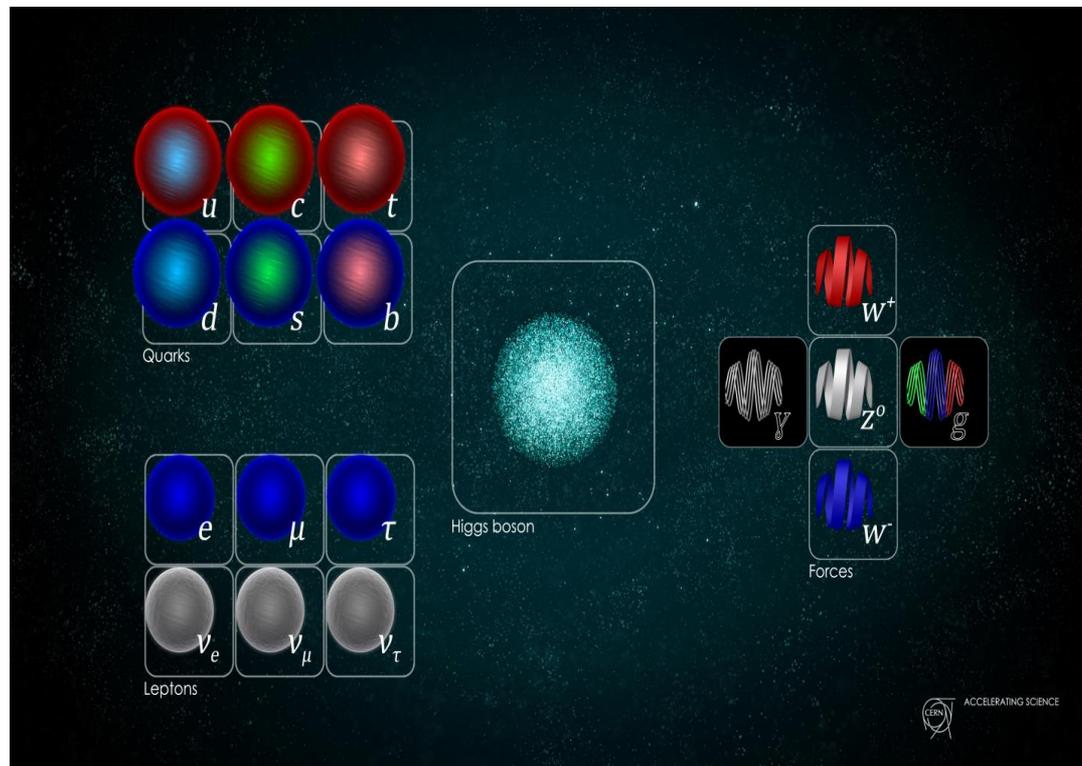
Thursday, July 23, 2009

The Nobel Prize in Physics 2008 :

Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц: Й. Намбу, **MAKOTO KOBAYASHI AND TOSHIHIDE MASKAWA**

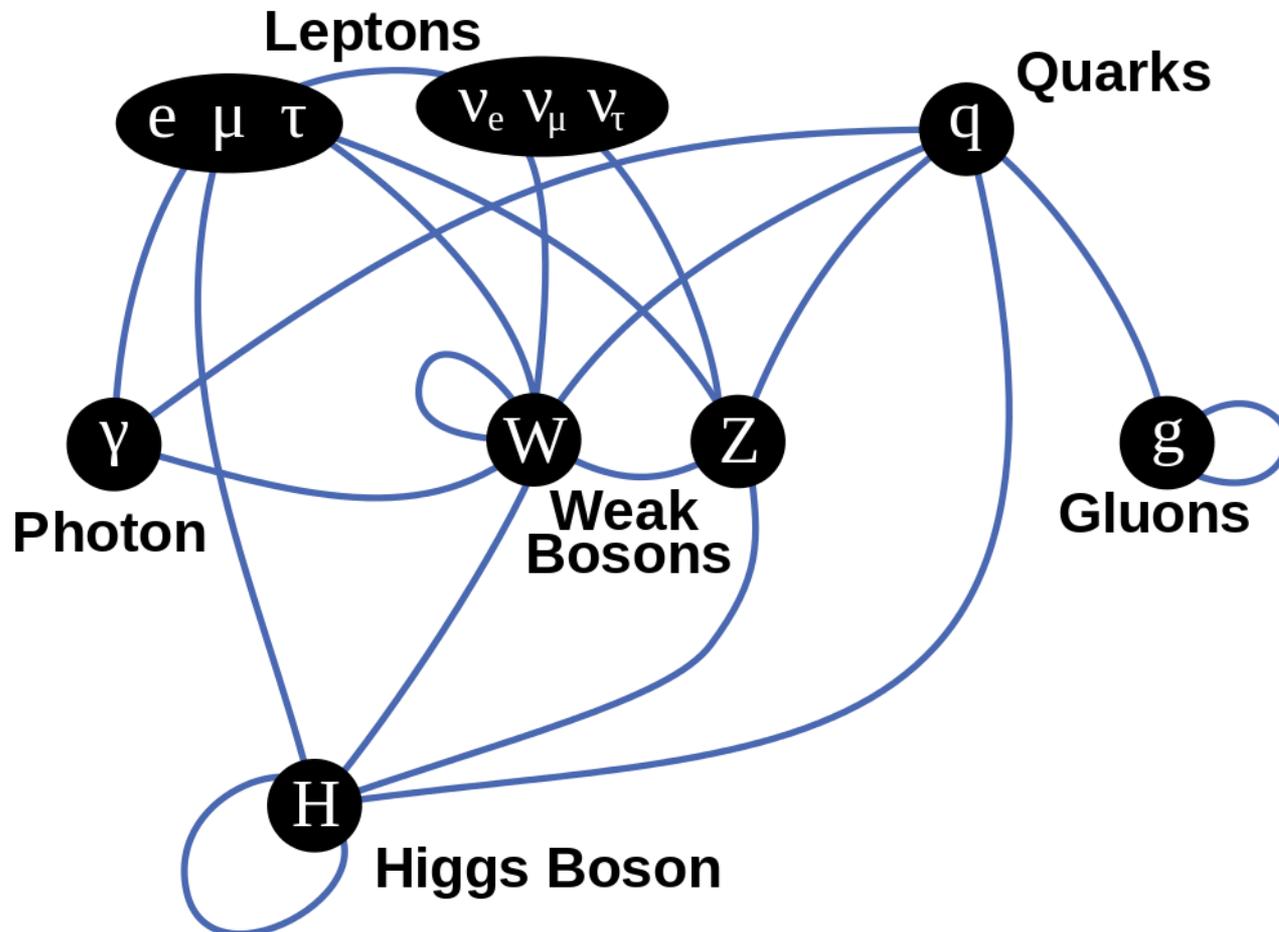
Нобелевская—2008: "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

Триумф Стандартной Модели и открытые вопросы



<https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-CHART-2015-001-1/file?size=large>

Схема взаимодействий между элементарными частицами, описываемая Стандартной моделью



Фундаментальные силы в природе

1) Гравитация:

переносчик взаимодействия – **безмассовый гравитон**

2) **Слабые взаимодействия**. Отличаются короткодействием 10^{-18} м. Ответственны за некоторые распады ядер.

Переносчики -- **W и Z бозоны с большой массой**.

3) **Электромагнитные взаимодействия** –

Переносчик – **безмассовый фотон**

4) **Сильные (или «цветные») взаимодействия**.

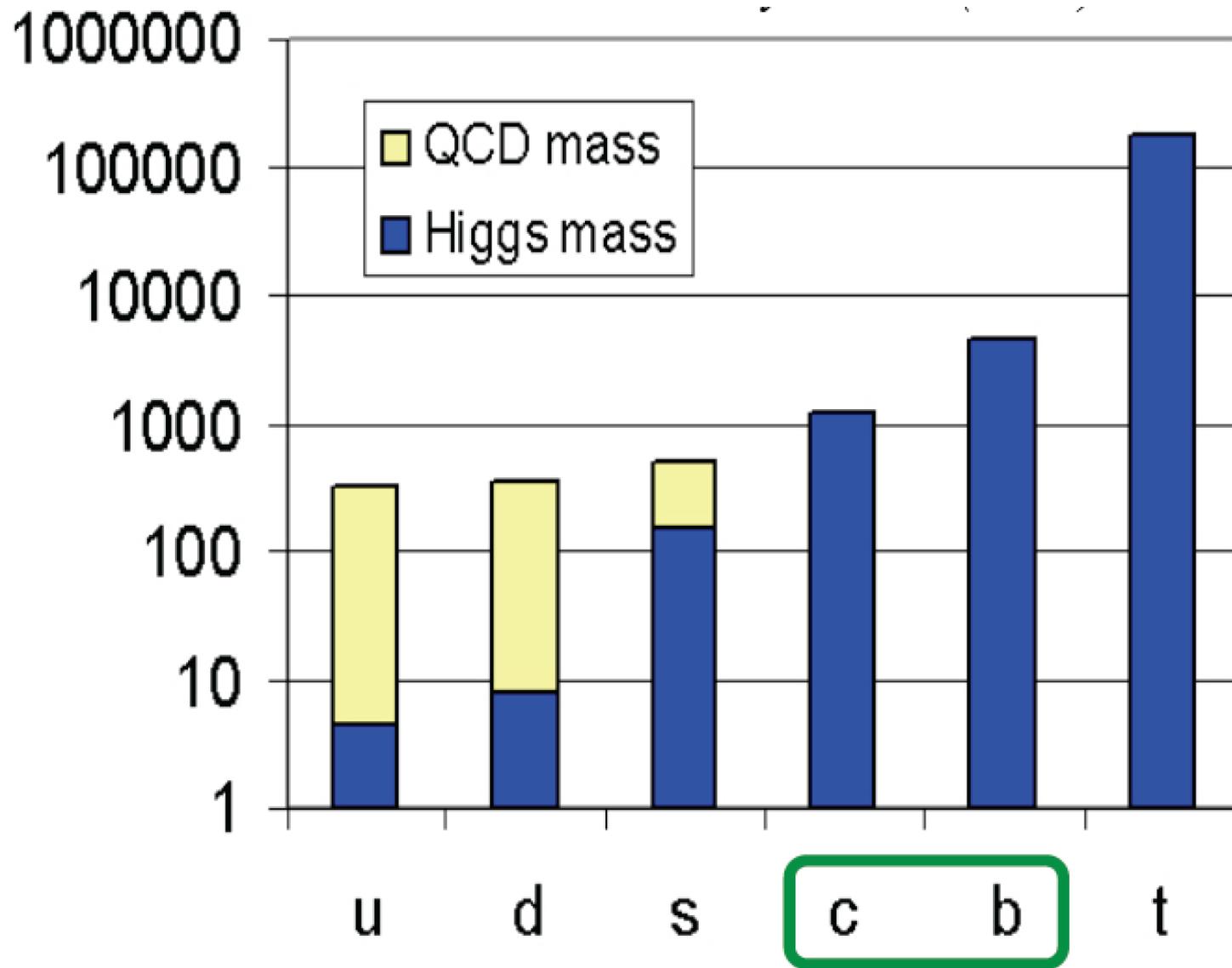
Радиус действия 10^{-15} м. Ответственны за удерживание кварков в протонах и нейтронах, а последних – в ядра.

Переносчик – **8 безмассовых глюонов**

5) **Хиггсовский бозон и хиггсовское поле - объясняют происхождение массы у частиц.**

Кварки

Символ	Название		Заряд	Масса
	рус.	англ.		
Первое поколение				
<i>d</i>	нижний	<i>down</i>	$-\frac{1}{3}$	$4,79 \pm 0,07 \text{ МэВ}/c^2$
<i>u</i>	верхний	<i>up</i>	$+\frac{2}{3}$	$2,01 \pm 0,03 \text{ МэВ}/c^2$
Второе поколение				
<i>s</i>	странный	<i>strange</i>	$-\frac{1}{3}$	$95 \pm 5 \text{ МэВ}/c^2$
<i>c</i>	очарованный	<i>charm (charmed)</i>	$+\frac{2}{3}$	$1,8 \text{ ГэВ}/c^2$
Третье поколение				
<i>b</i>	прелестный	<i>beauty (bottom)</i>	$-\frac{1}{3}$	$4,5 \text{ ГэВ}/c^2$
<i>t</i>	истинный	<i>truth (top)</i>	$+\frac{2}{3}$	$171 \text{ ГэВ}/c^2$



Триумф СМ и открытые вопросы

Particle Data Group: результаты более 24 000 измерений (более 7000 статей), согласующихся со СМ за исключением нескольких

Хотя Стандартная модель описывает большинство наблюдаемых в современной физике частиц, существует ряд причин, по которой ее считают **неполной!**

Открытые вопросы СМ:

- 1) Почему массы фермионов такие разные? Валерий Рубаков [1]: «У электрона масса — пол-МэВ, а у t-кварка — 172 ГэВ, разница почти на шесть порядков! При этом механизм, которым они приобретают массы, — один и тот же так с какого перепоя он дает массы, отличающиеся на шесть порядков?»

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	γ фотон
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$ -1 1/2	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$ -1 1/2	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$ -1 1/2	0 1	Z Z бозон
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$ 0 1/2	± 1 1	W W бозон
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
				КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ	

[1] https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/436279/Perspektivy_fiziki_chastits_i_visyachie_kontsy_Standartnoy_modeli

Триумф СМ и открытые вопросы

Particle Data Group: результаты более 24 000 измерений (более 7000 статей), согласующихся со СМ за исключением нескольких

Хотя Стандартная

модель **хорошо описывает**

большинство

явлений современной физике

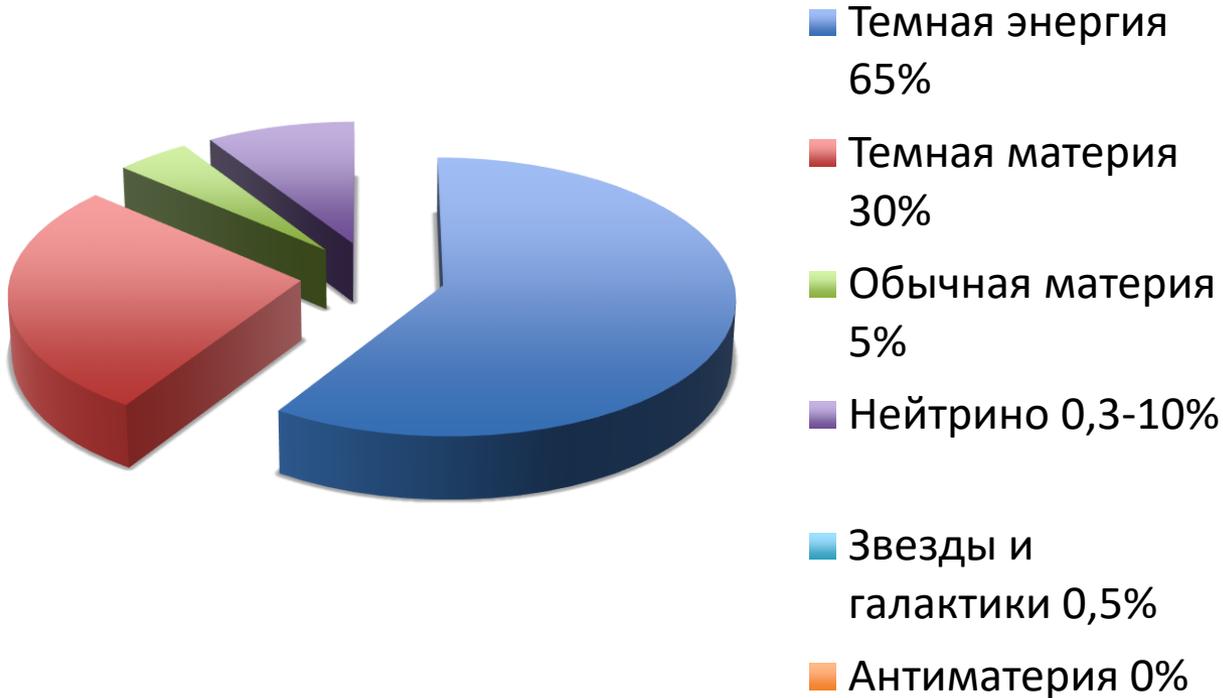
частиц, существует ряд причин, по которой ее считают **неполной!**

Открытые вопросы СМ:

- 1) Почему массы фермионов такие разные?
- 2) Какова масса у нейтрино?
- 3) Почему три поколения?
- 4) Куда делась антиматерия?
- 5) Что такое темная материя?
- 6) Кварковый конфайнмент?
- 7) СМ не учитывает гравитацию

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Материя Вселенной



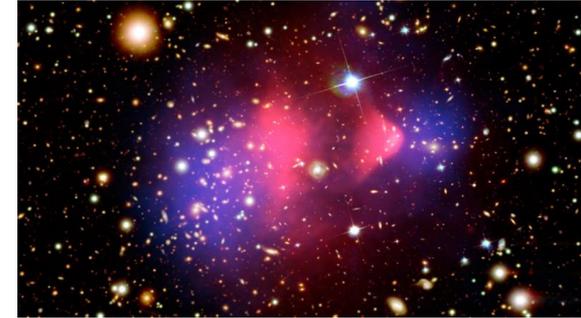
Сегодня мы ничего (!) не знаем о
95% материя Вселенной !

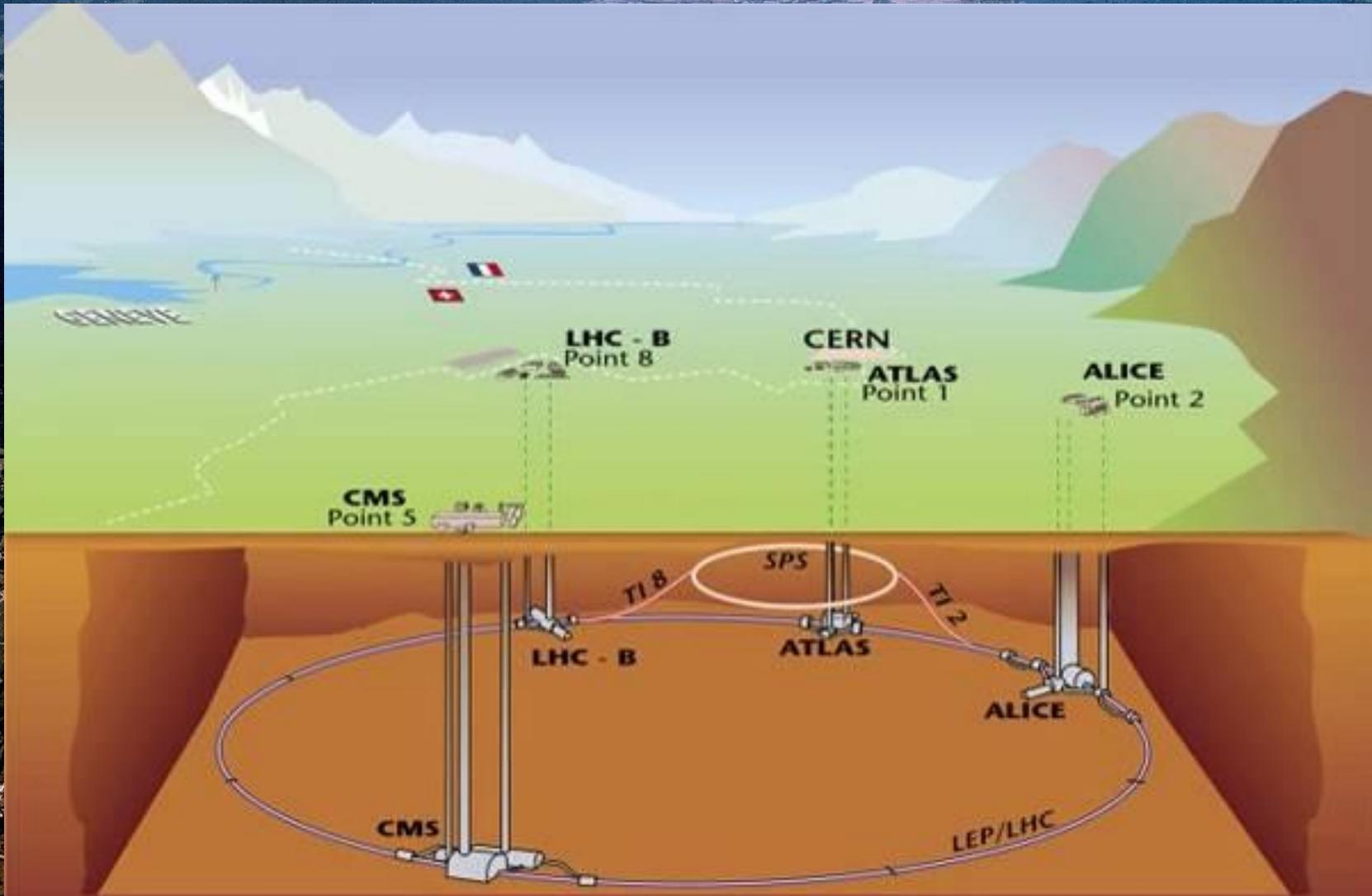
ОТКРЫТЫЕ

ВОПРОСЫ

Что такое «темная материя»?

- В Стандартной модели кандидатов на темную материю нет
- Классы объектов, которые могли бы претендовать на роль тёмной материи:
 - 1) Нейтрино (не более 10% тёмной материи?)
 - 2) Massive Compact Halo Objects, МАСНО --(не более 20% массы тёмной материи?)
 - 3) Большое количество чёрных дыр небольшого размера ?
 - 4) Суперсимметрия SUSY и нейтралино ($m \sim 100m_p$)?
 - 5) Класс WIMP — Weakly Interacting Massive Particle.
 - 6) ...другое?





ATLAS и CMS

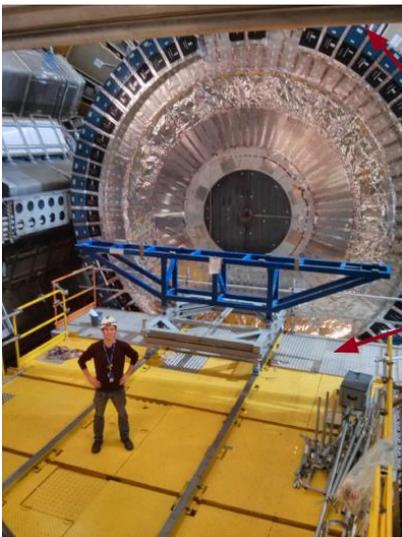
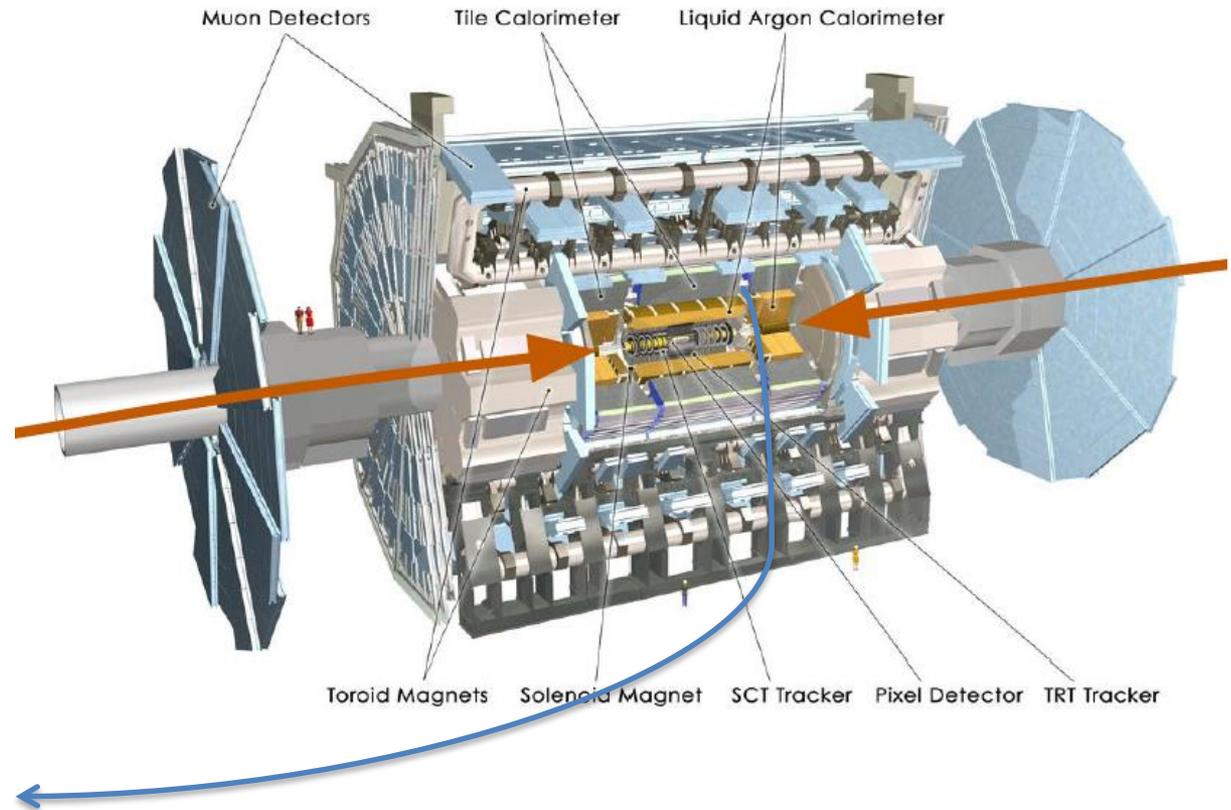
- Продолжаются исследования Стандартной модели на основе полного набора данных [Run2](#)
- Идет непрерывное развитие понимание детектора, улучшение и применение новых методов анализа.
- Стандартная модель продолжает демонстрировать невероятные предсказания.
- Но с повышением точности экспериментальных измерений и поиска, продолжается поиск отклонений от СМ
- Коллаборации ATLAS и CMS усиленно готовится к [Run3](#)

Поиск частиц «темной материи» на БАК?

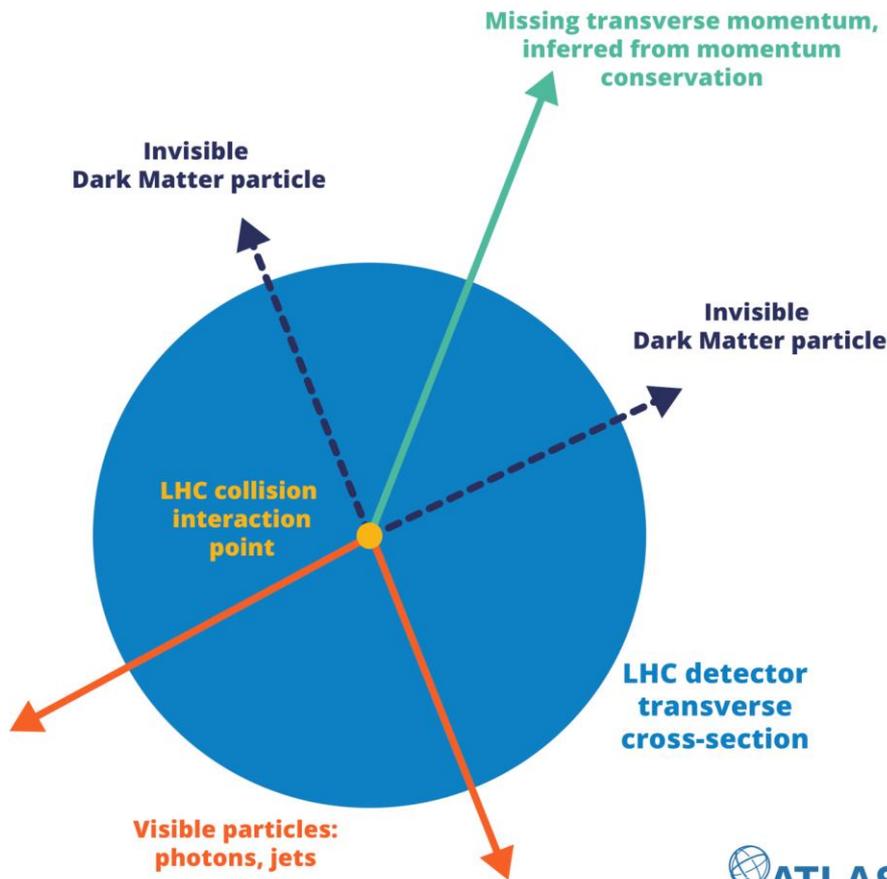
Решения, которые могут ответить на некоторые или все эти вопросы:

- Суперсимметрия
- Лептокварки
- и т. д.

Эксперимент ATLAS (установка 25 м в диаметре):



Поиск частиц темной материя в эксперименте ATLAS на БАК



SUSY?

<https://atlas.cern/updates/atlas-feature/broken-symmetry-searches-supersymmetry-lhc>

Поиск частиц темной материя в эксперименте ATLAS на БАК

«Невидимые» частицы в эксперименте ATLAS
(регистрация моноструи)

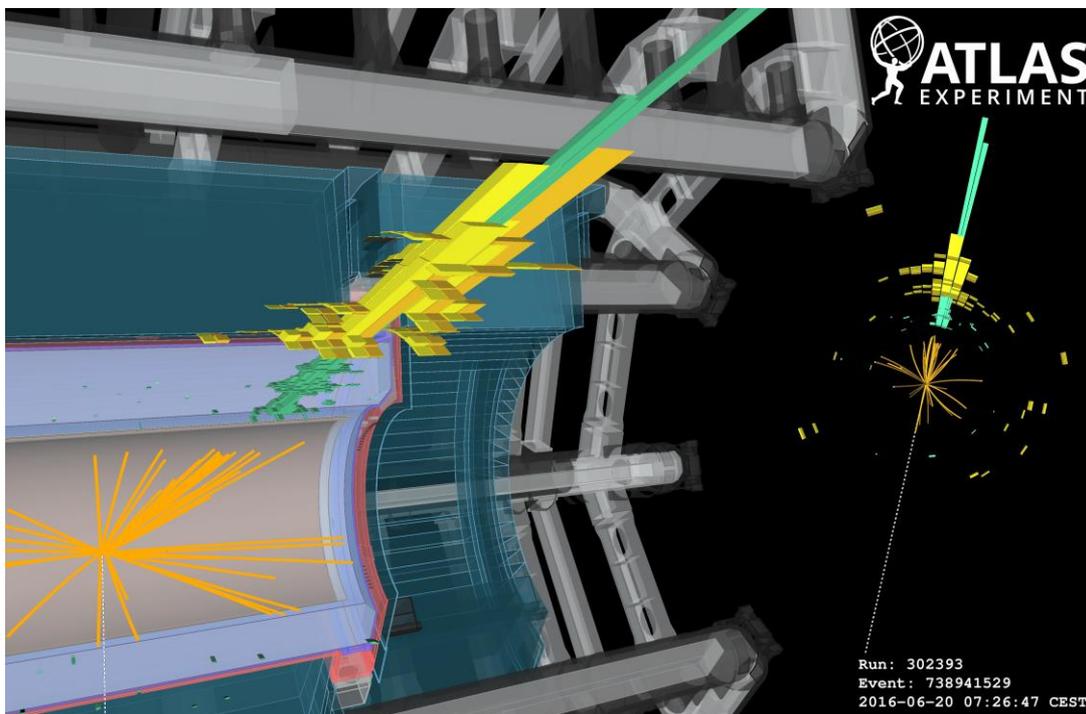


Image: ATLAS Collaboration/CERN

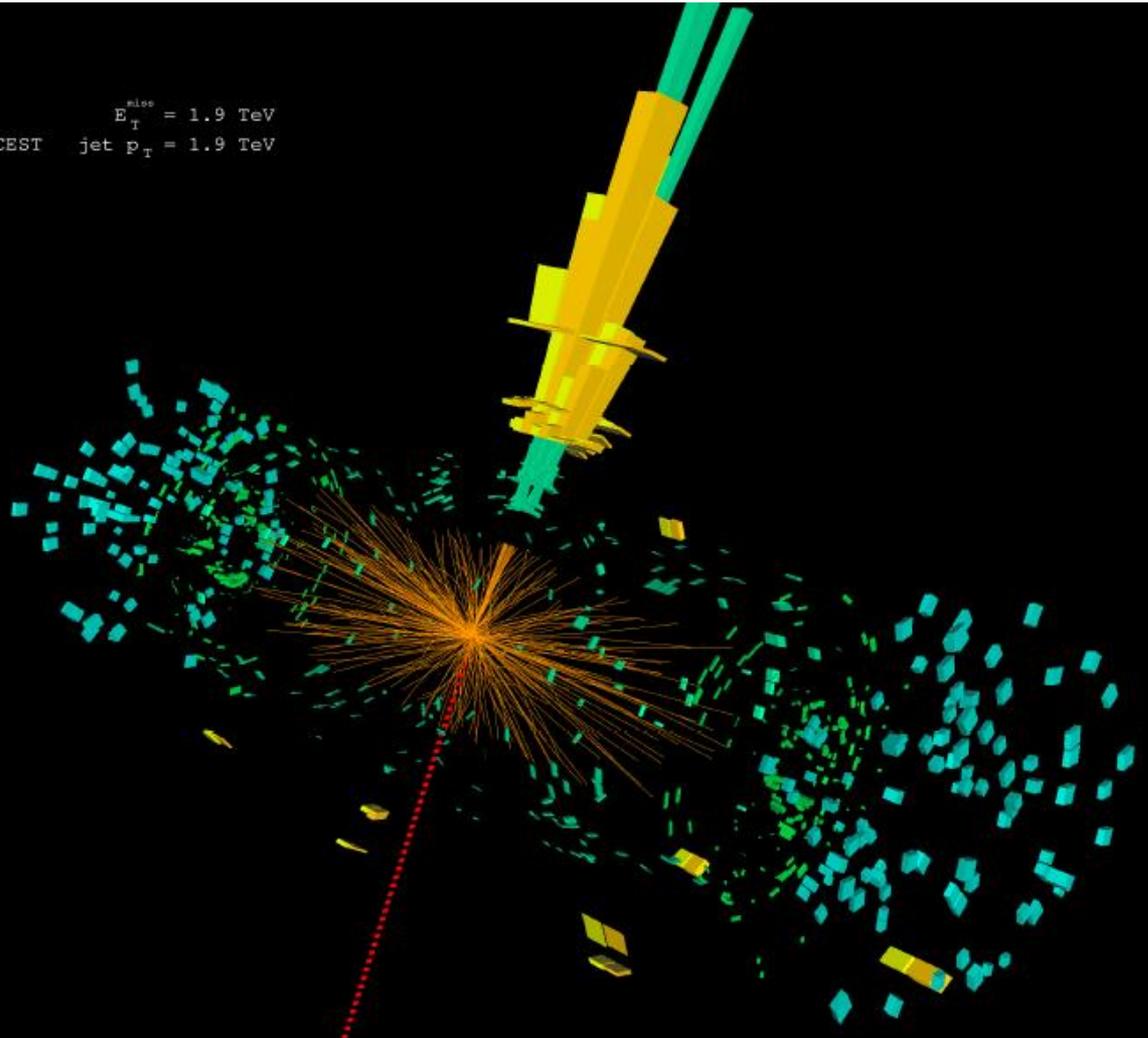
<https://atlas.cern/updates/atlas-feature/dark-matter>

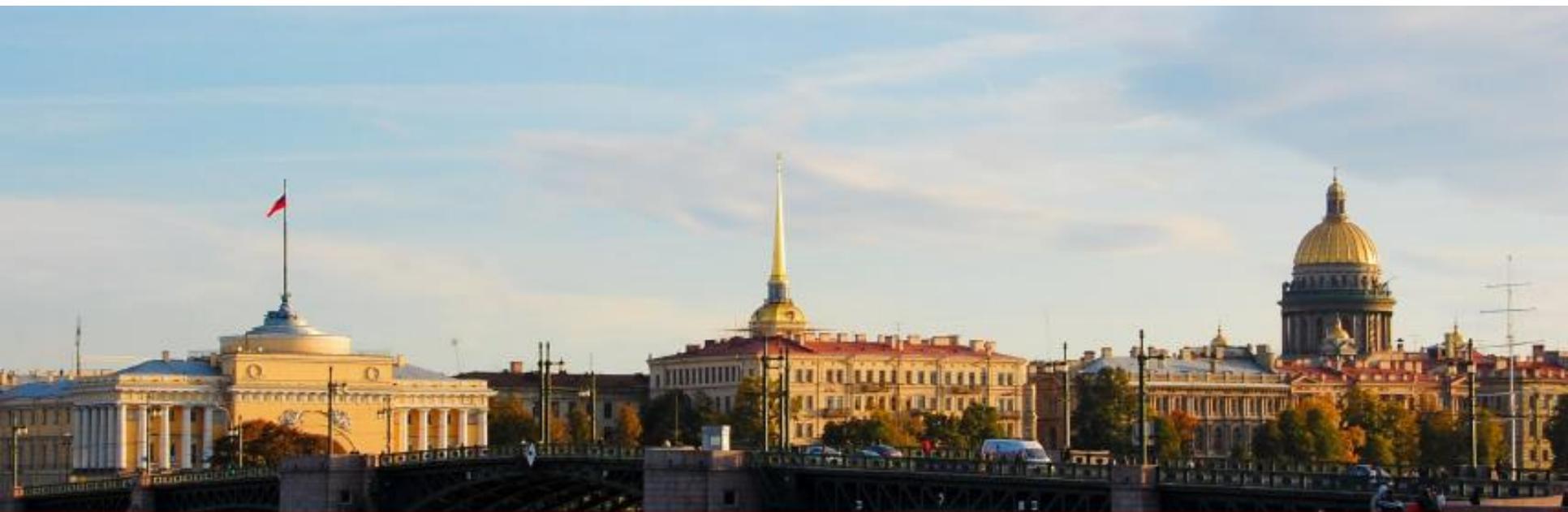
Темная материя: поиск моноджетов (одиночных струй)



Run: 337215
Event: 2546139368
2017-10-05 10:36:30 CEST

$E_T^{miss} = 1.9 \text{ TeV}$
jet $p_T = 1.9 \text{ TeV}$





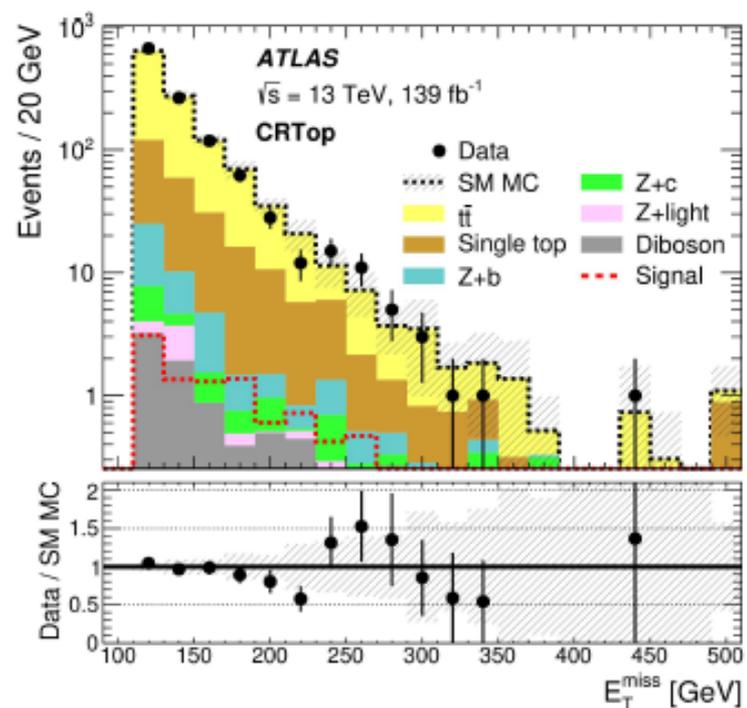
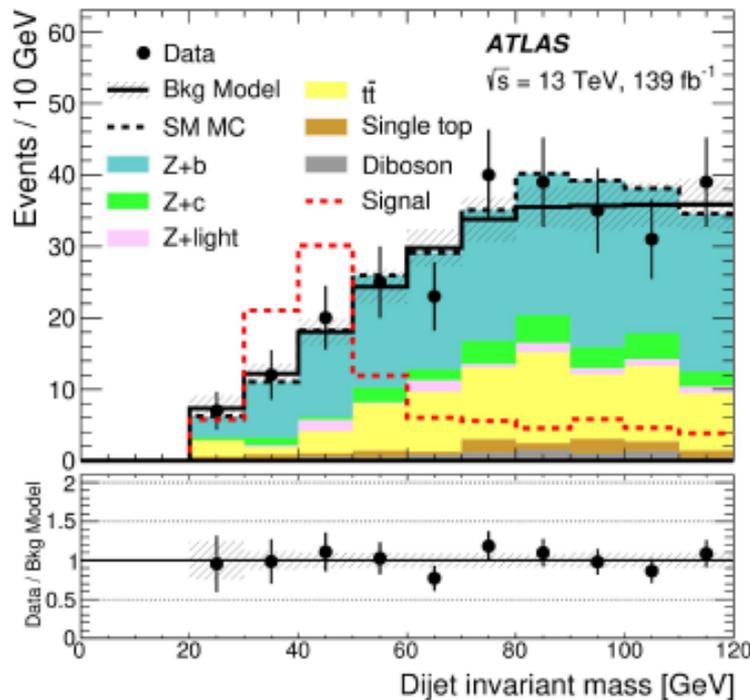
Recent Results from ATLAS

Chris Meyer on behalf of the ATLAS Collaboration



Higgs \rightarrow Neutralinos \rightarrow bb + missing energy

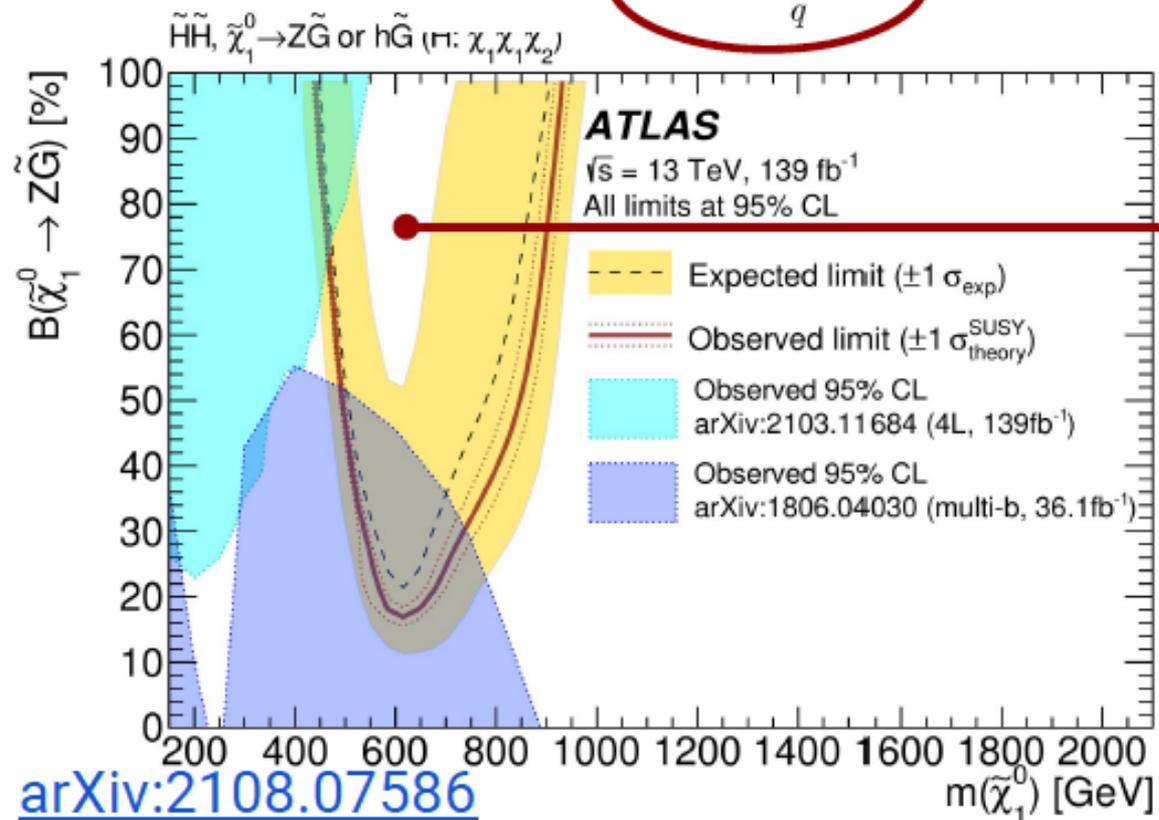
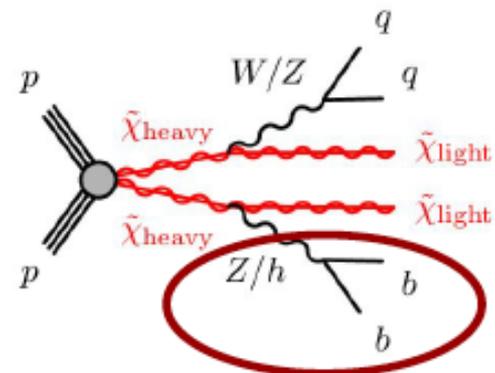
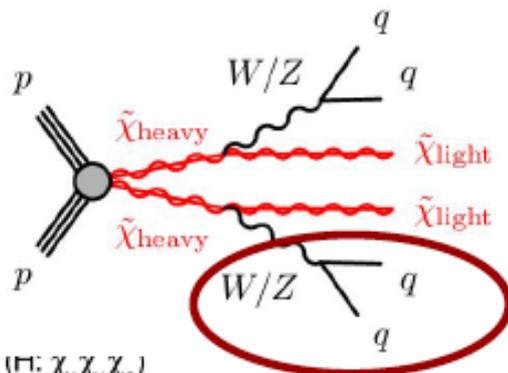
- Use ZH events to probe: $H \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow a \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow b\bar{b} \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$
 - a is a light pseudoscalar Higgs boson
 - $\tilde{\chi}_{1,2}^0$ are the two lightest neutralinos





Charginos and neutralinos in diboson events

- Searching 4-quark (from two bosons) events

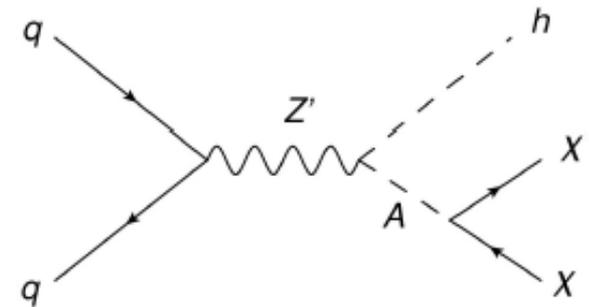
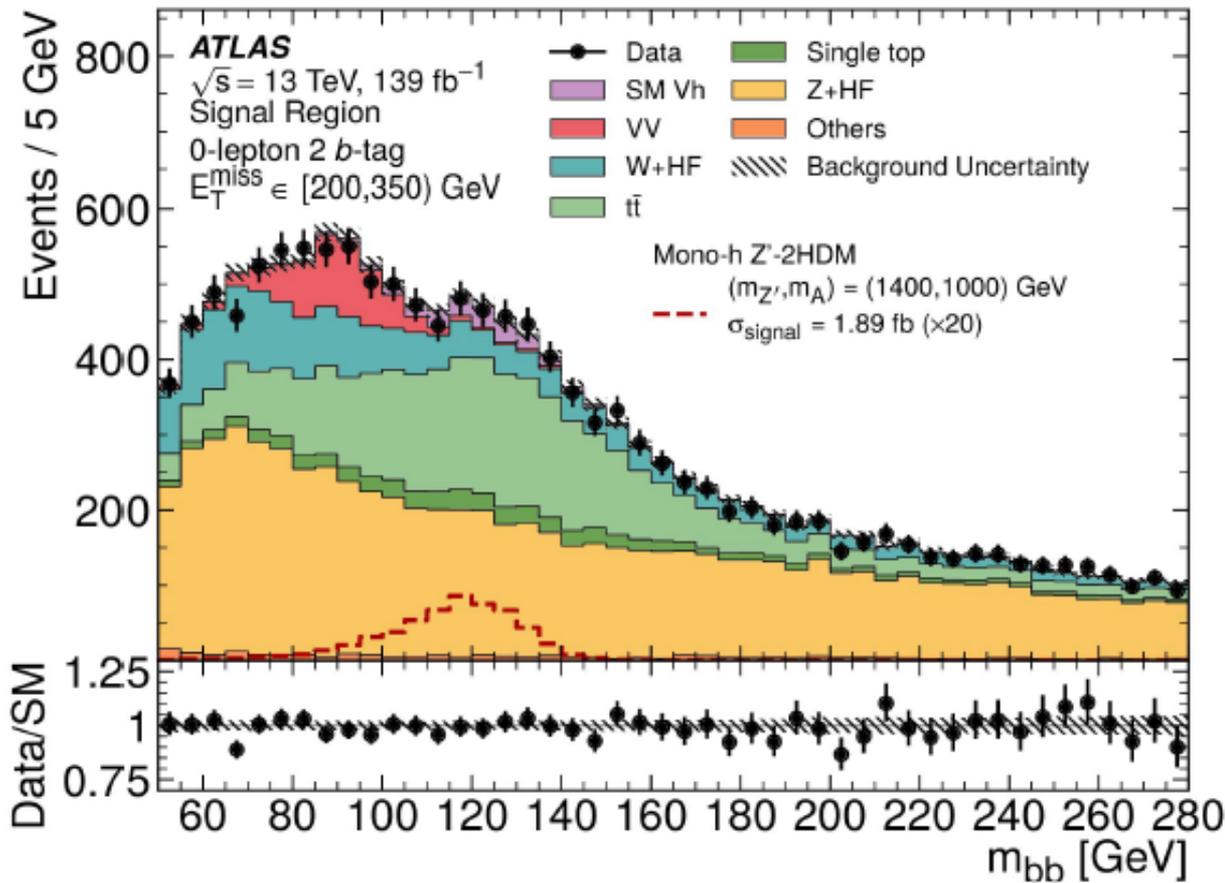


Excludes orthogonal phase space



Higgs to bb plus Dark Matter

- Impressive description of bb background



[arXiv:2108.13391](https://arxiv.org/abs/2108.13391)



Summary

- Broad program targeting many BSM scenarios
 - Including potential answers to B-physics and g-2 anomalies...
- New analyses exploiting full Run-2 dataset are either:
 - Out now, many shown here!
 - Soon to be released, stay tuned...
- So far no obvious signs pointing at one theory or another
 - BUT severely limiting phase space where new physics can hide!
- In the meantime, preparing for:
 - Run-3 of LHC \rightarrow approximately double data collected during Run-2
 - High-Luminosity LHC \rightarrow 10x increase

CMS Overview

Sergei Shmatov (JINR, Dubna)
for the CMS Collaboration

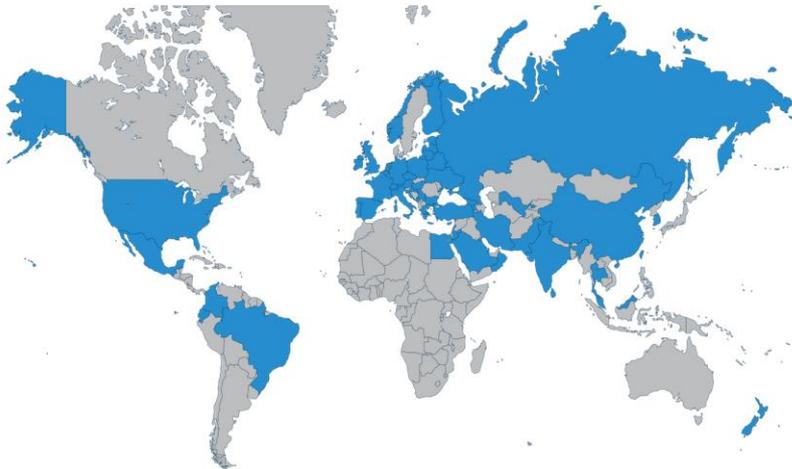
2942
PHYSICISTS
(1036 STUDENTS)

1065
ENGINEERS

281
TECHNICIANS

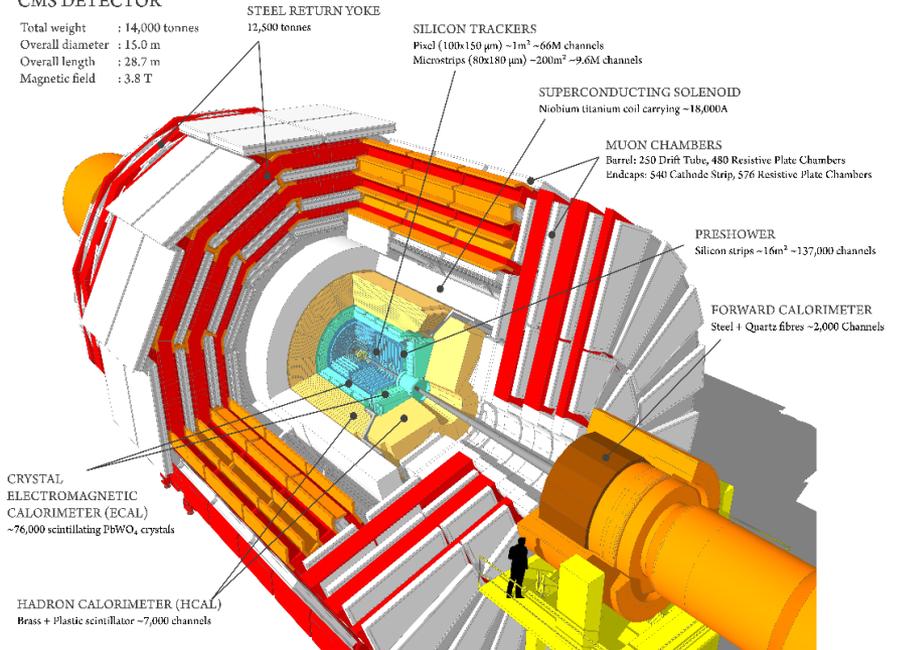
229
INSTITUTES

51
COUNTRIES &
REGIONS



CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



<https://cms.cern/>

St. Petersburg, 21-25 September, 2021

Higgs Mass Measurements

With the increased amount of data accumulated at the LHC the focus has shifted from observation to precision measurements of its properties

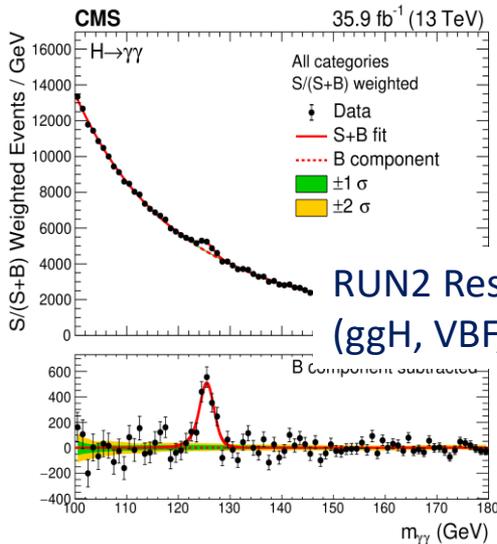
The couplings of the Higgs boson to other elementary particles can be predicted by the standard model of particle physics once its mass is known

$$h \rightarrow \gamma\gamma$$

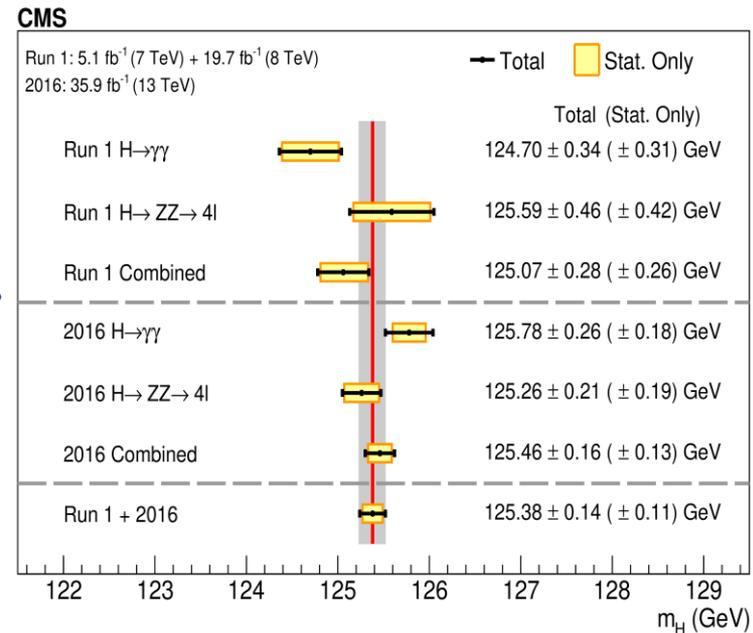
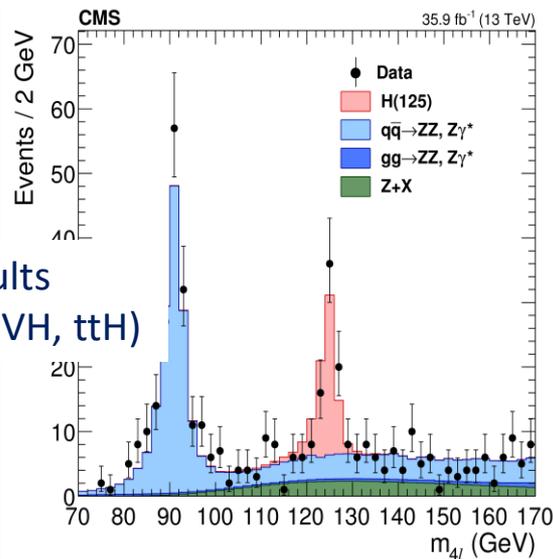
$$h \rightarrow ZZ \rightarrow 4l \quad (l = e, \mu)$$

Combination with RUN1 Results

$$m_h = 125.38 \pm 0.14 \text{ GeV}$$



RUN2 Results
(ggH, VBF, VH, ttH)



A refined detector calibration and new method to evaluate the systematic uncertainty
 $m_h = 125.78 \pm 0.26 \text{ GeV}$

A kinematic fit is performed using a mass constraint on the Z^0
 $m_h = 125.26 \pm 0.21 \text{ GeV}$

This is currently the most precise measurement of the mass of the Higgs boson (1.1%)

[PLB 805 \(2020\) 135425](#)

[PLB 805 \(2020\) 135425](#)

17.05.2022

CMS Overview

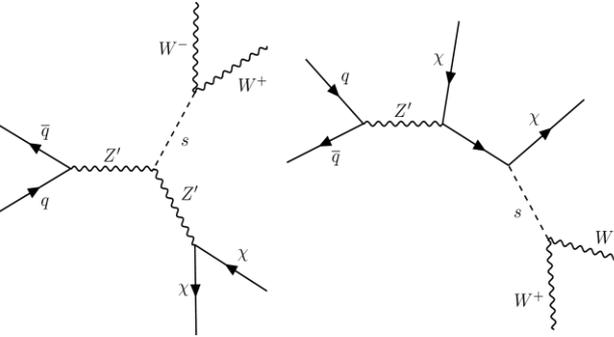
37

Uncertainty is still dominated by statistics

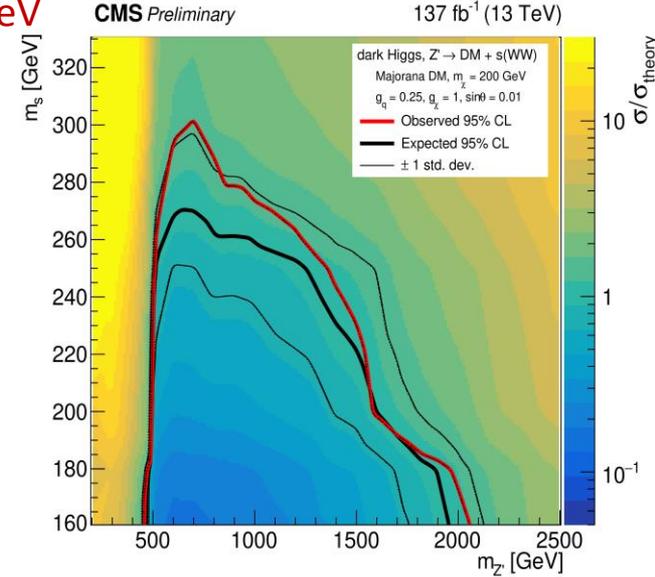
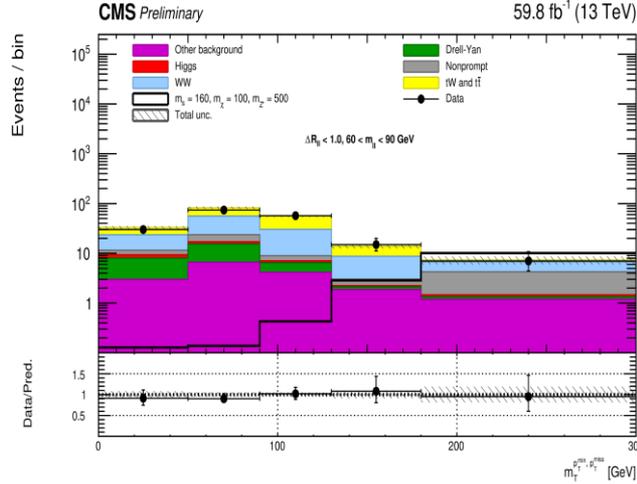
Example of Dark Matter Searches (2)

Dark matter with a dark Higgs boson

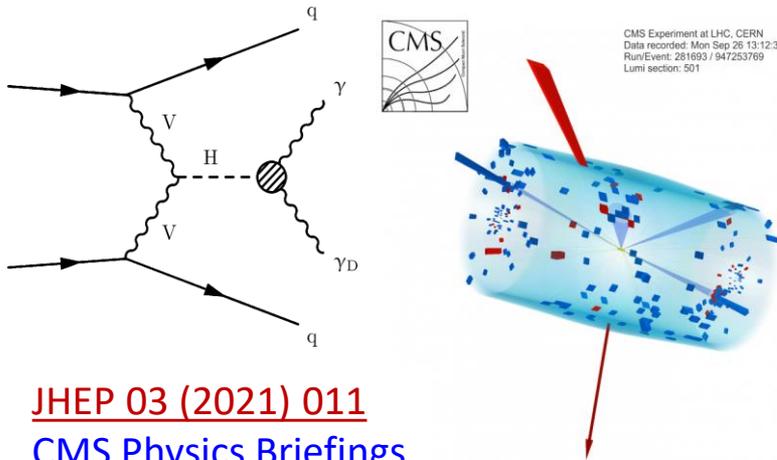
The most stringent limit is set for a $m_{DM}=150$ GeV, excluding m_s masses up to ≈ 300 GeV in a mass range $\approx 480 < m_{Z'} < 1200$ GeV, and up to $m_{Z'} \approx 2000$ GeV for a $m_s=160$ GeV



[CMS-PAS-EXO-20-013](#)
[CMS Physics Briefings](#)

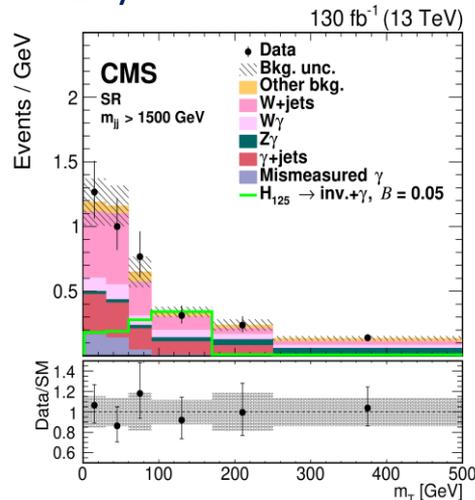


Dark matter with a dark photon ($h_{125} \rightarrow \gamma + \text{MET}$)



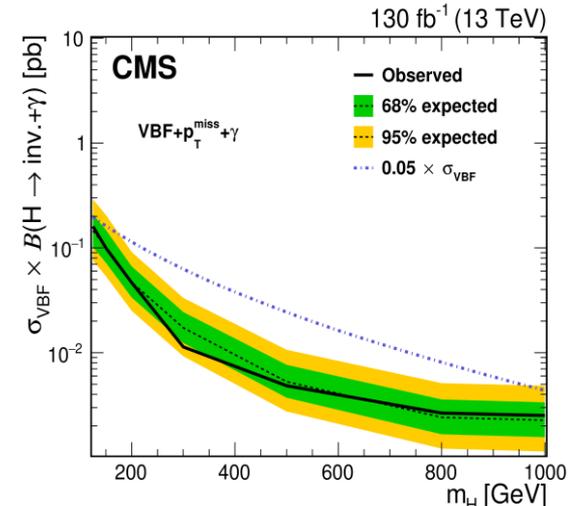
[JHEP 03 \(2021\) 011](#)
[CMS Physics Briefings](#)

17.05.2022

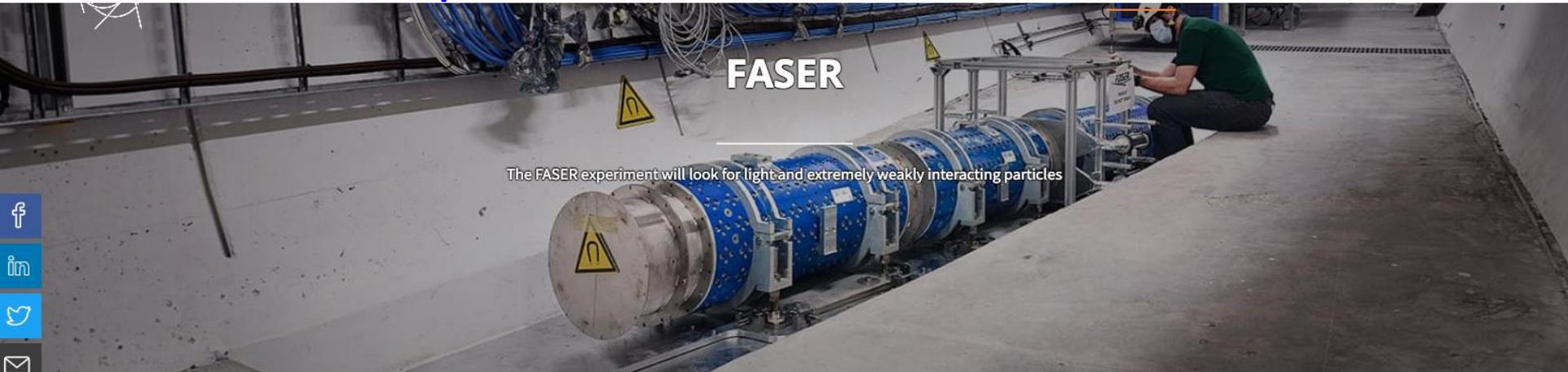


CMS Overview

Upper limit on $\mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv.} + \gamma)$ is 3.5 (2.8)%



Новый эксперимент FASER--

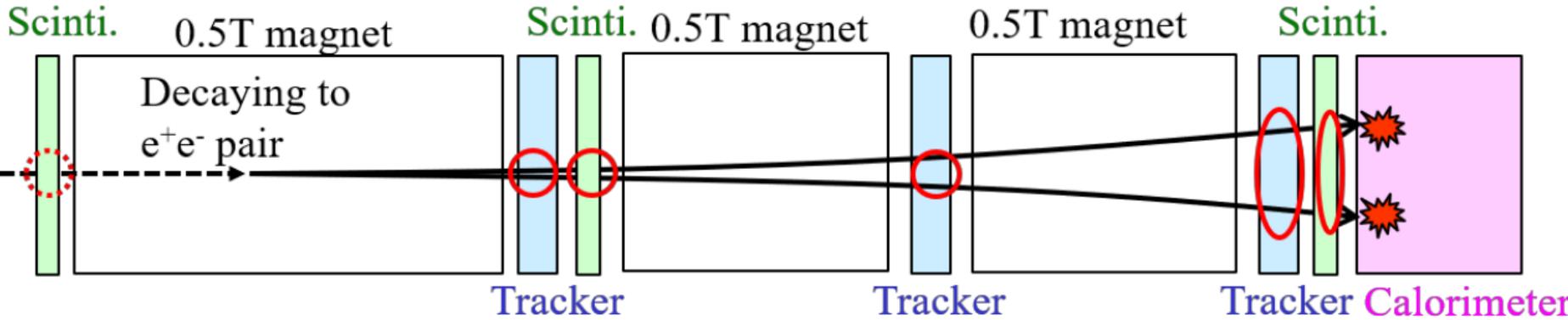
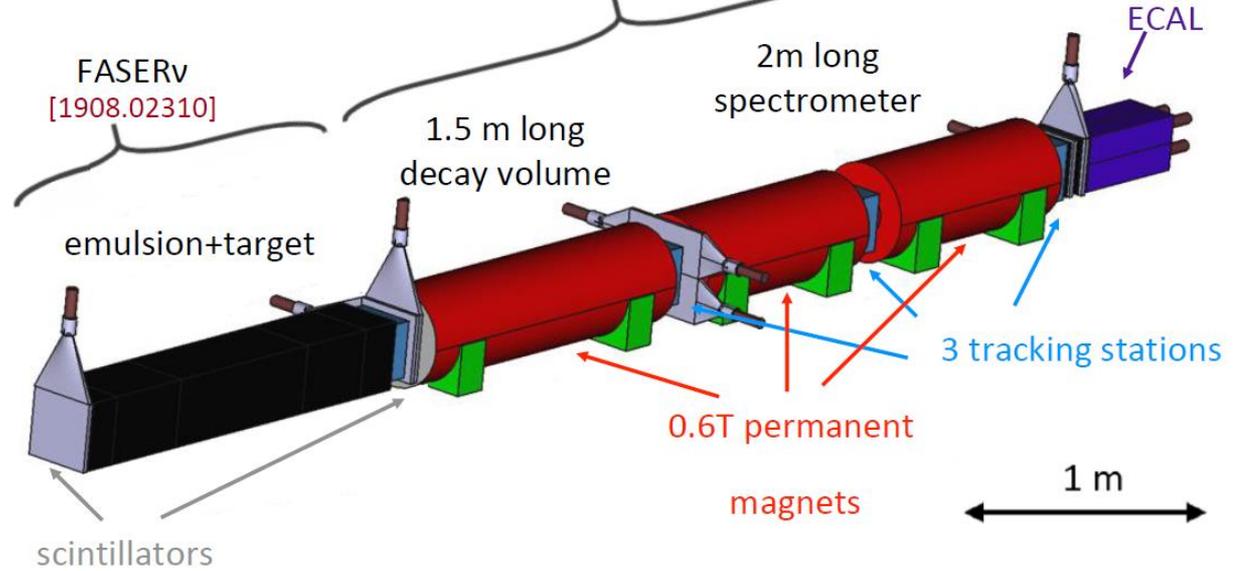


- Четыре основных детектора LHC, ALICE, ATLAS, CMS и LHCb, не подходят для обнаружения сигналов легких и слабо взаимодействующих частиц, вылетающих практически параллельно линии протонного пучка.
- Расположенный вдоль траектории пучка БАК , **в 480 метрах ниже детектора ATLAS, FASER** предназначен для обнаружения частиц, на которые распадаются такие легкие и слабо взаимодействующие частицы
- FASER также будет включать субдетектор под названием FASERv, специально разработанный для обнаружения нейтрино.
- FASERv состоит из эмульсионных пленок и вольфрамовых пластин, которые действуют как мишень и детектор для наблюдения за взаимодействием нейтрино.

<https://home.cern/science/experiments/faser>

FAZER

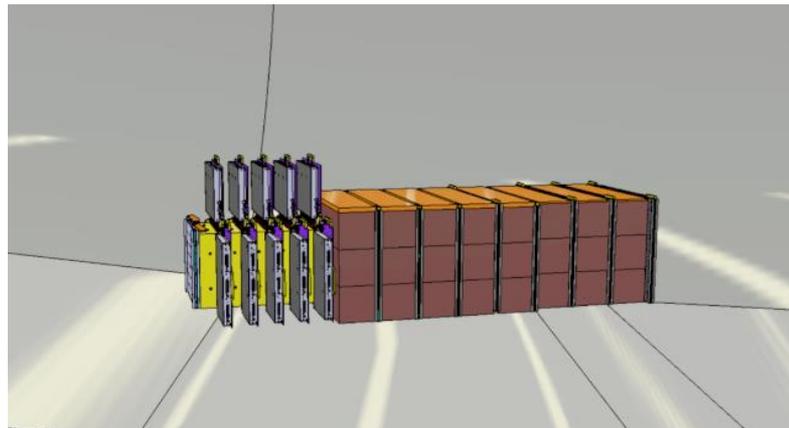
FAZER main detector
[LOI: 1811.10243, TP: 1812.09139]



The SND@LHC experiment

ЦЕРН одобрил новый эксперимент на БАК
**SND@LHC: Scattering and Neutrino Detector
at the LHC**

SND@LHC впервые проведет измерения нейтрино, генерируемых на коллайдере, и, таким образом, может открыть новый рубеж в физике нейтрино..



SND@LHC представляет собой компактный аппарат, состоящий из нейтринной мишени, за которой следует устройство для обнаружения мюонов, более тяжелых родственников электронов, образующихся при взаимодействии нейтрино с мишенью. Мишень изготовлена из вольфрамовых пластин, прослоенных эмульсионными пленками и электронными устройствами слежения. Эмульсионные пленки показывают следы частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино, а электронные устройства слежения обеспечивают отметки времени для этих следов. Вместе с мюонным детектором устройства слежения также измеряют энергию нейтрино.

SND@LHC также сможет искать новые частицы — очень слабо взаимодействующие частицы, которые не предсказываются Стандартной моделью физики элементарных частиц и могут составлять темную материю

SND@LHC будет расположен немного в стороне от линии пучка, на противоположной стороне ATLAS. Это расположение позволит SND@LHC обнаруживать нейтрино, испускаемые под небольшими углами по отношению к линии пучка, но большими, чем те, которые охватывает FASERv.

<https://home.cern/news/news/experiments/cern-approves-new-lhc-experiment>

Куда делось *антивещество*?

Детектор LHCb Большого адронного коллайдера (LHCb) специализируется на исследовании небольших различий между материей и антиматерией путем изучения типа частиц, называемых «кварками красоты» или «b-кварками».

Вместо того, чтобы окружать всю точку столкновения закрытым детектором, как это делают ATLAS и CMS, эксперимент LHCb использует серию поддетекторов для обнаружения в основном движущихся вперед частиц — тех, которые отбрасываются вперед при столкновении в одном направлении. Первый поддетектор установлен близко к точке столкновения, остальные следуют один за другим на протяжении 20 метров.

БАК создает множество различных типов кварков, прежде чем они быстро распадутся в другие формы. Чтобы поймать b-кварки, LHCb разработала сложные подвижные детекторы слежения, расположенные близко к траектории пучков коллайдера LHC.

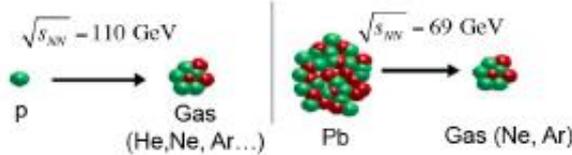
Около 1565 ученых, инженеров и техников из 20 стран составляют коллаборацию LHCb (март 2022 г.).

Детектор LHCb массой 5600 тонн состоит из переднего спектрометра и планарных детекторов. Он имеет длину 21 метр, высоту 10 метров и ширину 13 метров и находится на глубине 100 метров недалеко от города Ферне-Вольтер, Франция

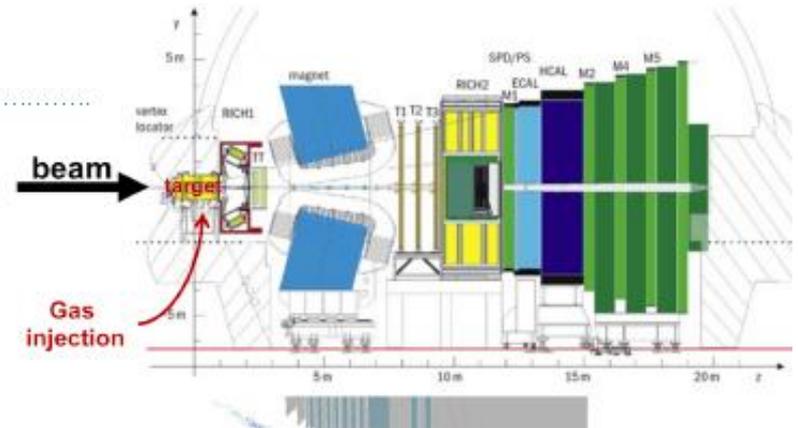


SMOG

Fixed target mode



- SMOG: System for Measuring Overlap with Gas
- A noble gas (He, Ne, Ar) at $\sim 2 \times 10^{-7}$ mbar pressure injected into the LHC vacuum around the LHCb interaction region



LHCb measurements help to understand possible signatures of dark matter presence in the Universe



New measurements in fixed-target collisions at LHCb



Jiayin Sun for the LHCb collaboration
INFN Cagliari



LHCb and astroparticle physics

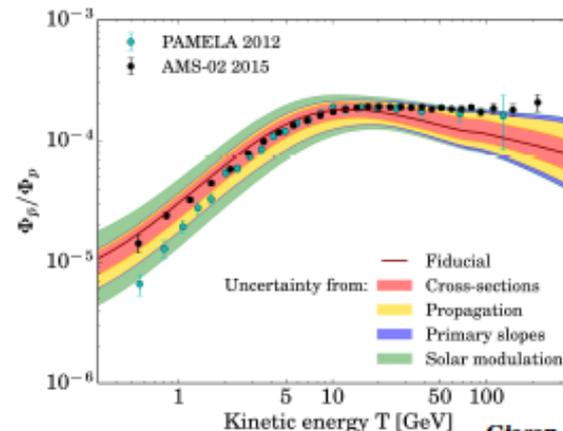
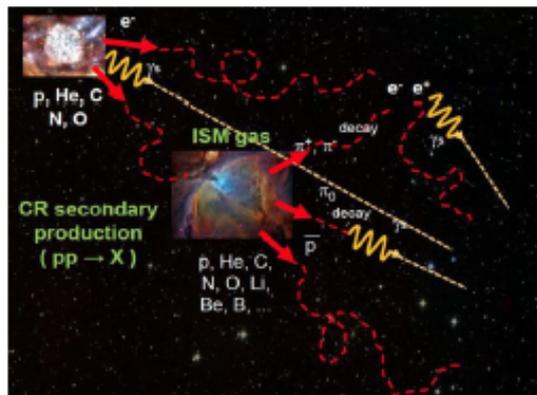
The precision era reached in astroparticle physics with a variety of probes requires improved understanding of interactions of cosmic rays during their propagation.

LHCb can contribute with novel production studies, exploiting two distinctive features:

- the unique coverage of **forward geometry** at the LHC
- the unique possibility to use LHC beams on **fixed targets**

Most notably:

- ➡ **charm** in pp , pPb and fixed-target ➡ understanding background to Neutrino astronomy
- ➡ production studies (**antiprotons** and more) in **proton-helium collisions**
 - ➡ secondary CR production in the ISM



Glesen et al., JCAP 1509, 023

AMS-02 \bar{p}/p data vs model for secondary production in 2015

- ➡ identified hadrons in pp , pPb and **proton-gas collisions** (gas=He, Ne, Ar)
 - ➡ help models of extensive showers in the atmosphere

Вместо заключения. Физическая мотивация будущих исследований на коллайдерах

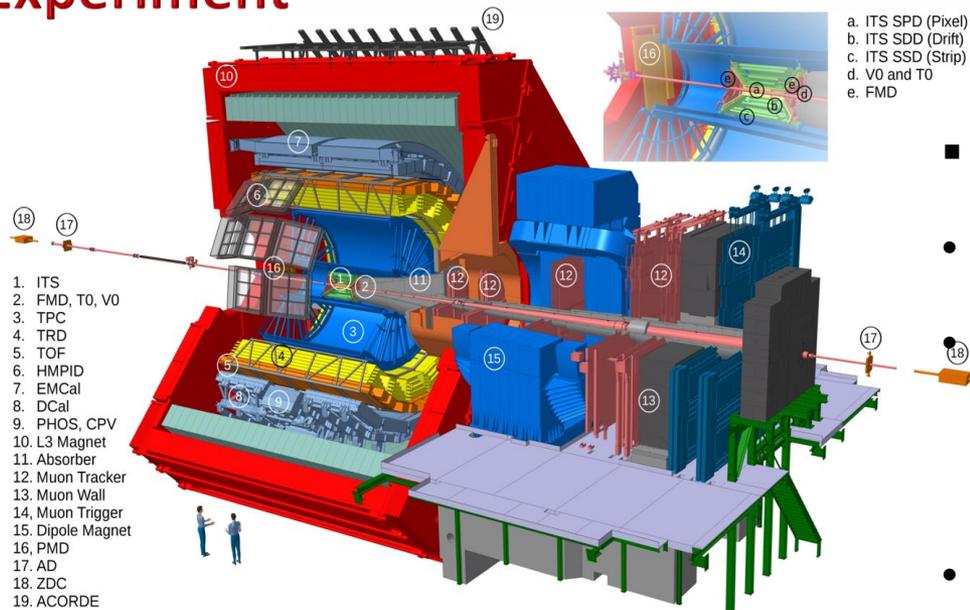
- 2012-2014: SM становится стандартной теорией
- Но это не конец физики!
- Существует нечто за пределами Стандартной модели. Этому есть много экспериментальных доказательств, например:
 - космологическая темная материя
 - барионная асимметрия Вселенной
 - ненулевые, но очень малые массы нейтрино
 - гравитация...
- Новая физика при больших массах? Или при меньших константах связи? Или и то и другое ?
- Единственный способ узнать - следовать историческому подходу:
 - ➔ Прямые поиски новых тяжелых частиц
 - Нужны коллайдеры с *большими энергиями*
 - ➔ Поиск следов новой физики по свойствам W , Z , top и Higgs
 - Нужны измерения с *беспрецедентной точностью*

3) ALICE: исследования редких событий рождения частиц с тяжелыми кварками



ALICE

A Large Ion Collider Experiment

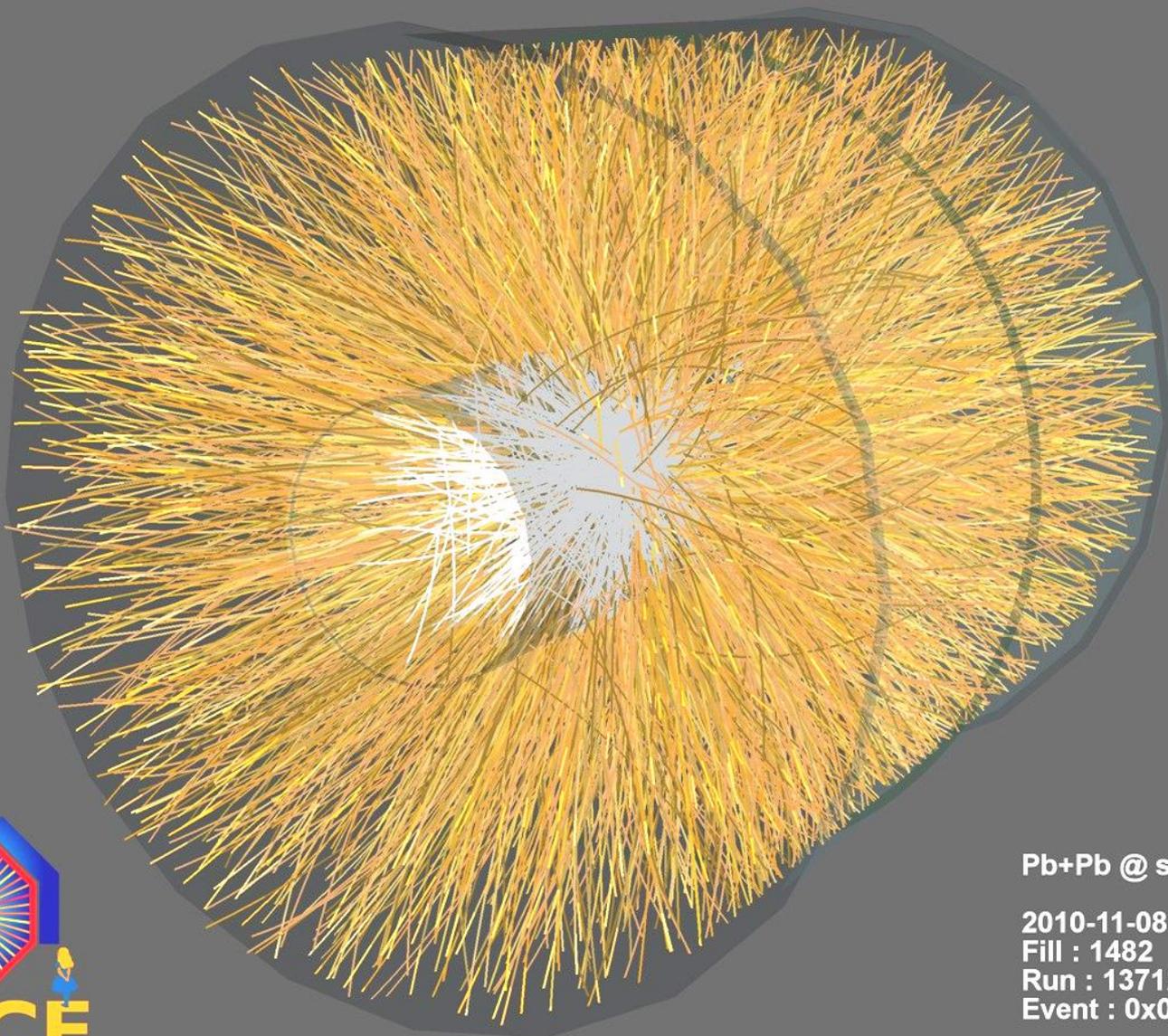


- Центральный трекер: $-0.9 < \eta < 0.9$
- Мюонный спектрометр: $-4.0 < \eta < -2.5$
- Передние детекторы: триггер, центральность, светимость, плоскость реакции
- Работа в Run 1 и Run 2
- Регистрация и идентификация частиц и PID в большом кинематическом диапазоне
- Вершинная реконструкция с высоким разрешением

Run 1 (2009 – 2013)
Pb-Pb @ $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
p-Pb @ $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV
pp @ $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, 7, 8$ TeV
NUCLEUS 2020

Run 2 (2015 – 2018)
Pb-Pb @ $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV
Xe-Xe @ $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV
p-Pb @ $\sqrt{s_{NN}} = 5.02, 8.16$ TeV
pp @ $\sqrt{s} = 5, 13$ TeV

W.H.Trzaska



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

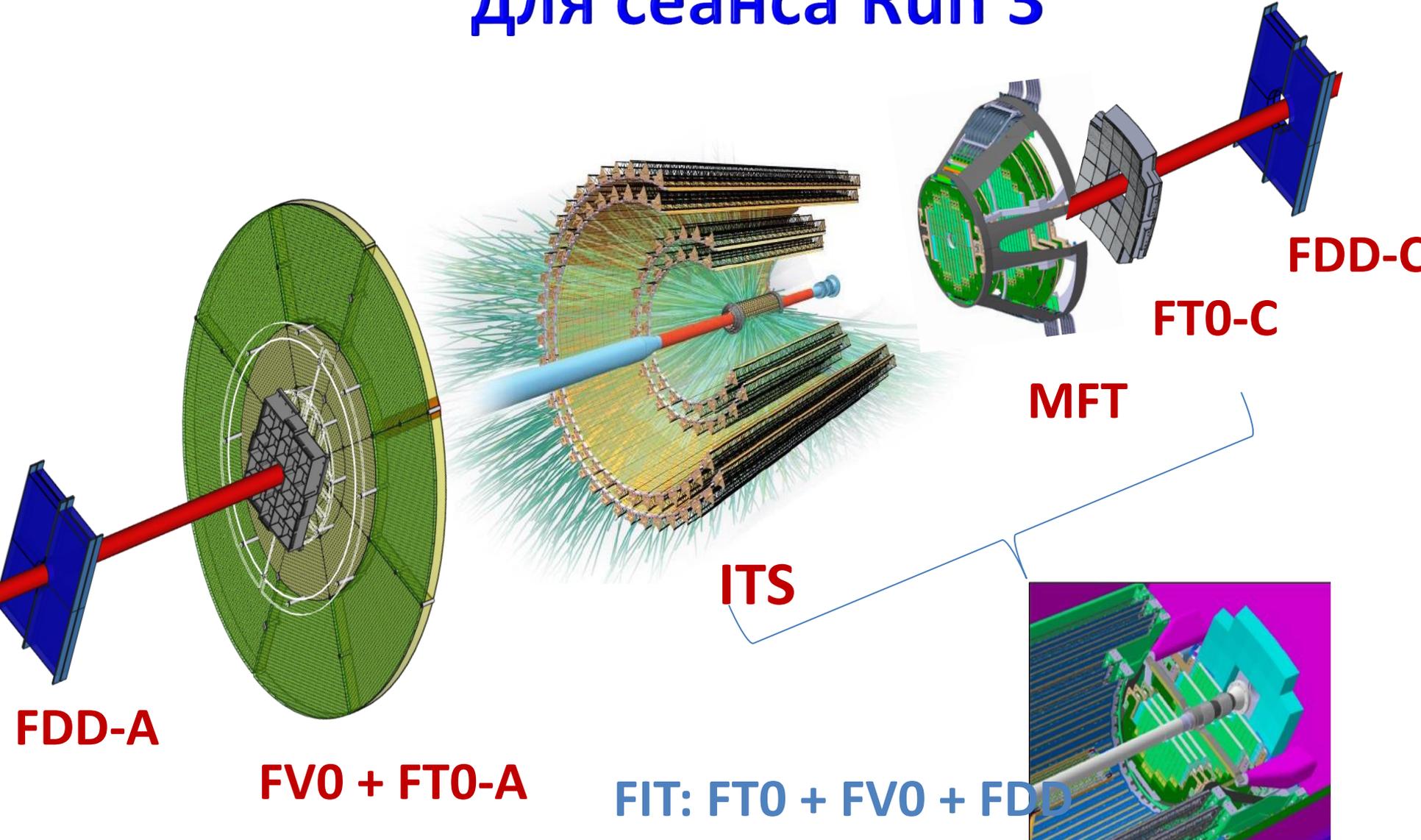
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693

Новые детекторы ALICE для сеанса Run 3

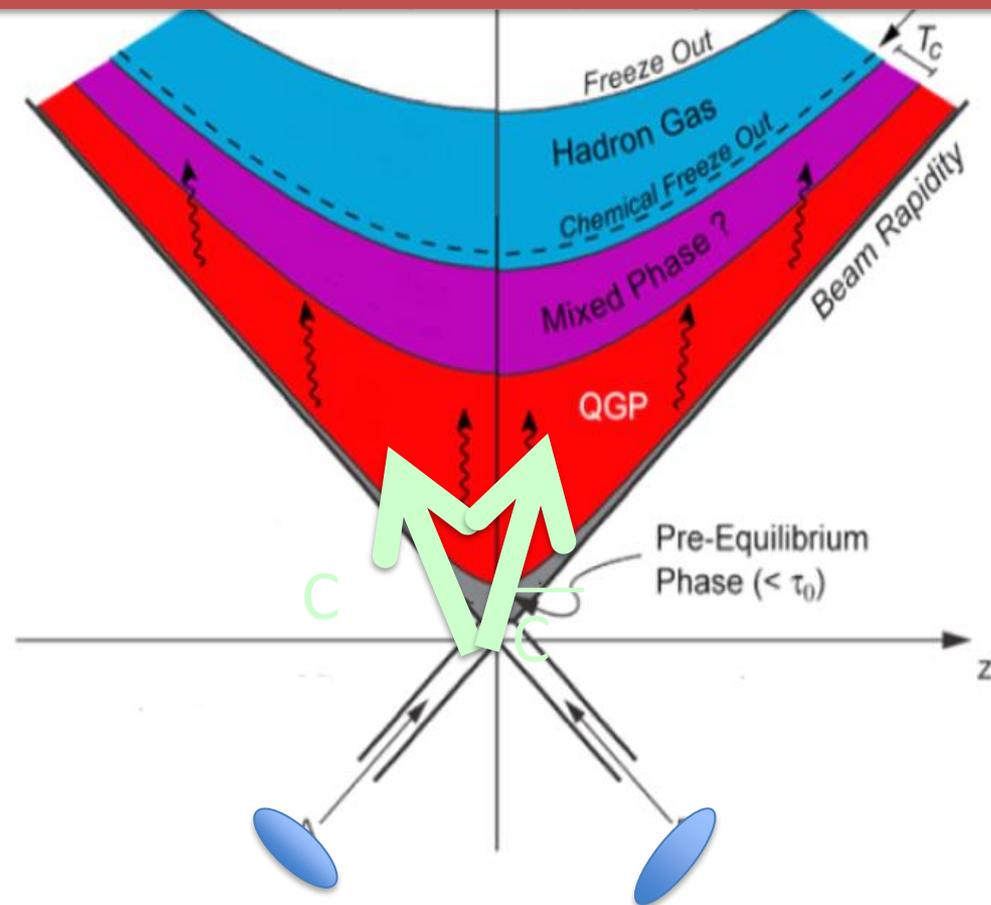


Модифицированную Время-пролетную камеру везут к шахте Р2 (август 2020)



Return of the upgraded TPC, 4 August 2020

- Изучение ранних стадий в столкновениях тяжелых ионов
- Понимание механизма рождения чармония
- Зонд для изучения термализация КГП:
 - измерения потока тяжелых кварков;
 - потеря энергии очарованными кварками как доказательство их термализации,
 - ...и т.д.
- Микроскопическое понимание транспортных свойств среды

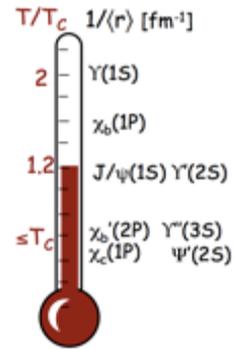


[1] [T. Matsui and H. Satz](#), Phys. Lett. B 178 (1986) 416.

[2] [Helmut Satz](#), arXiv: 1303.3493

[3] [Berndt Müller](#), arXiv:1309.7616

- Фазовый переход в деконфайнментный КГП ожидается при $T_{\text{крит}} \sim 150$ МэВ
- Энергии связи основного состояния чармония и боттония составляют $\sim 500 - 1000$ МэВ.
- Время формирования составляет $< \sim 0,1$ фм/с (в “Thermometer” зависимости от pT)
- Большие массы (масса $J/\psi = 3097$ МэВ/ c^2 , масса $D_0 = 1864$ МэВ/ c^2) и значительно выше температур КГП, достигнутых в столкновениях Pb-Pb на
- **These rare probes are a nice tool to study the formation and evolution of the QGP!**



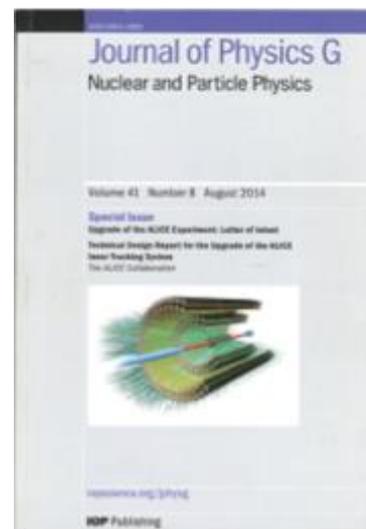
“Thermometer”
for QGP [1]

[1] Helmut Satz, Nucl.Phys.A783:249-260,2007; <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609197>

[2] Ágnes Mócsy, 2009, Eur.Phys.J., C61, 705–710; arXiv:0811.0337

Области интереса:

- Взаимодействие тяжелых кварков в среде КХД, образующейся в АА-столкновениях
- Состояния кваркония, плавление и регенерация кваркония в КГП
- Реальные и виртуальные фотоны, маломассивные (тепловые) дилептоны – излучение КГП и восстановление киральной симметрии при $\mu_B = 0$
- Гашение струй – томография QGP
- Высокоточные измерения выходов легких ядер и гиперядер и экзотических ядерных состояний



ALICE: от странности – к очарованию

Example: D^0 meson

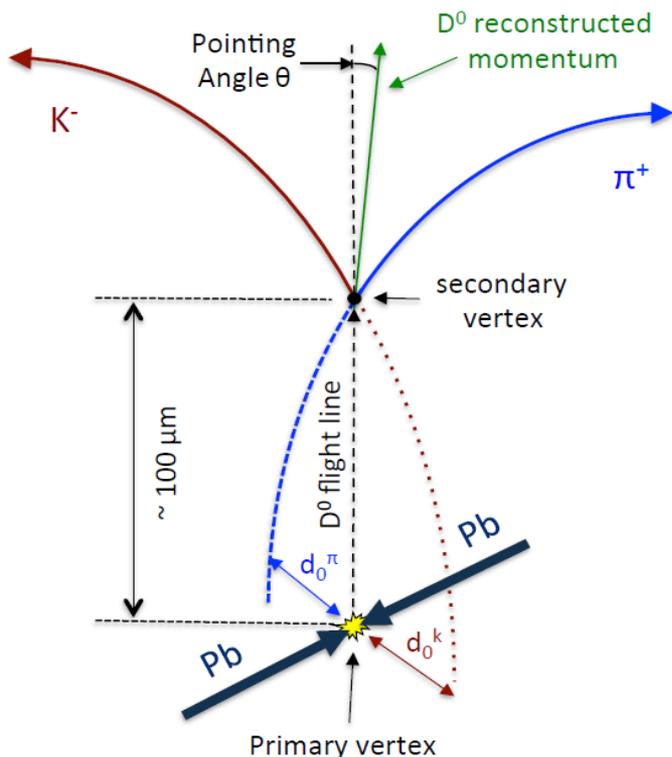


Рисунок 4 – Образование D^0 -мезона в результате столкновения ядер свинца и его дальнейший распад

Большой интерес в рамках исследования кварк-глюонной плазмы представляют **очарованные и прелестные частицы**.

Это есть **частицы, имеющие в своём составе очарованные (с-кварк) и прелестные (b-кварк) кварки, соответственно**.

К очарованным частицам относятся, например, D^0 мезон (кварковый состав: cu) и Λ_c^+ барион (кварковый состав: udc).

Существует два открытых основных вопроса, касающихся взаимодействия тяжёлых ароматов в Кварк-Глюонной плазме (КГП):

1. Термализация и адронизация тяжёлых кварков в среде.
2. Потери энергии тяжёлыми ароматами в среде их массовые зависимости.

➤ **Вызов: малые расстояния до вершин распада ~ 100 мкм !**

Matter induced changes in the yield of quarkonia

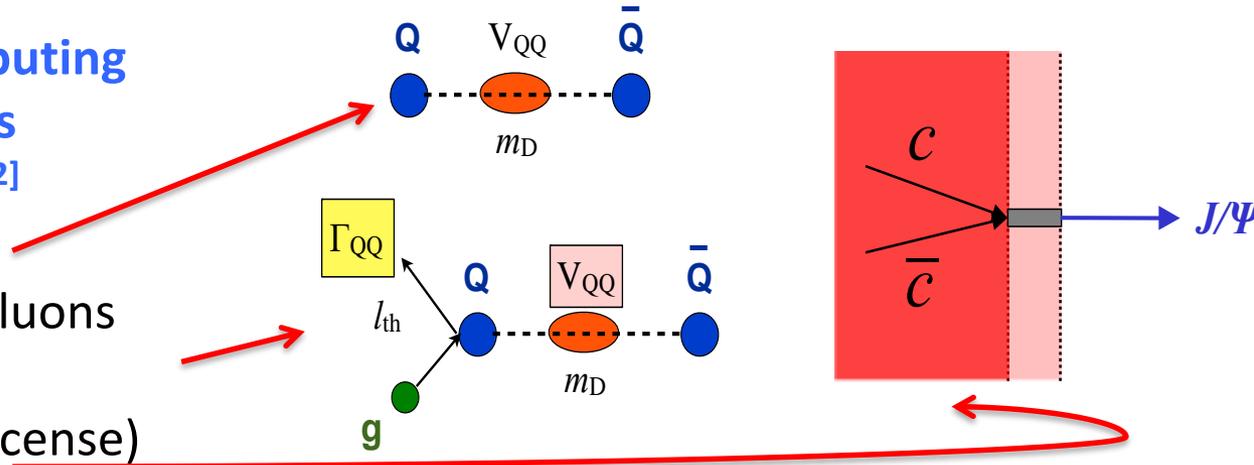
1986: Charmonium suppression in AA collisions [1]

- All charmonia are produced before QGP formation
- Suppression takes place in QGP
- Some charmonia may survive beyond T_c

2013: Mechanisms contributing to matter induced changes in the yield of quarkonia [2]

- Color screening
- Ionization by thermal gluons and
- **Recombination** (coalescence)

is a **competing mechanism** with screening



Challenges

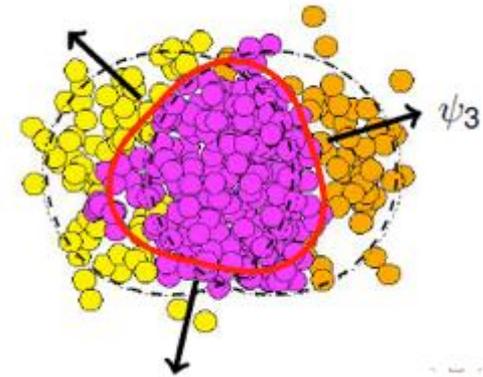
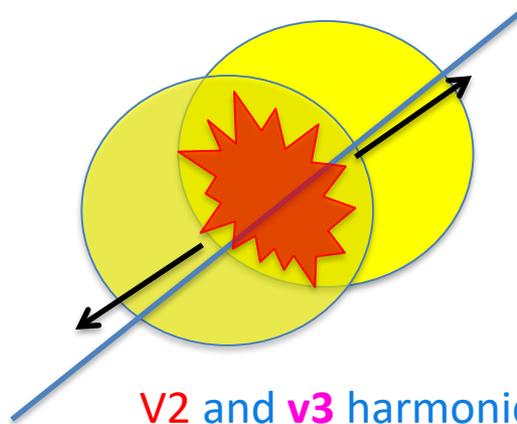
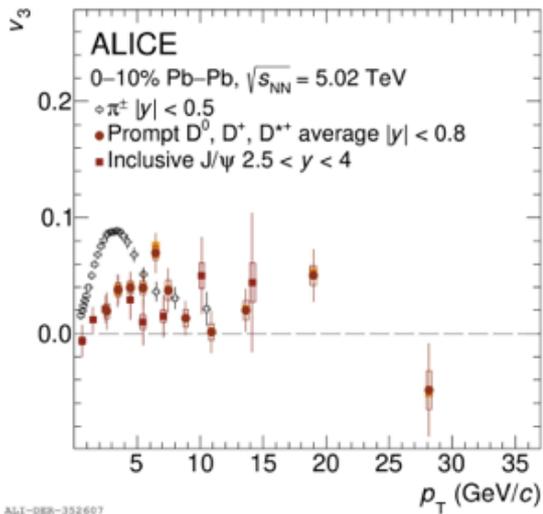


[1] H.Satz and T.Matsui, Phys.Lett.B178(1986)416

[2] Berndt Müller, arXiv:1309.7616

D meson **triangular** flow similar to J/psi

Some interesting results



v_2 and v_3 harmonic anisotropic flows

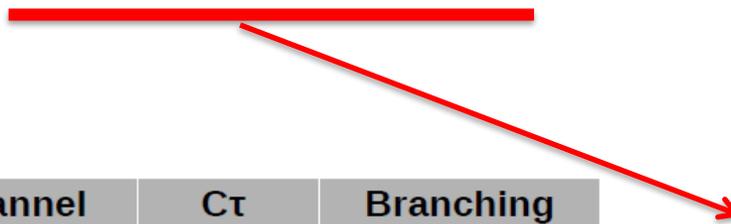
JHEP 09 (2018) 006;
 arXiv 2005.11131;
 arXiv 2005.14518

➤ **D mesons take part in the flow, i.e. participate in the collective motion?**

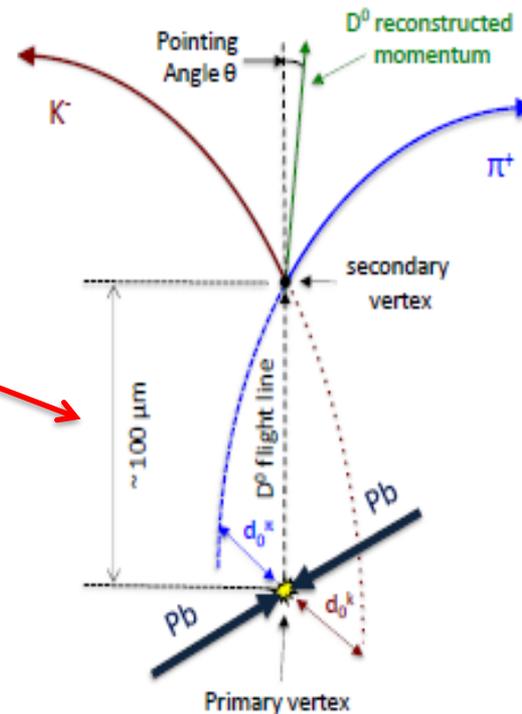
➤ **Challenge-1: Короткое время жизни D-мезонов** ($\langle \tau \rangle = 410.1 \pm 1.5 \times 10^{-15} \text{ s}$ [1])

Малая средняя длина распада!

Реконструкция по каналам адронных распадов: $c\tau \sim 100 \mu\text{m}$ (!)



Meson	Decay Channel	$c\tau$	Branching Ratio
D^0	$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$	$122.9 \mu\text{m}$	$(3.91 \pm 0.05)\%$
D^0	$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	$122.9 \mu\text{m}$	$(8.14 \pm 0.20)\%$
D^+	$D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+$	$311.8 \mu\text{m}$	$(9.2 \pm 0.25)\%$
D_s^+	$D_s^+ \rightarrow K^+ + K^- \pi^+$	$149.9 \mu\text{m}$	$(5.50 \pm 0.28)\%$
D^{*+}	$D^{*+} \rightarrow D^0 + \pi^+$	-----	$(61.9 \pm 2.9)\%$



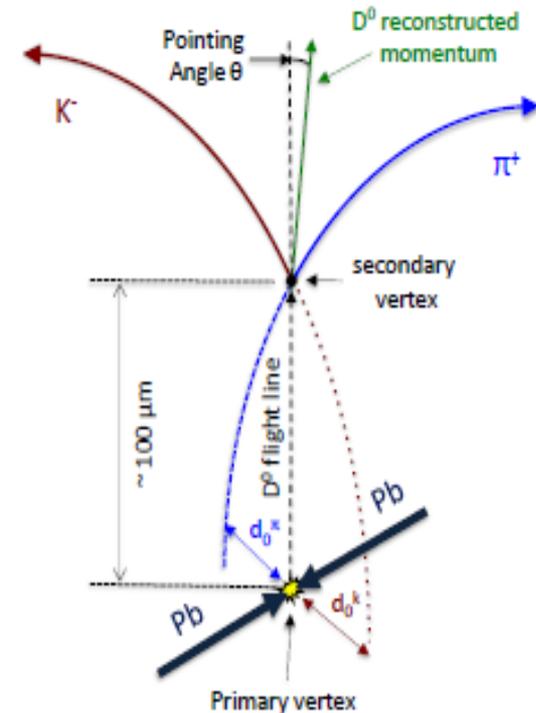
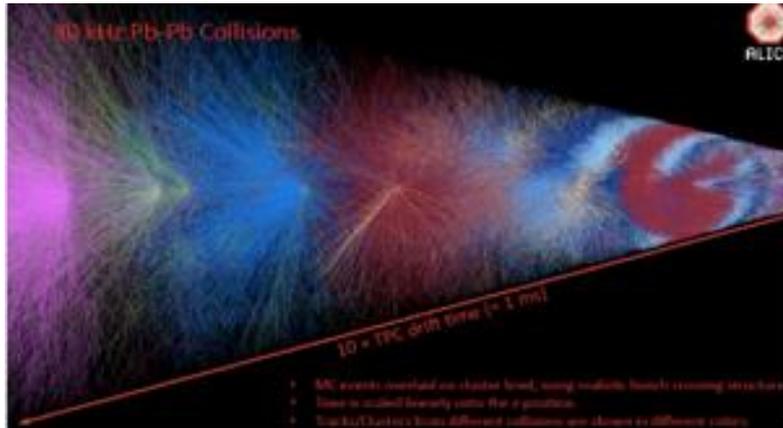
Vito Manzari,
LXV Conf.Nucl.Phys.,
29.06-03.07.2015, SPb

[1]PDG, PL B667, 1 (2008)



Challenges for open charm measurements

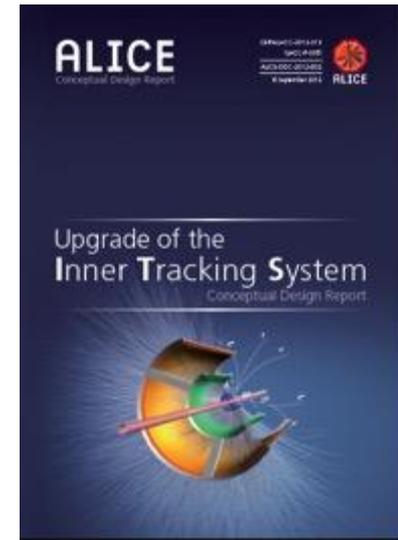
- **Challenge-2:** требуется высокая эффективность для регистрации частиц в случае редких процессов.
- Диапазон поперечных импульсов должен быть как можно более полным, в частности, вплоть до очень малых значений.
- **Challenge-3:** требуются быстрые детекторы и непрерывное считывание[1] для обеспечения статистики



[1] David Rohr et al., arXiv:1811.11481

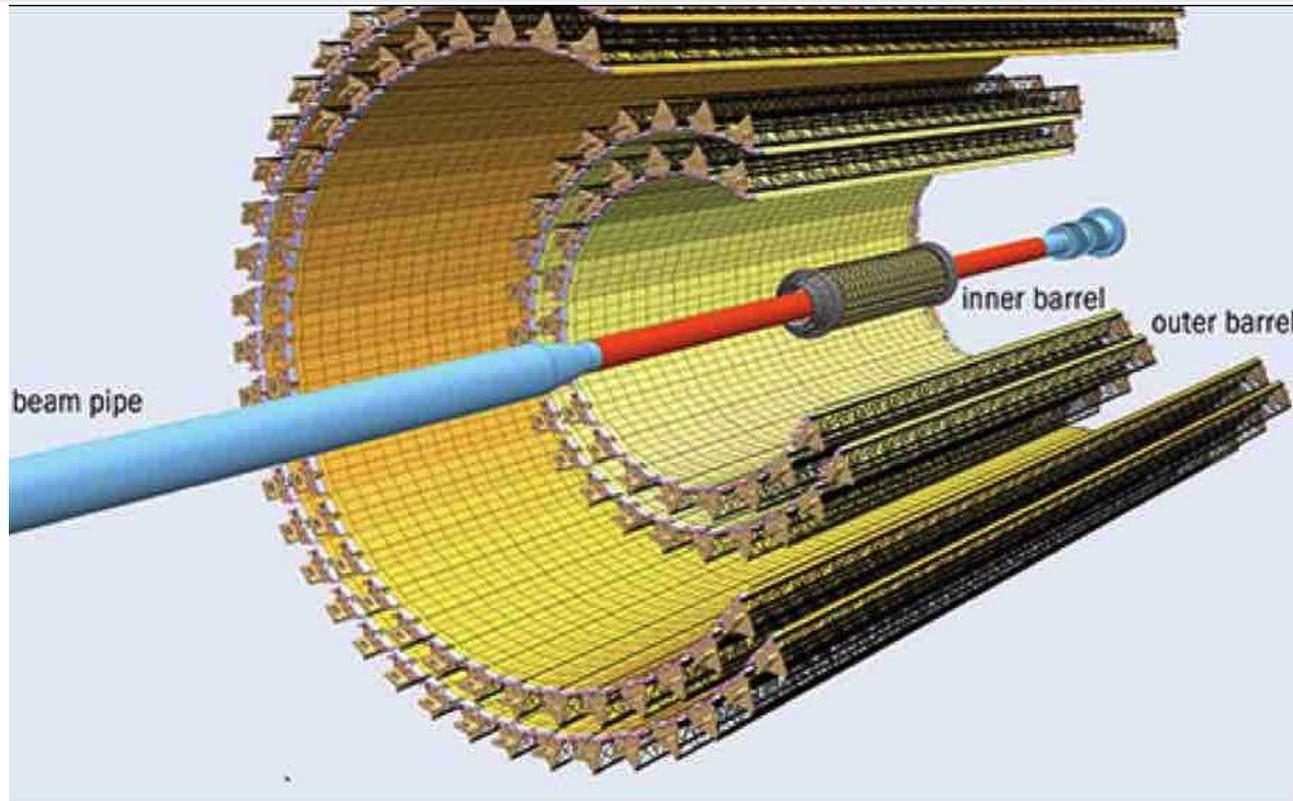
Summary of challenges and requirements:

- Improve impact parameter resolution factor of ~ 3 in $r-\phi$ (z) at 500 MeV/c)
- First layer closer to interaction point: $r_0 = 39$ mm
→ **22 mm**
- Smaller beam pipe radius: **29 mm → 18.2 mm**
- Smaller pixel size: **50 μ m x 425 μ m**
→ **28 μ m x 28 μ m**
- Improve tracking efficiency and p_T resolution at low p_T : Increase the number of layers **6 → 7**
- Easier maintenance – all services only from on one side!
- Fast readout : 1 kHz → 50 kHz in Pb-Pb, 200 kHz in pp
- Low-material budget (< 0.35% X_0 for 3 inner layers)
- **ITS-2 : New, high-resolution, low-material, Inner Tracker based on CMOS sensors!**



- **CDR: Endorsed by LHCC in Sept 2012**
- **ITS Upgrade TDR: in March 2014**

Концепция новой Внутренней трековой системы ITS-2



- A schematic of the upgraded inner tracking system (ITS-2) showing 7 layers of the MAPS layers, carbon-fibre supports (black) and the beam pipe in the central region (orange).
- **12,5 Gpixel camera!**

Концепция новой Внутренней трековой системы ITS-2

Based on high resistivity epi layer MAPS

3 Inner Barrel layers (IB)
4 Outer Barrel layers (OB)

Radial coverage: 21-400 mm

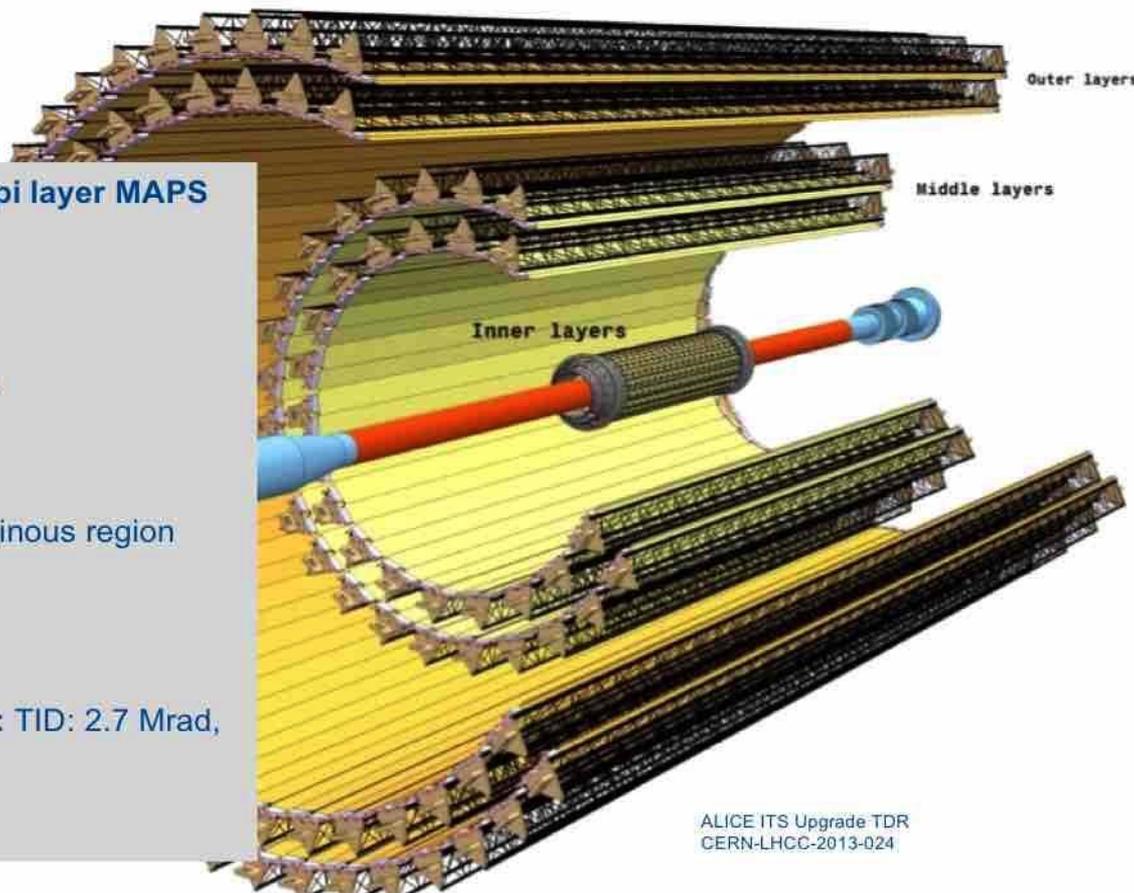
~ 10 m²

$|\eta| < 1.22$ over 90% of the luminous region

0.3% X_0 /layer (IB)
0.8 % X_0 /layer (OB)

Radiation level (IB, layer 0): TID: 2.7 Mrad,
 1.7×10^{13} 1 MeV n_{eq} cm⁻²

Installation during LS2



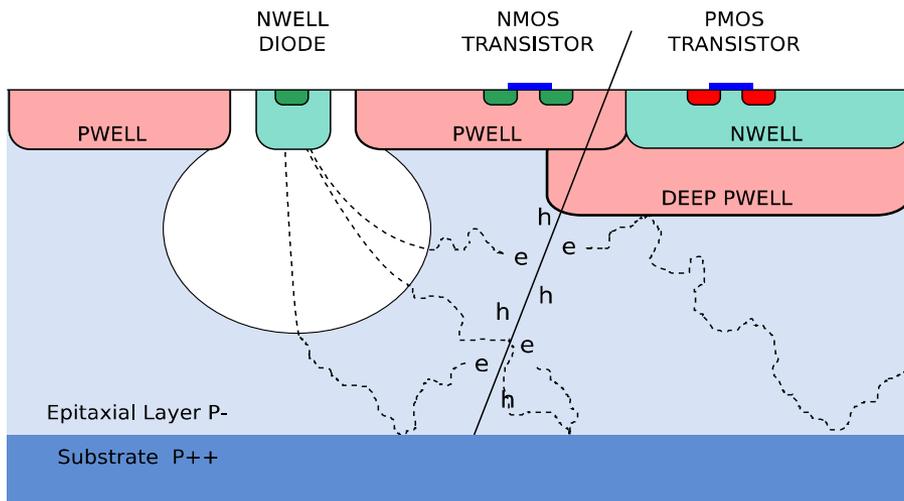
ALICE ITS Upgrade TDR
CERN-LHCC-2013-024

➤ Based on Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)



TowerJazz 0.18 μm CMOS Imaging Process

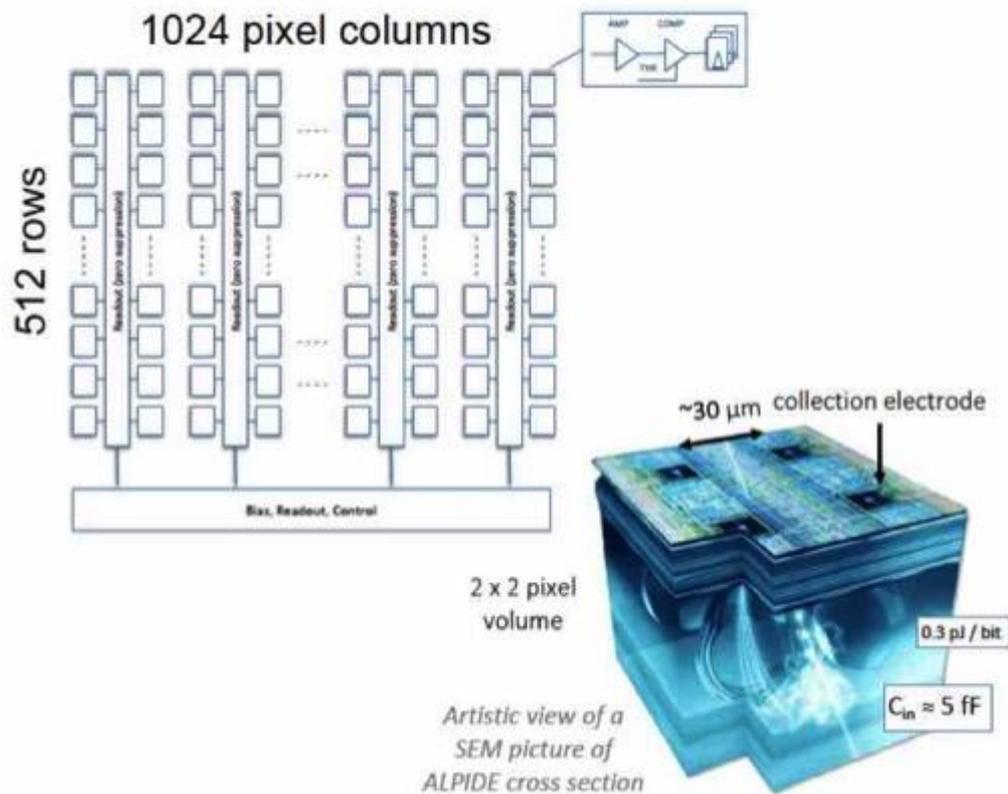
CMOS Pixel Sensor [1]



- Pixel $\sim 30 \mu\text{m}$
- High-resistivity ($> 1 \text{ k}\Omega \text{ cm}$) p-type epitaxial layer ($25 \mu\text{m}$) on p-type substrate
- Small n-well diode ($2 \mu\text{m}$ diameter) \Rightarrow low capacitance
- Reverse bias voltage to substrate (contact from the top) can be used to increase depletion zone around NWELL collection diode
- Deep p-well shields n-well L of PMOS Transistors
- Very low power dissipation ($< 300 \text{ nW/pixel}$)

Schematic of MAPS pixel

[1] J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **41** (2014) 087002

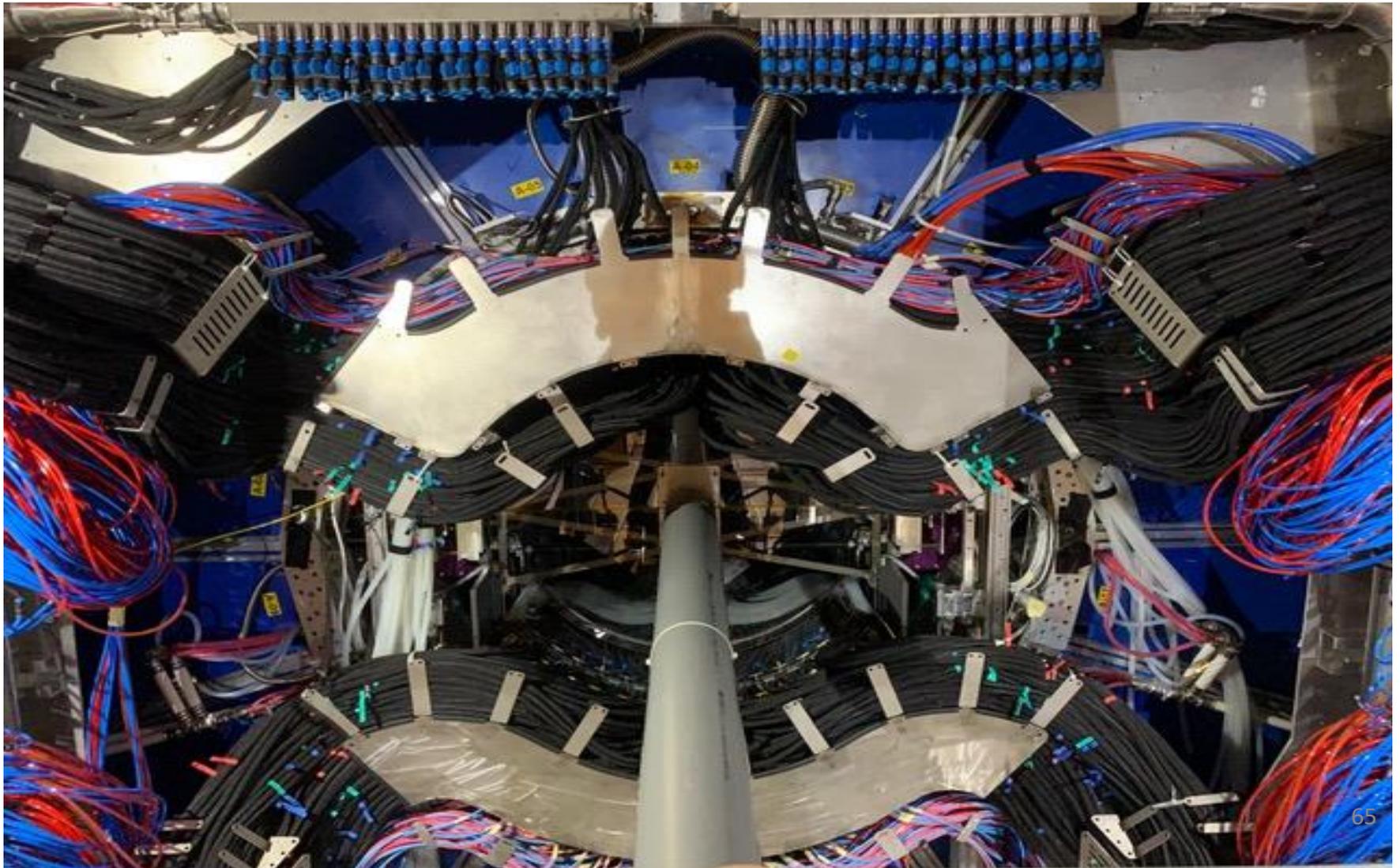


Each pixel:

- Amplification (always active)
- Discrimination
- Multiple hit buffer
- Data compression
- Common biasing settings
- Only digital outputs
- Triggering:
 - Global shutter
 - Continuous or triggered mode

- Characterization: Electrical tests (digital and analogue), noise, thresholds, fake hit rates vs. temperature, supply voltage, radiation, tests with γ - and β -sources, etc.

22 марта 2021 года: новая Внутренняя трековая система (ITS) успешно смонтирована внутри установки ALICE!

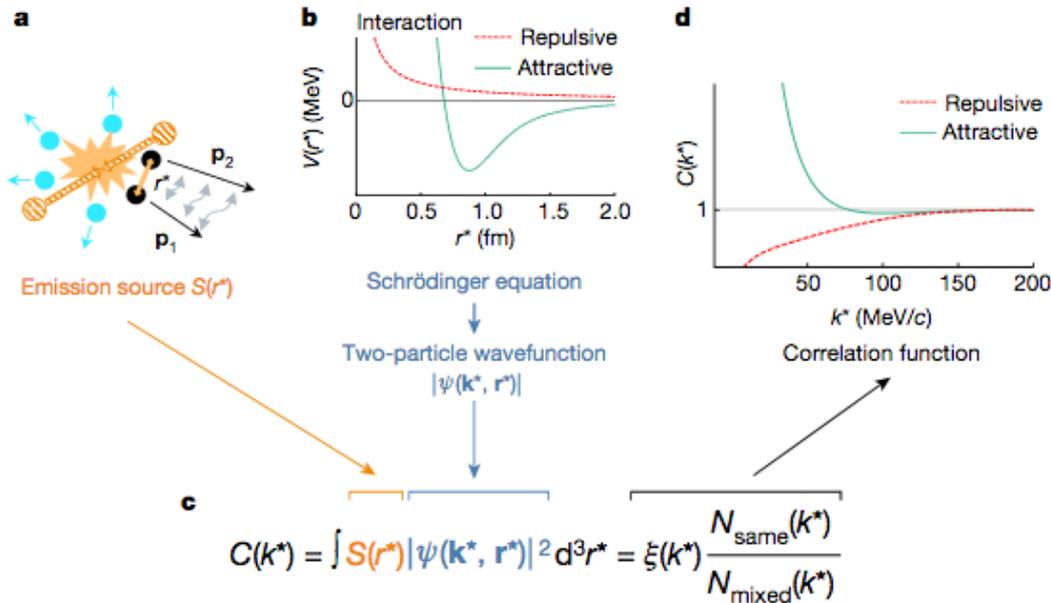


4) ALICE: новые исследования сильного взаимодействия между разными адронами



ALICE Collaboration

Обнаружение сильного взаимодействия между гиперонами на LHC
 Nature 588, 232–238 (2020).



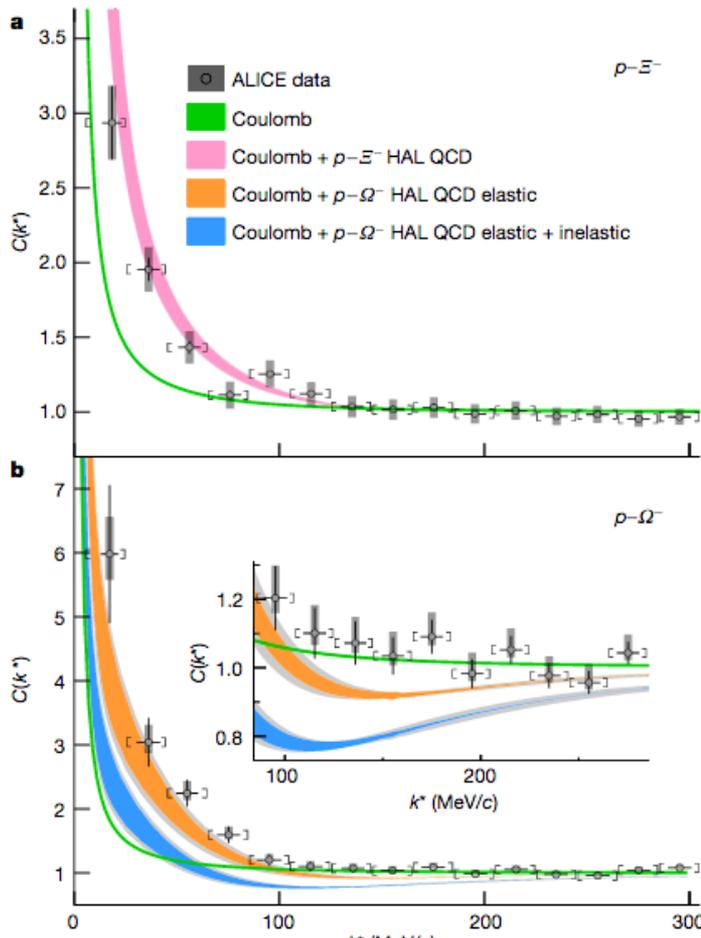
Кварковый состав:
 proton (p) = uud
 neutron (n) = ddu
 $\Lambda = uds$, $\Sigma^0 = uds$, $\Xi^- = dss$, $\Omega^- = sss$

- метод можно распространить практически на любую пару адронов,
- открылась неожиданная возможность для высокоточных исследований сильного взаимодействия на БАК

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-3001-6>

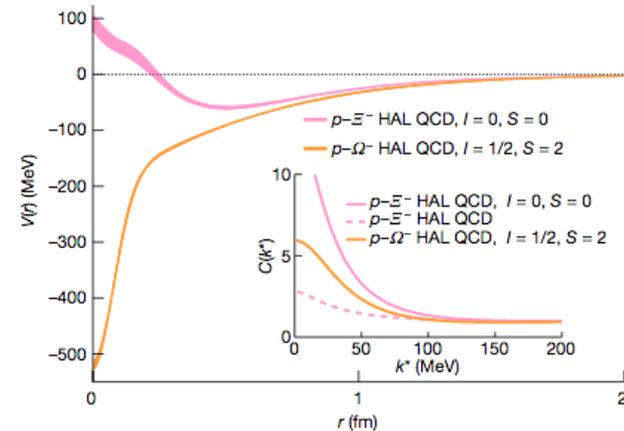
Сильное взаимодействие между

$p - \Xi^-$ и $p - \Omega^-$



proton (p) = uud

$\Lambda = uds, \Sigma^0 = uds, \Xi^- = dss, \Omega^- = sss$



- Взаимодействие гиперон-протон может быть детально изучено в $p - p$ -столкновениях на БАК
- Сравнение измеренных корреляционных функций показывает, что сигнал $p - \Omega^-$ в два раза больше, чем сигнал $p - \Xi^-$.
- Связанное состояние в $p - \Omega^-$?

ALICE Collaboration

Nature 588, 232–238 (2020).

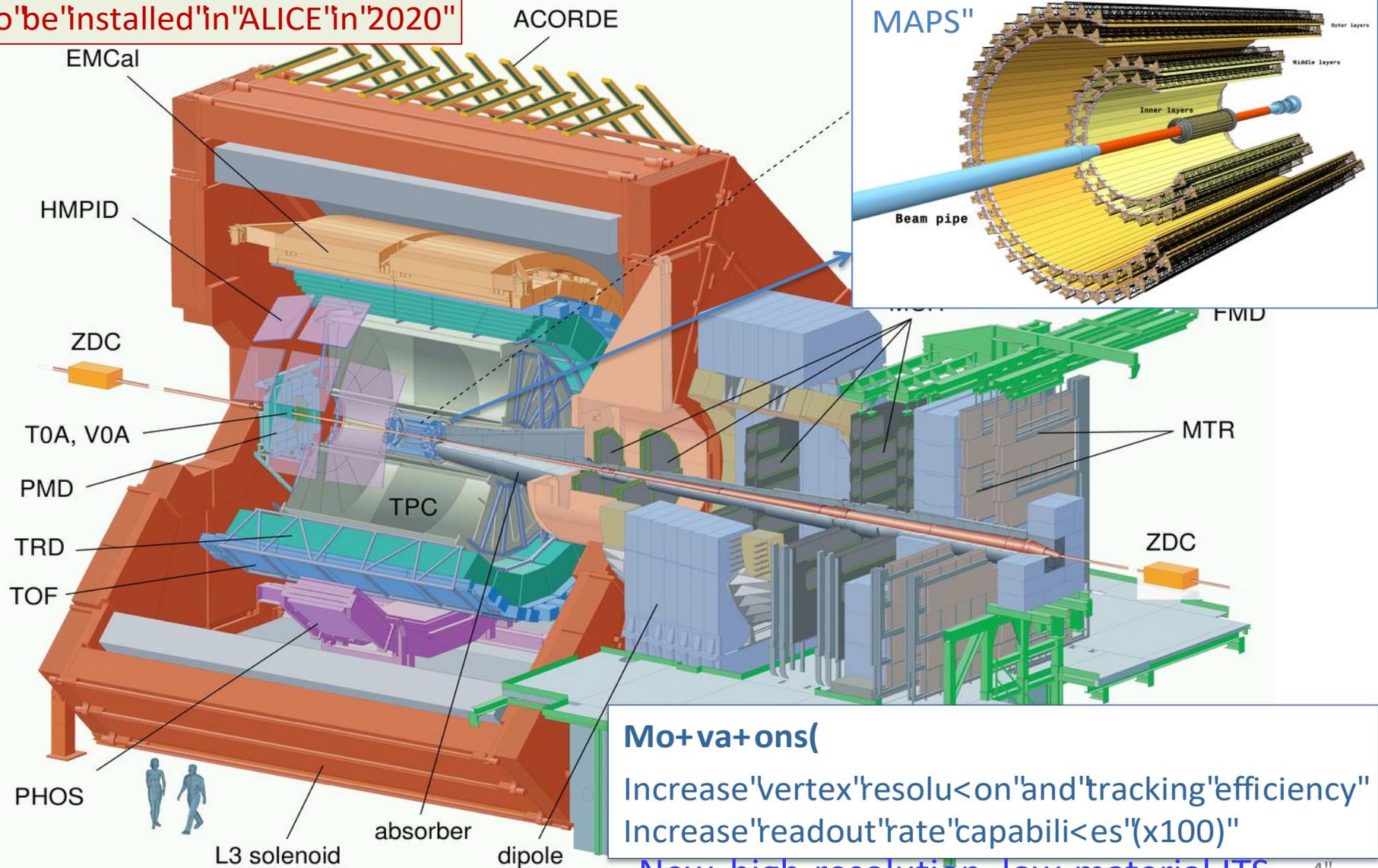
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-3001-6>

ITS 2 - новая Внутренняя трековая система ALICE



ALICE

To be installed in ALICE in 2020



Mo+va+ons(

Increase 'vertex' resolu<on' and 'tracking' efficiency'
Increase 'readout' rate' capabili<es' (x100)''

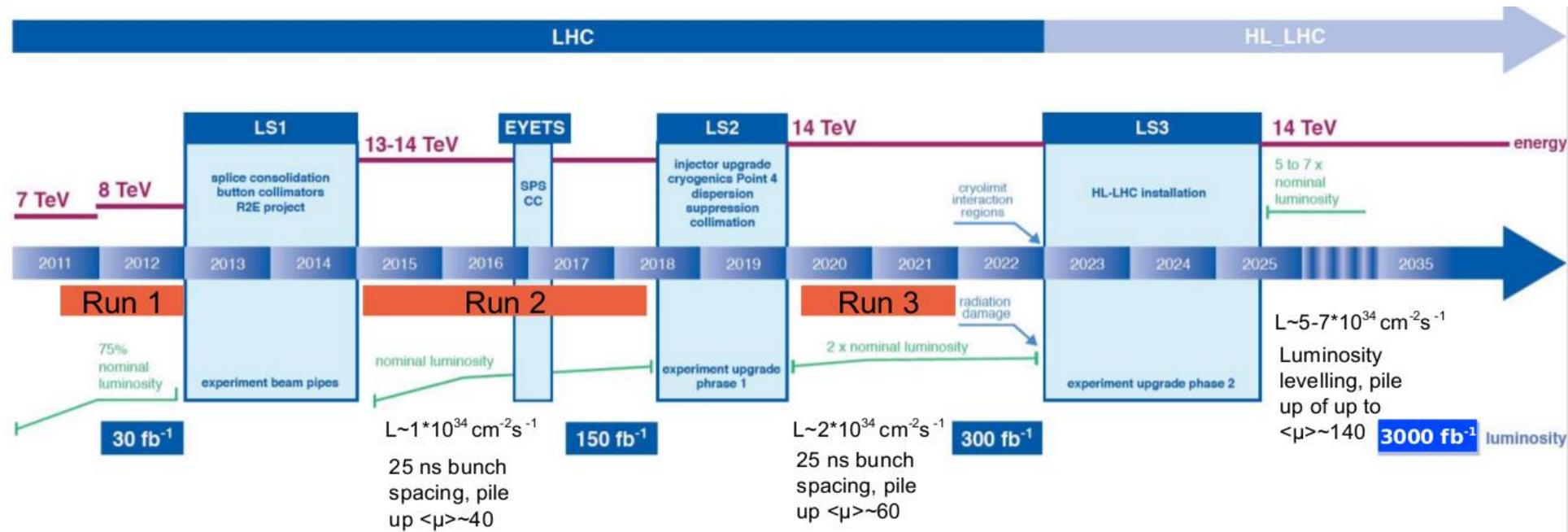
New, high-resolution, low-material ITS 69⁴''

Итоги модернизации ALICE

- Обновление LS2 эксперимента ALICE завершено
- Полная модернизация архитектуры считывания и вычислений детектора
- Интегрированная система Online-Offline
- Установлены 3 новых детектора
- С новыми ITS и MFT улучшенная производительность отслеживания и вторичных вершин
- Новый триггер быстрого взаимодействия
- Новые считывающие камеры TPC на базе GEM
- Сеанс RUN 3 февраля 2022 г. (конец LS2) - декабрь 2024 г.
- Сеанс RUN 4 ~ июнь 2027 г. - декабрь 2030 г.
- Десятикратное увеличение светимости Pb-Pb для ALICE по сравнению с Сеансом RUN 1 и 2.
- На два порядка больше событий MB при столкновениях Pb-Pb на частоте 50 кГц.



Планируемая модернизация детектирующих систем ЛHC



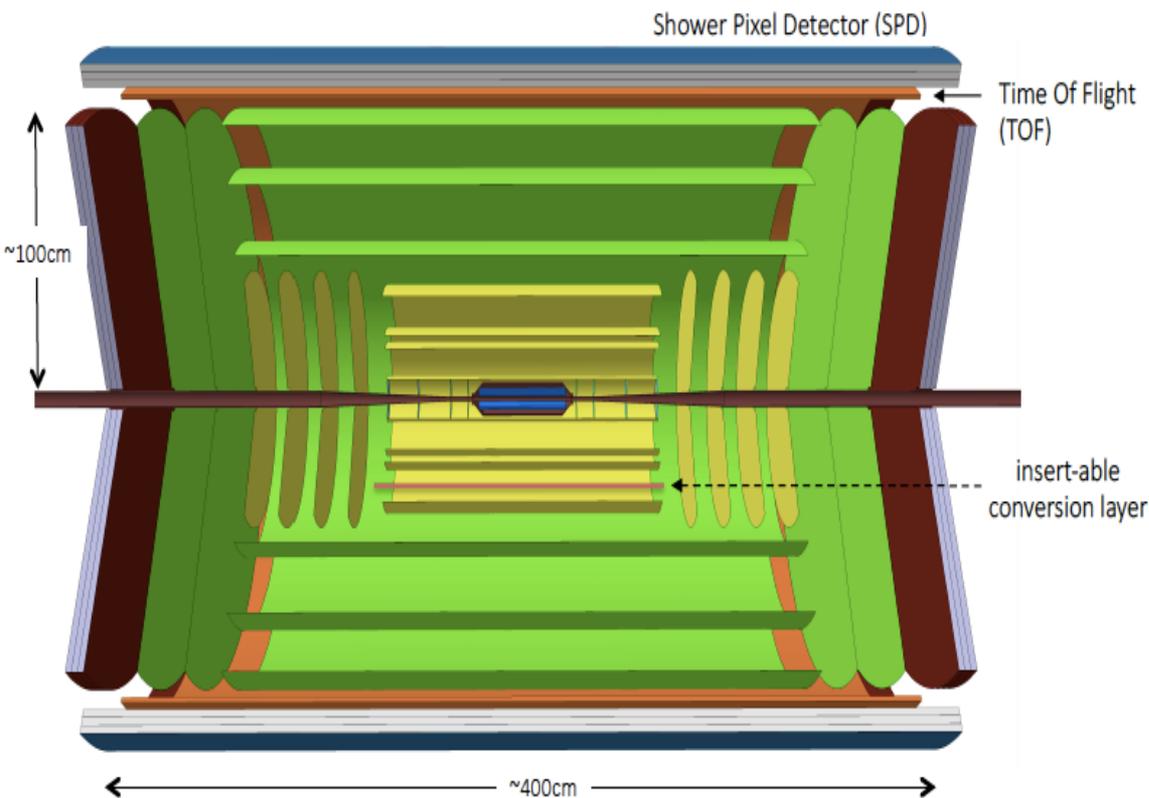
От LHC к HL-LHC

Мгновенная светимость x5 (для ATLAS, CMS, LHCb) → Плотность частиц x5-10

Интегрированная светимость x10 (для ATLAS, CMS, LHCb) → Радиационный ущерб x10

Увеличение перекрытия pp-событий (наложения x3-5)

ALICE 3 концепция Run 5 и далее



Key requirements

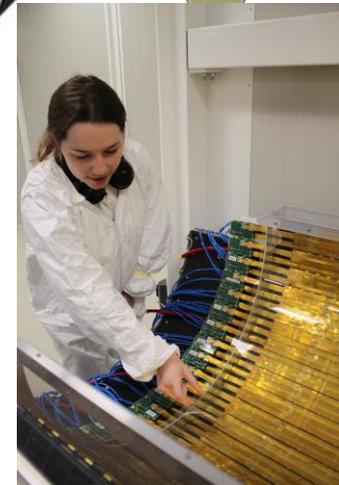
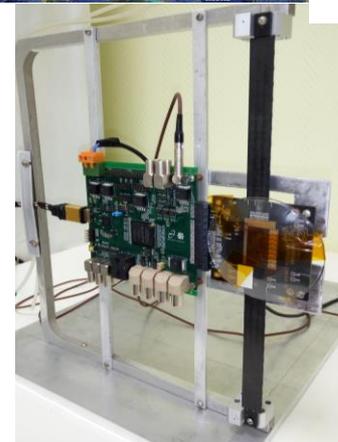
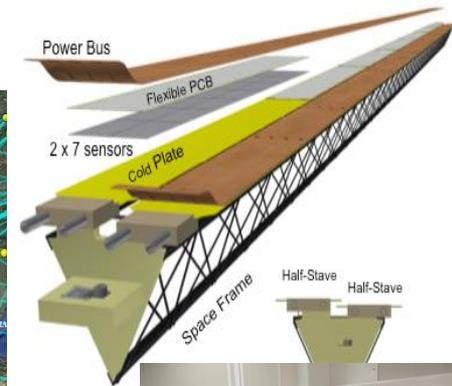
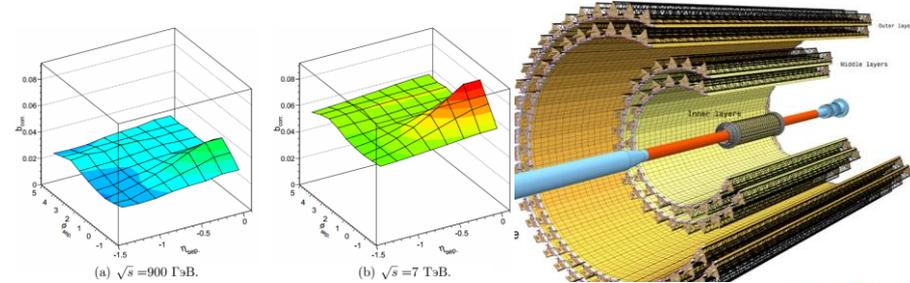
- Ultra-low material budget ($X/X_0 \sim 0.05\%$ per layer) for low p_T tracking
- Fast (large luminosity sampling)
- Large acceptance ($|\eta| < 4$)
- Excellent spatial resolution (tracking and vertexing)
- Precise time

<https://arxiv.org/pdf/1902.01211.pdf>

4) СПбГУ в эксперименте ALICE



- 1) Теоретические исследования и поиск новых физических явлений в адронных столкновениях при энергиях коллайдеров БАК (ЦЕРН) и NICA (ОИЯИ)
- 2) Участие в подготовке и проведении экспериментов ALICE и NA61(SHINE) в ЦЕРН, анализ и обработка данных по ядро-ядерным столкновениям при высоких энергиях
- 3) Участие в подготовке и проведении экспериментов MPD и SPD на коллайдере NICA в ОИЯИ (г.Дубна)
- 4) Координация грид-сайтов ALICE в РФ, Развитие Грид-технологий в СПбГУ и в РФ (World wide Large hadron collider Computing Grid - WLCG) с целью обеспечения накопления, обработки и анализа данных мегаустановок.
- 5) Исследование свойств кварк-глюонной среды в экспериментах по ядро-ядерным столкновениям путем обработки больших объемов данных методами машинного обучения
- 6) Разработка новейших детектирующих систем вершинных кремниевых детекторов для экспериментов ALICE, ALICE 3, NA61(SHINE) и MPD/NICA и системы мониторингирования пучков коллайдера NICA
- 7) Ядерная медицина: адронная терапия
- 8) Профориентационная работа со школьниками и популяризация науки: практика, мастер-классы по работе с данными БАК, лекции, дни Науки, ТВ

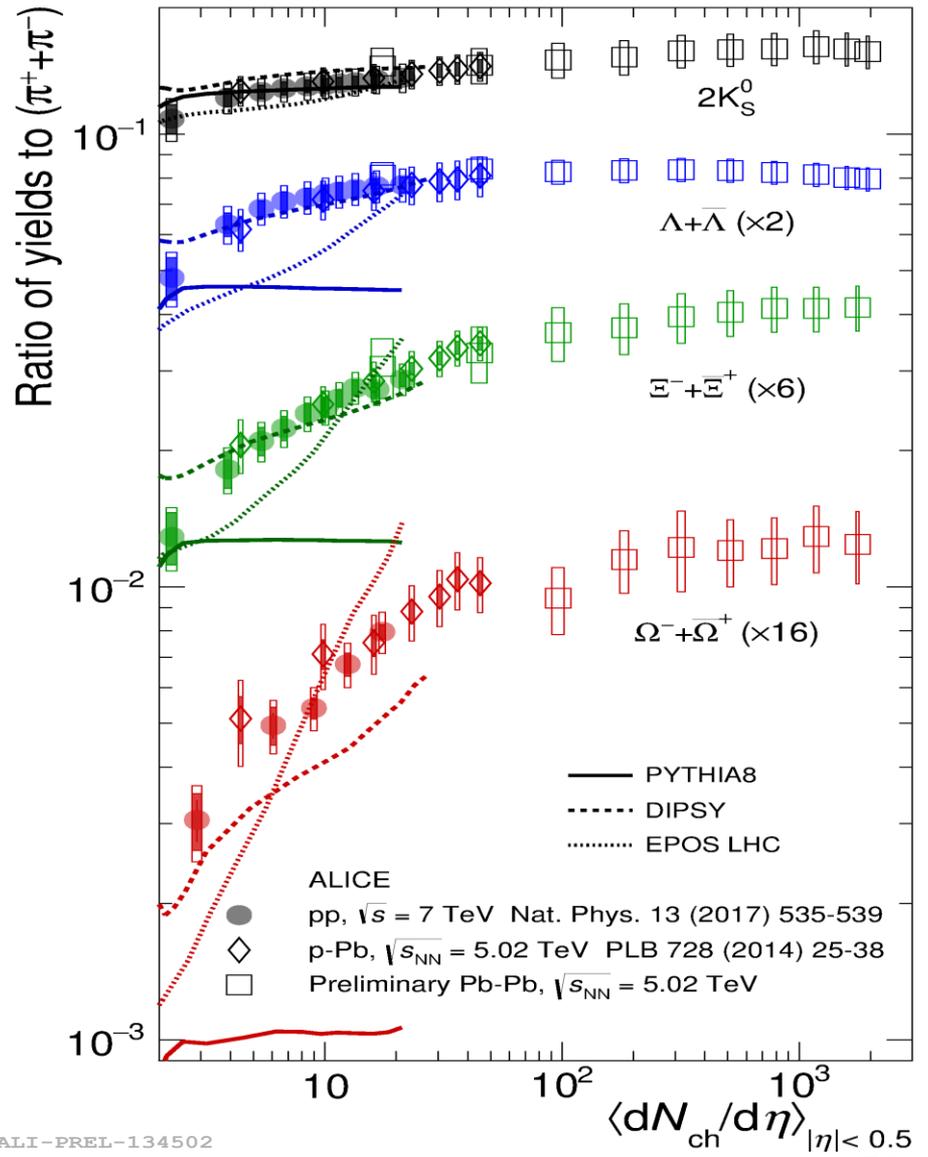


**p_T -интегральные
отношения выходов
странных частиц
к пионам
в зависимости
от множественности**

➤ При увеличении множественности частиц наблюдается значительный рост выхода странности.

(DOI:10.1038/NPHYS/4111)

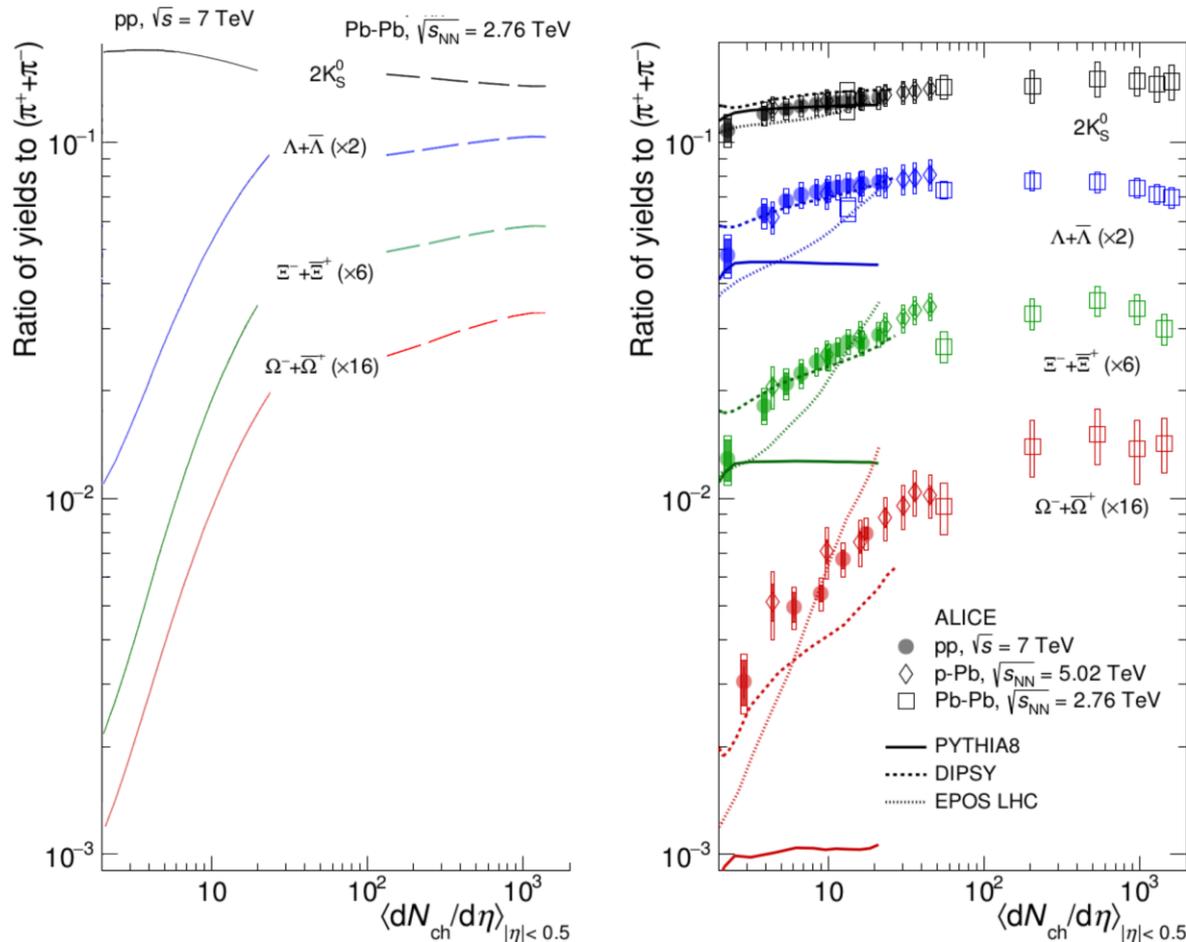
17.05.2022



ALI-PREL-134502

«Усиленное образование мультистранных адронов в протон-протонных столкновениях с высокой множественностью».

Коллабораци` ALICE, [Nat. Phys.2017, 13, 535–539](#).



Слева: «Multipomeron Model with Collective Effects for High-Energy Hadron Collisions», Vladimir Kovalenko , Grigorii Feofilov * , Andrei Puchkov and Farkhat Valiev.

[Universe, 2022, 8, 246](#)

Лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ: образование



- И теория и новейший эксперимент – входит в тематику исследований для студентов и аспирантов, работающих в Лаборатории
- Непосредственное участие молодежи в подготовке и проведении экспериментов ALICE и NA61/SHINE в ЦЕРН, обработке данных и физическом анализе
- Регулярные научные семинары (<http://phys.spbu.ru/scientific-seminars.html>)
- Выступления на международных конференциях
- Более 20 бакалаврских
- и магистерских работ,
- 5 кандидатских и 3 докторских

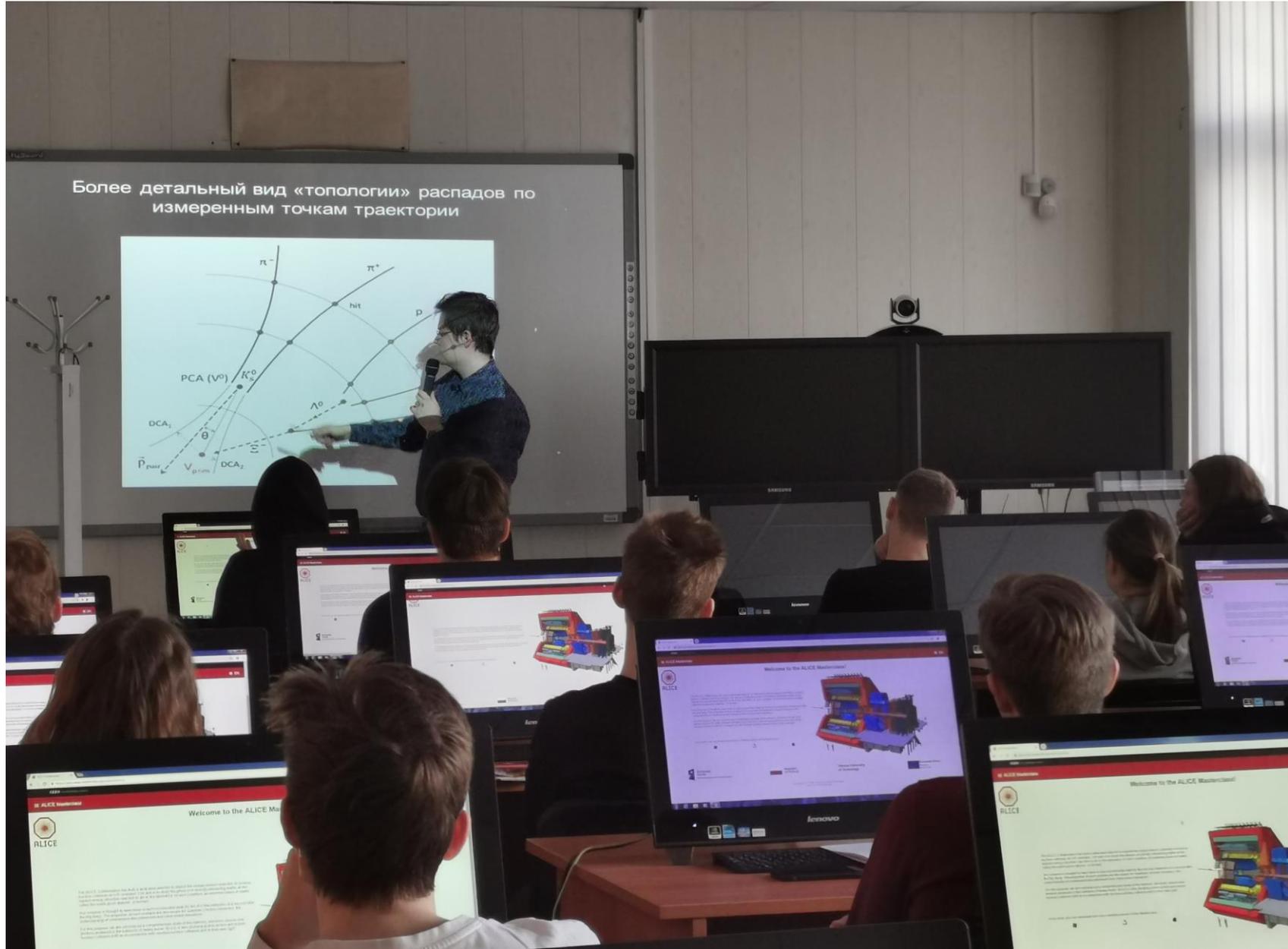


Владимир Коваленко –
лидер рабочей смены
в эксперименте ALICE
(Фото Г.Феофилова, 2018
)



Участники международного мастер-класса
ALICE для школьников в СПбГУ 16.03.2022

Мастер-класс в СПбГУ для школьников – “Поиск странных частиц в эксперименте ALICE” (15 марта 2022)



Мастер-класс в СПбГУ для школьников по адронной терапии на основе пакета MatRad (18 марта 2022)



5) ЦЕРН как уникальный генератор новых знаний и умений

Некоторые важные приложения фундаментальных исследований за последние 20 лет в ЦЕРН:

- **Touch screens**
- «Паутина» WWW – **World Wide Web** (Tim Bernes Lee)
- **GRID** для медицины
- «Дожигание» ядерного топлива
- **ПЭТ сканеры** для медицинской диагностики
- **Адронная терапия онкологических заболеваний**

Спасибо за внимание!

