

# INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS





ALICE

# Поиск странных частиц в эксперименте ALICE

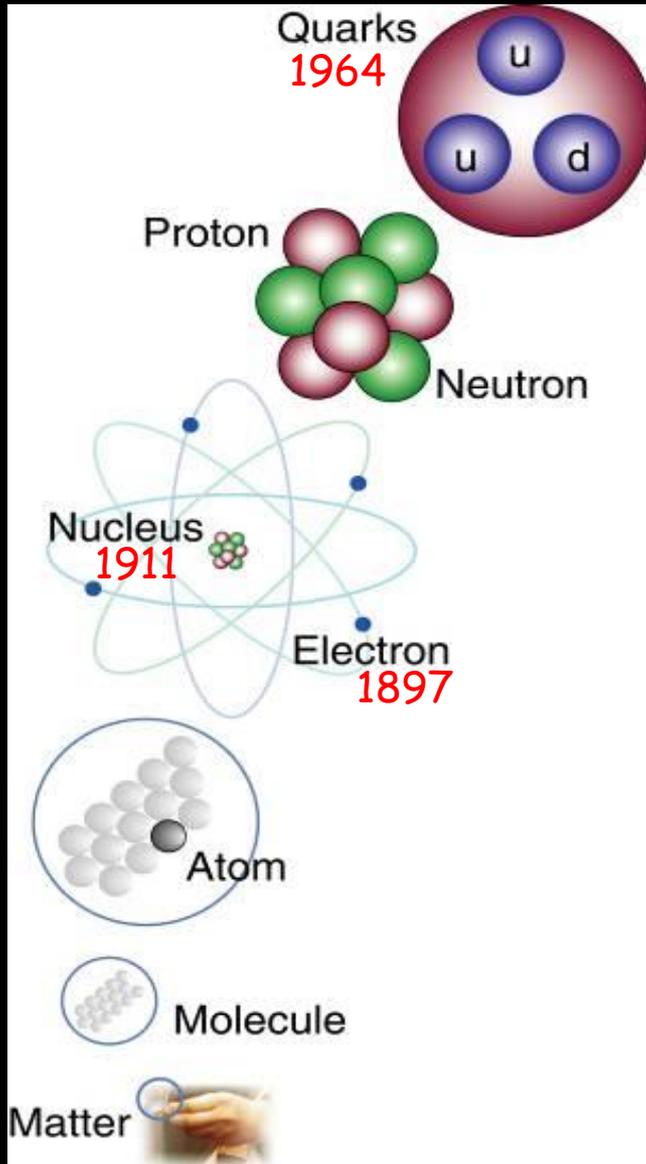
Игорь Алцыбеев

Санкт-Петербургский государственный университет

5 марта 2018



# Элементарные частицы



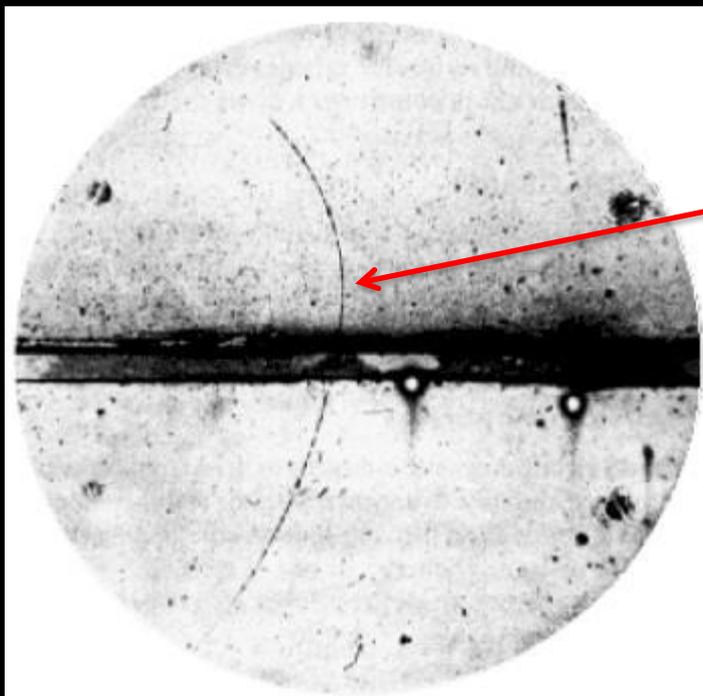
## Детектор: Камера Вильсона (изобретена в 1912 г.)



1927

### Принцип:

конденсация перенасыщенного пара на ионах, образующих заряженной частицей



наблюдение позитрона в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле (1932 г.)



1936

**Трек (track)** – видимый след, оставляемый *заряженной* частицей в веществе и воспроизводящий траекторию её движения.



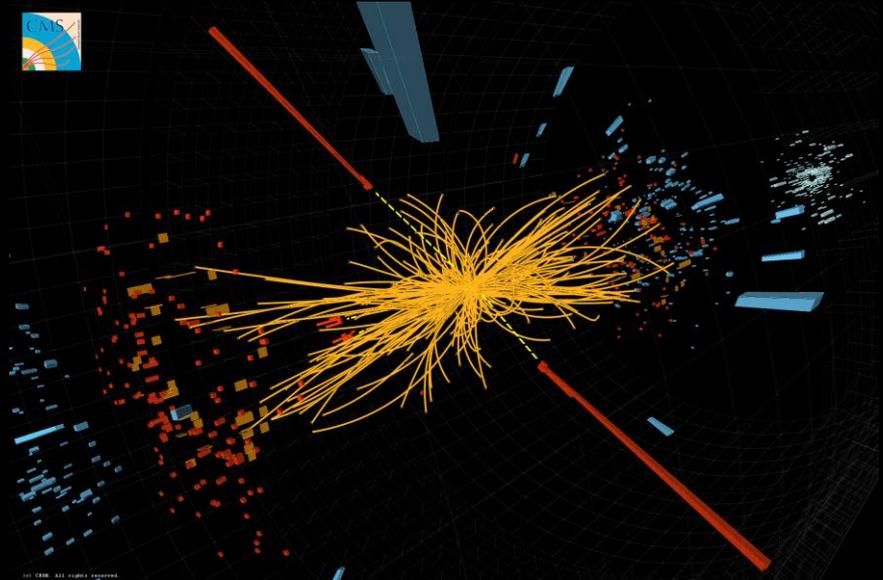
# Как можно роддать и изучать частицы?

1. Разогнать и столкнуть → ускоритель
2. Зарегистрировать рожденные частицы → детектор

Коллайдер LHC в туннеле:



Частицы от столкновения протонов, зарегистрированные в детекторе:



# Большой адронный коллайдер

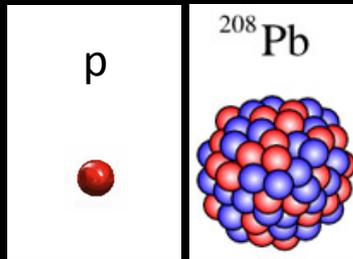
Длина кольца: 27 км

Сталкиваются:  
протоны либо ядра свинца

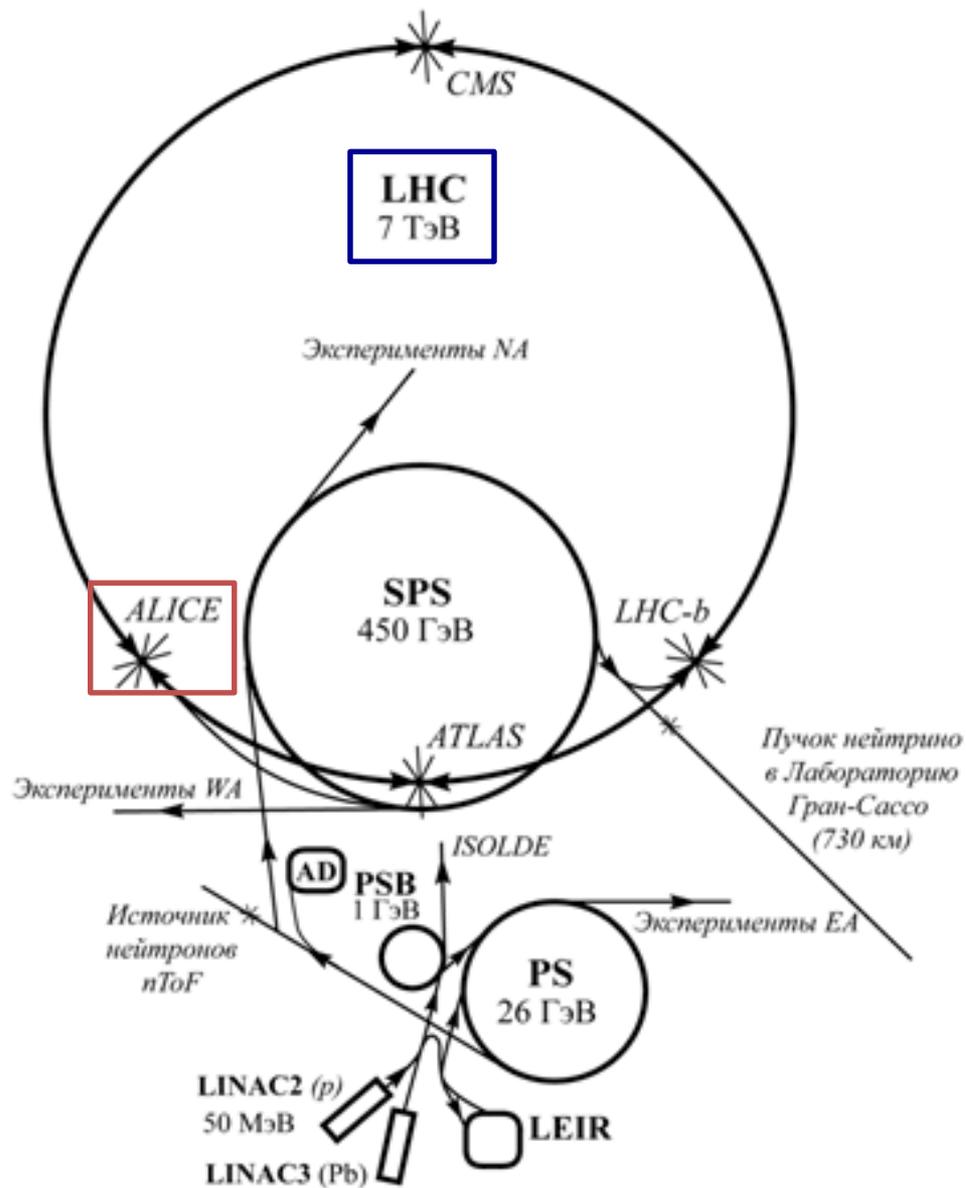
Энергия протонов:  
до 14 Тераэлектронвольт

Люди:  
> 5000 физиков

Стоимость:  
≈4 млрд евро (ускоритель + детекторы)



# Ускорительный комплекс в ЦЕРН

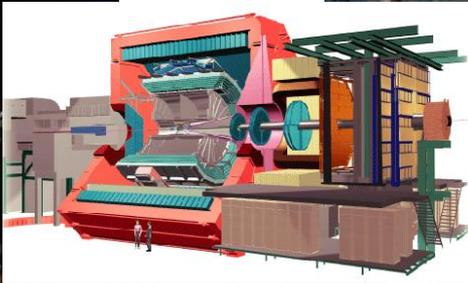


# Эксперименты на LHC

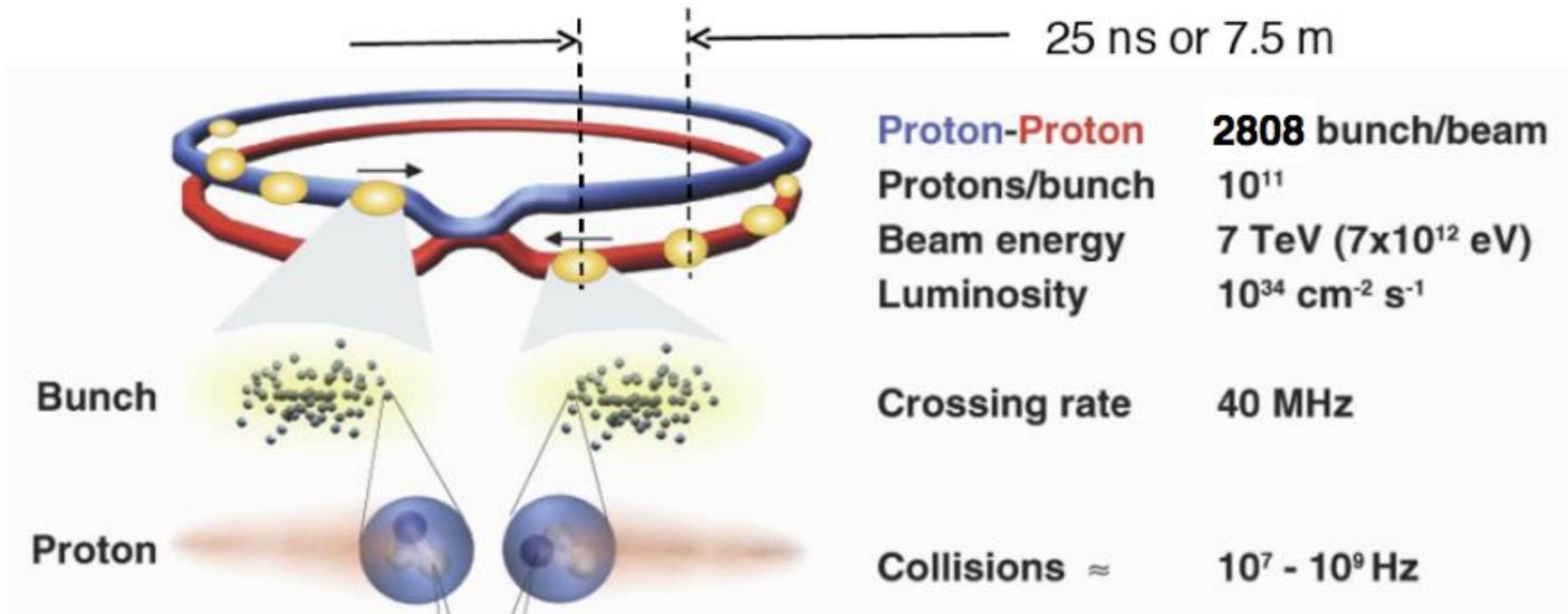


# Эксперименты на LHC

ALICE



# В LHC летят встречные **сгустки** частиц

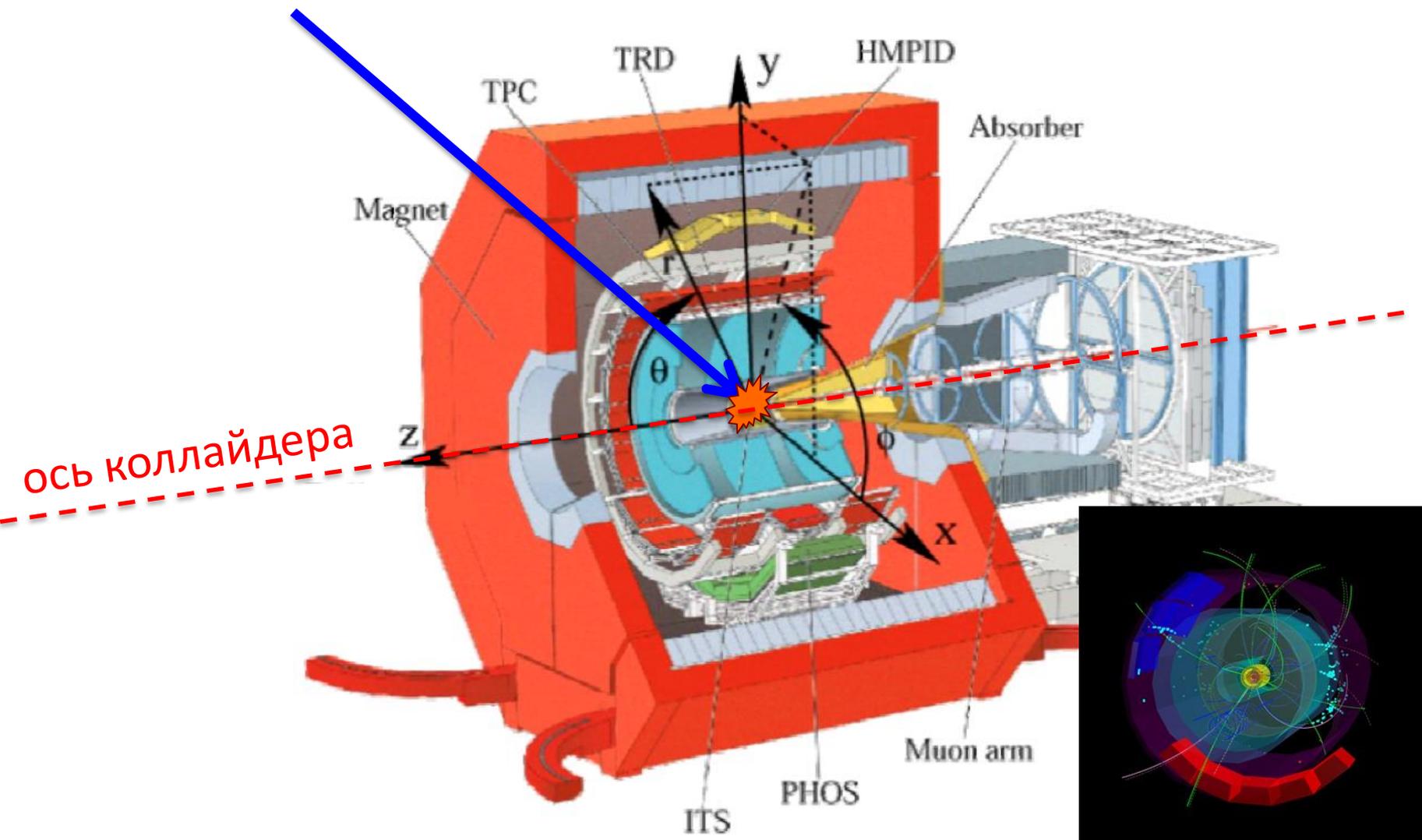


100 миллиардов протонов в одном сгустке x 2800 сгустков  
= **280 триллионов частиц** летает по кольцу почти со скоростью света!

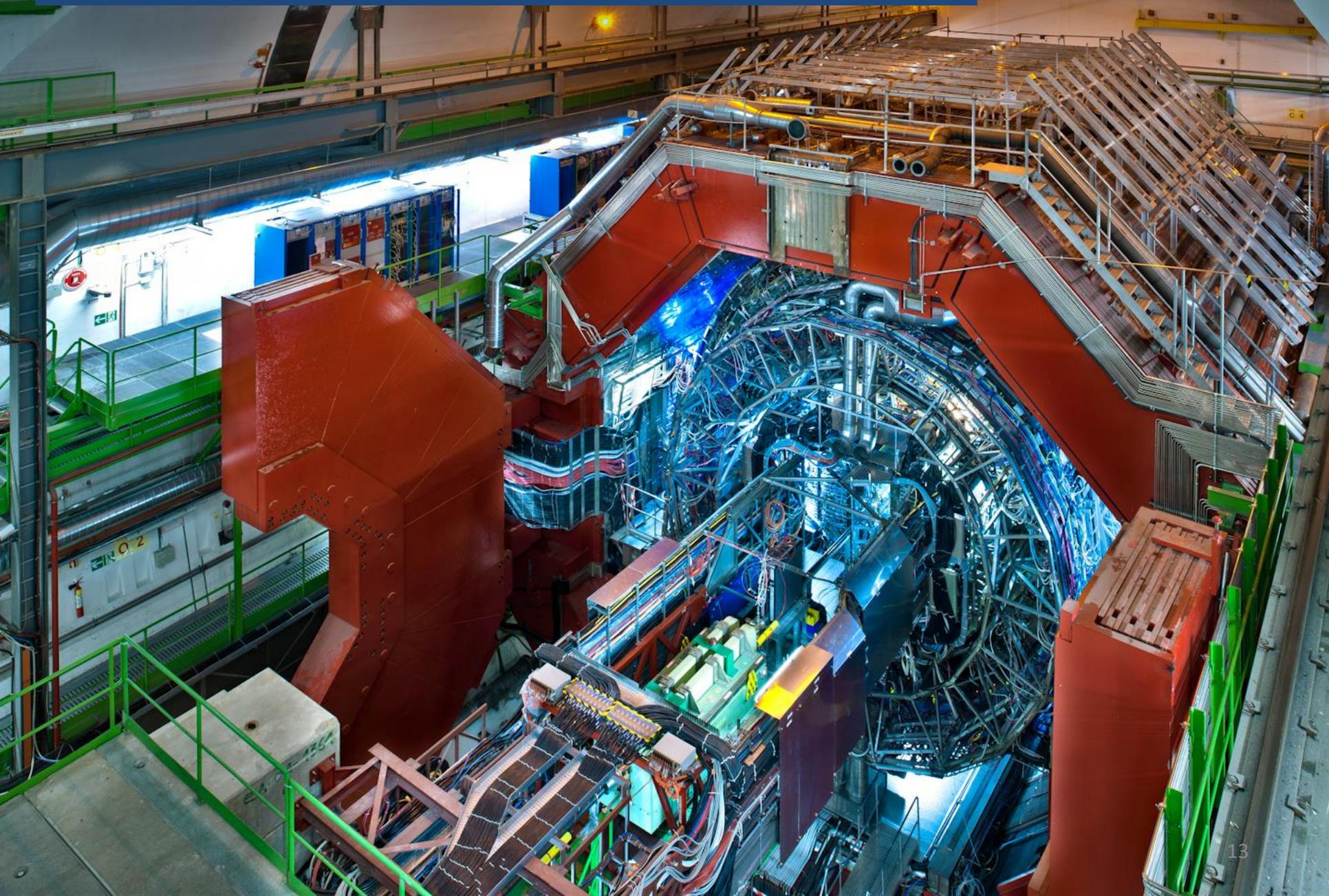
Энергия, запасенная в пучках LHC: **~300 МДж**

- достаточно, чтобы расплавить 500 кг меди
- энергия сажащегося Airbus A320

Столкновение частиц происходит  
в *точке взаимодействия* (interaction point, IP)



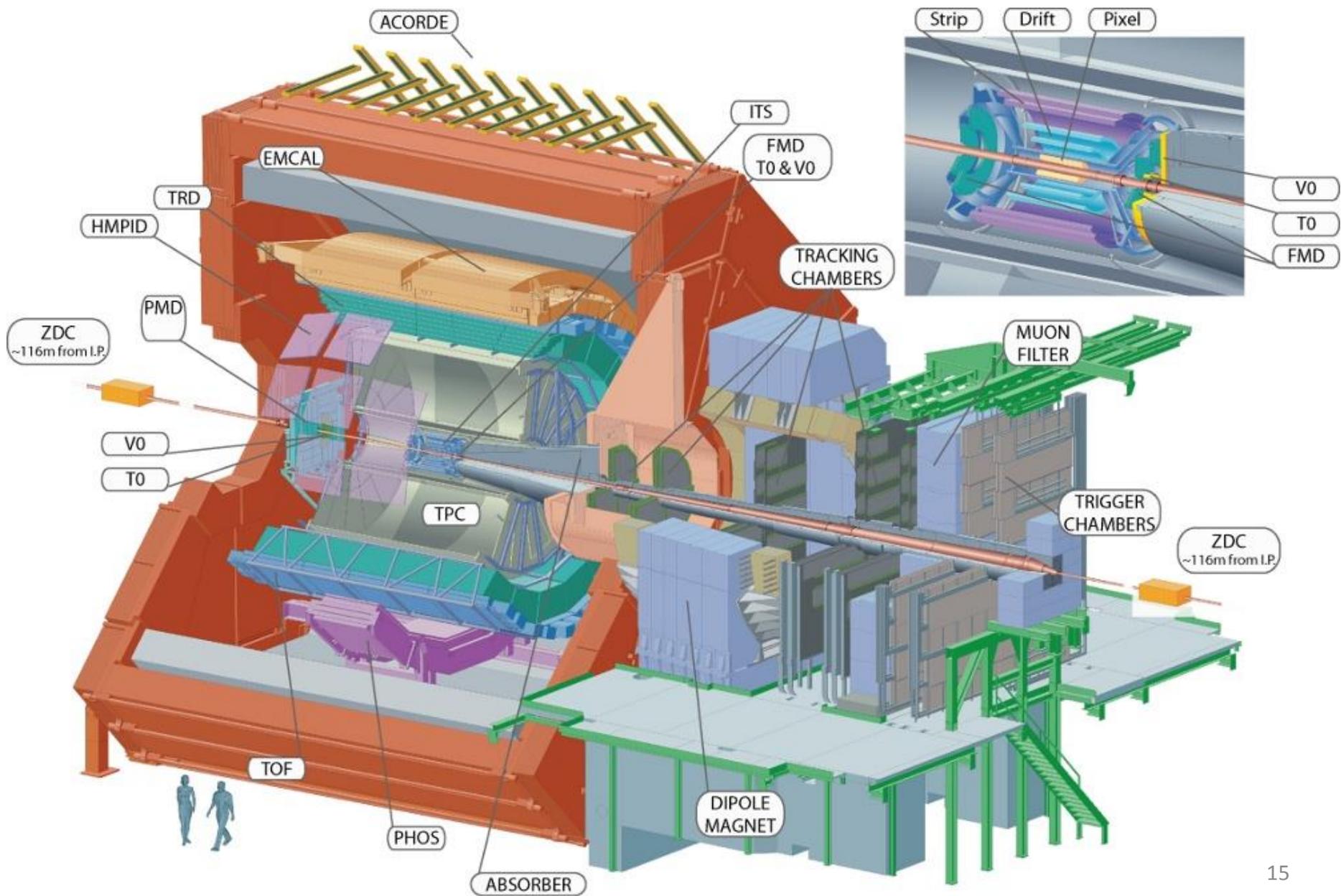
# Детектор ALICE с открытыми «воротами»



# Подготовка к Рождеству-2017 в Швеции

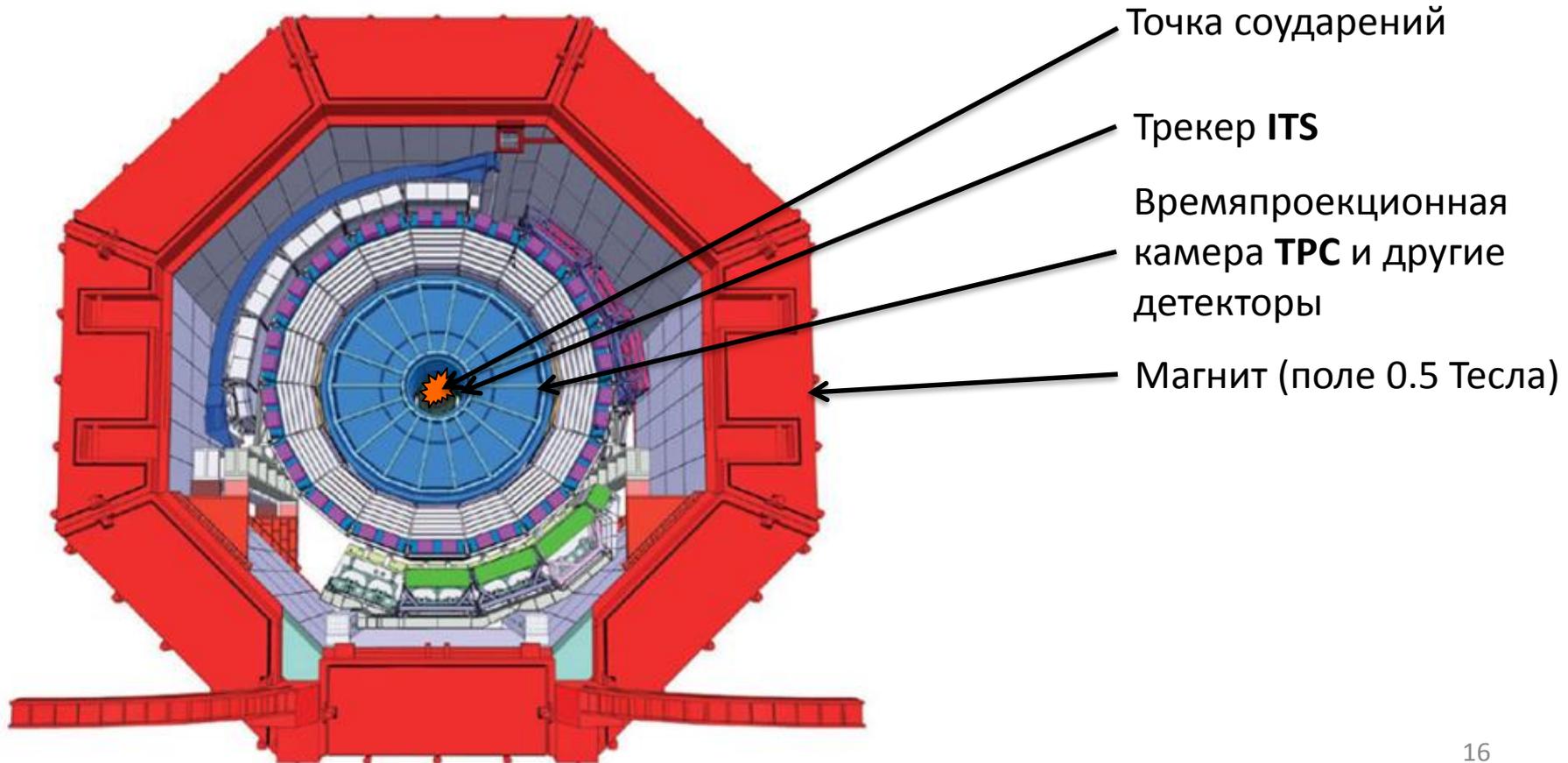


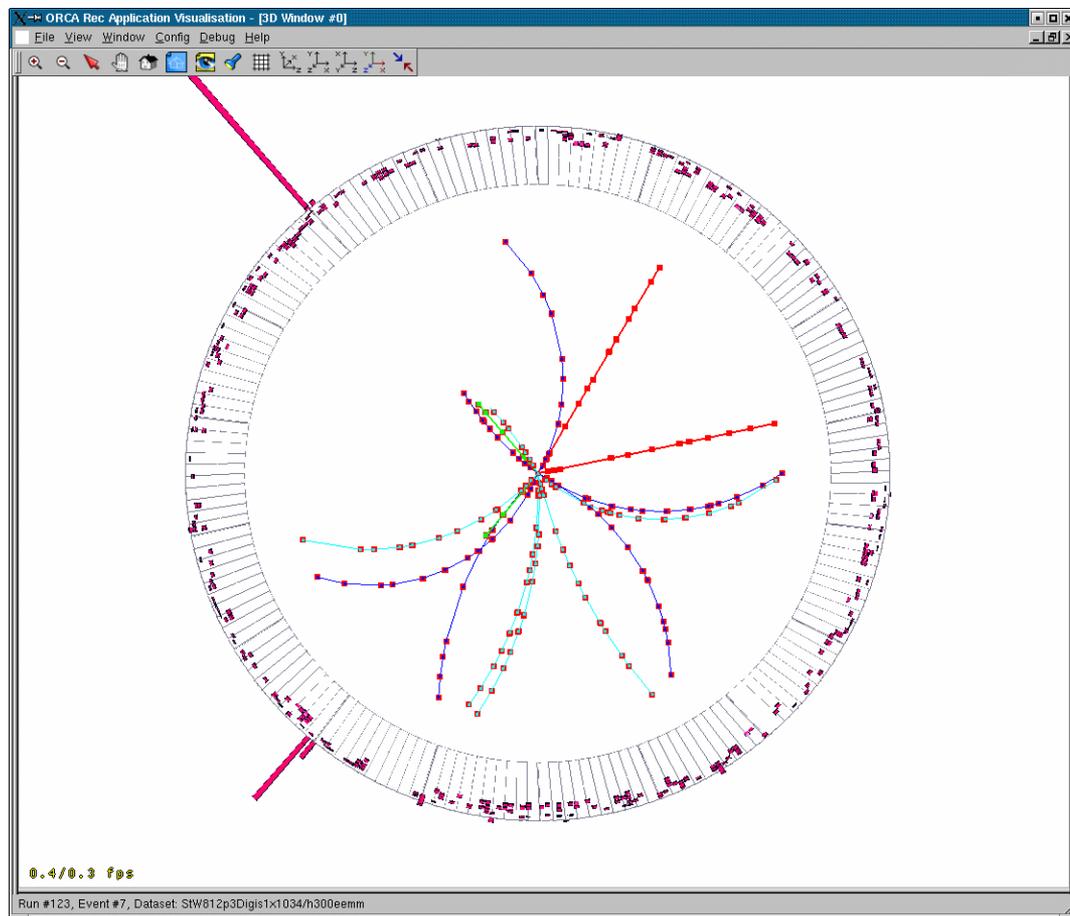
# Детектирующая установка ALICE



# Типичная структура современного эксперимента физики частиц – «матрёшка»

Поперечный «разрез» детектора ALICE:

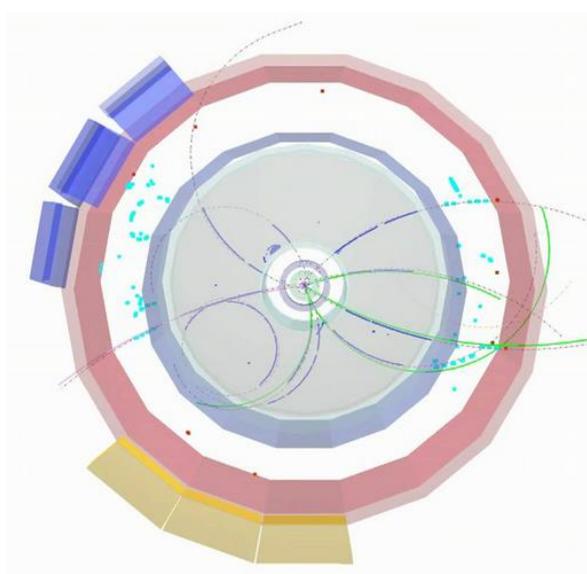




**Кластеры** = измеренные точки траектории частицы.  
Треки **реконструируются** по хитам.

Загибание траекторий заряженных частиц  
– благодаря **магнитному полю соленоида!**

→ определяем **поперечный импульс** и **заряд** частиц!

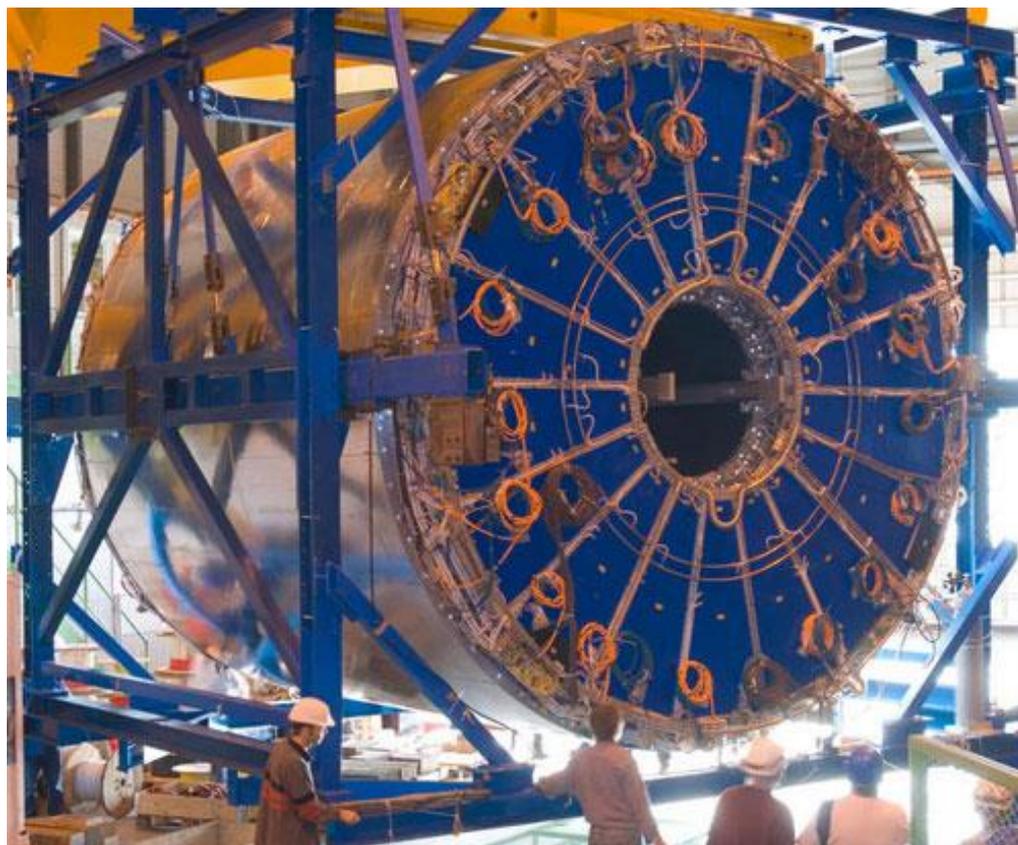


Знаем **заряд**, **импульс**, **направление**.  
Что еще нужно знать о частице?

→ **«Сорт» частицы!**  
(пион? каон? протон? электрон? ...)

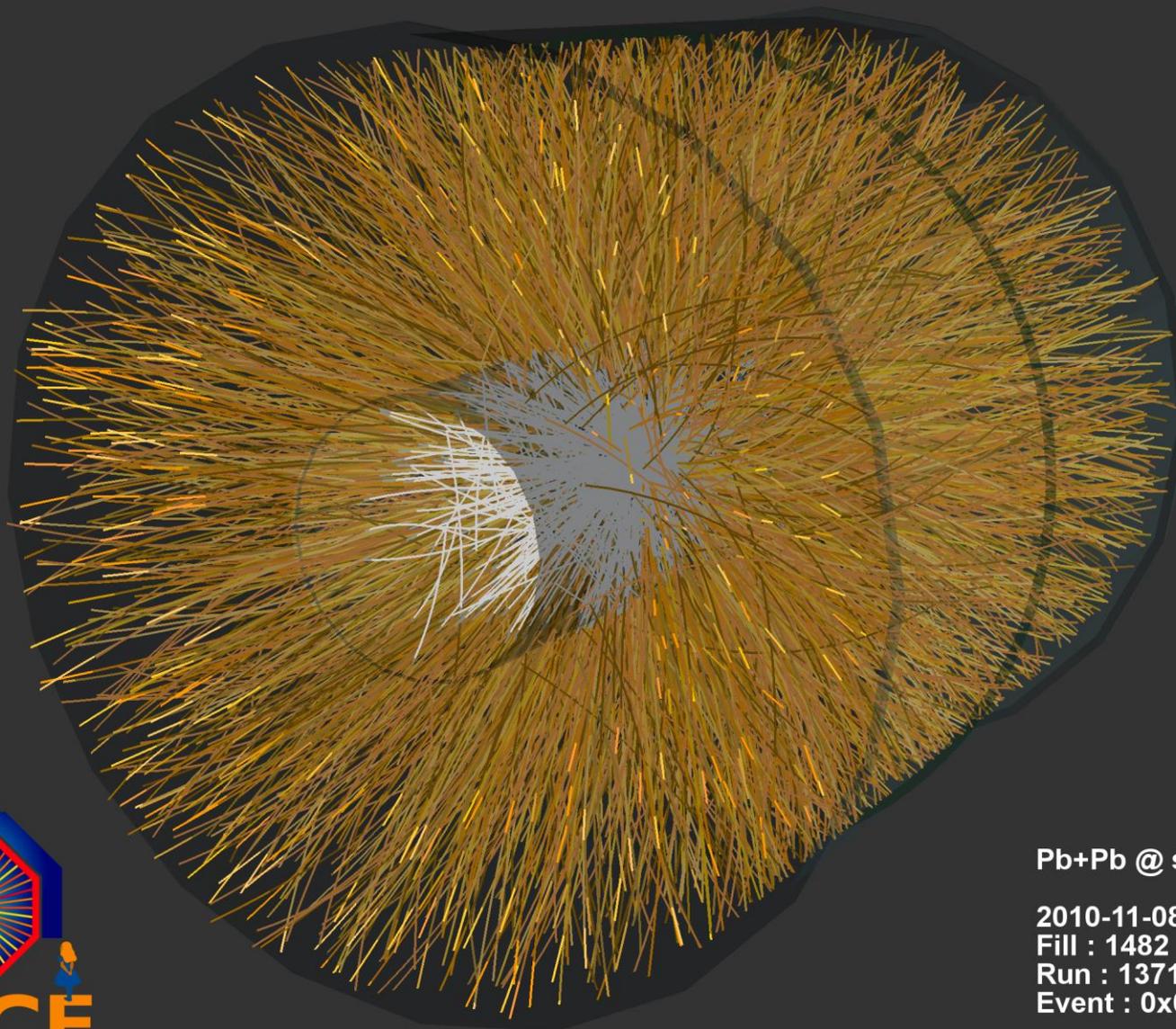
В установке **ALICE** основной детектор для трекинга и идентификации частиц:

## Время-проекционная камера (Time Projection Chamber, TPC)



88 м<sup>3</sup>  
Ar-CO<sub>2</sub>

# Треки в ТРС от столкновения двух ядер свинца:



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

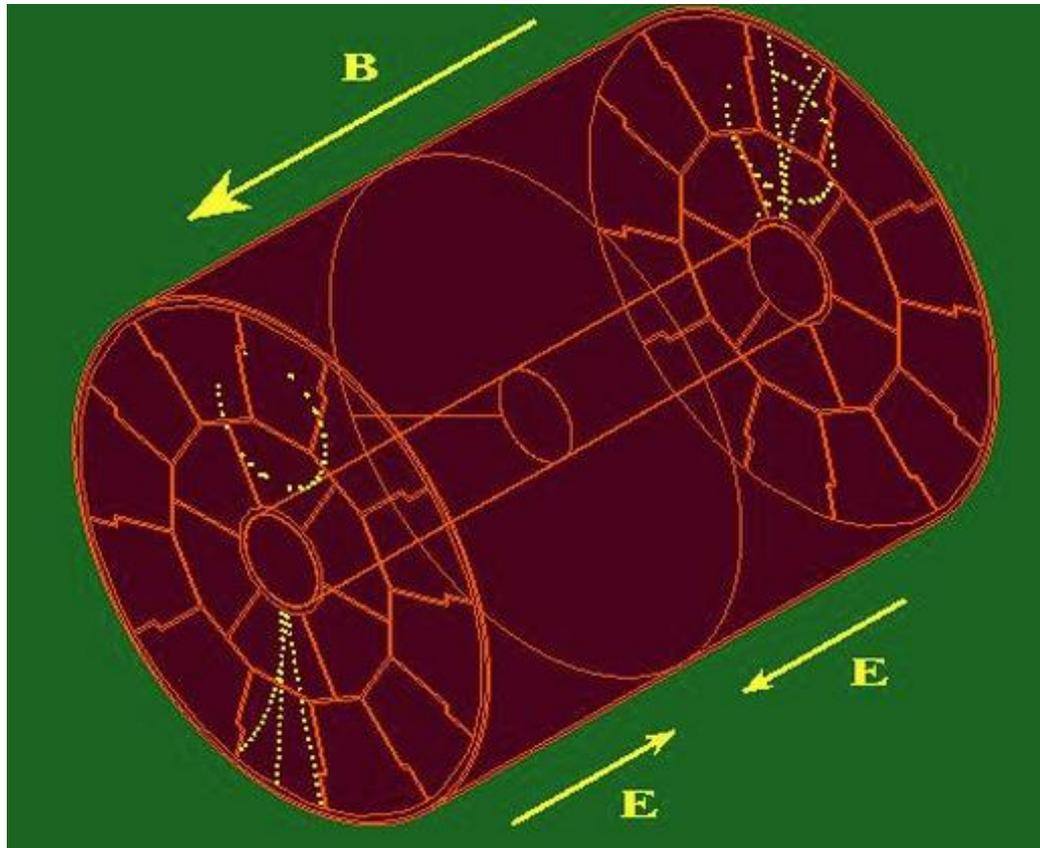
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

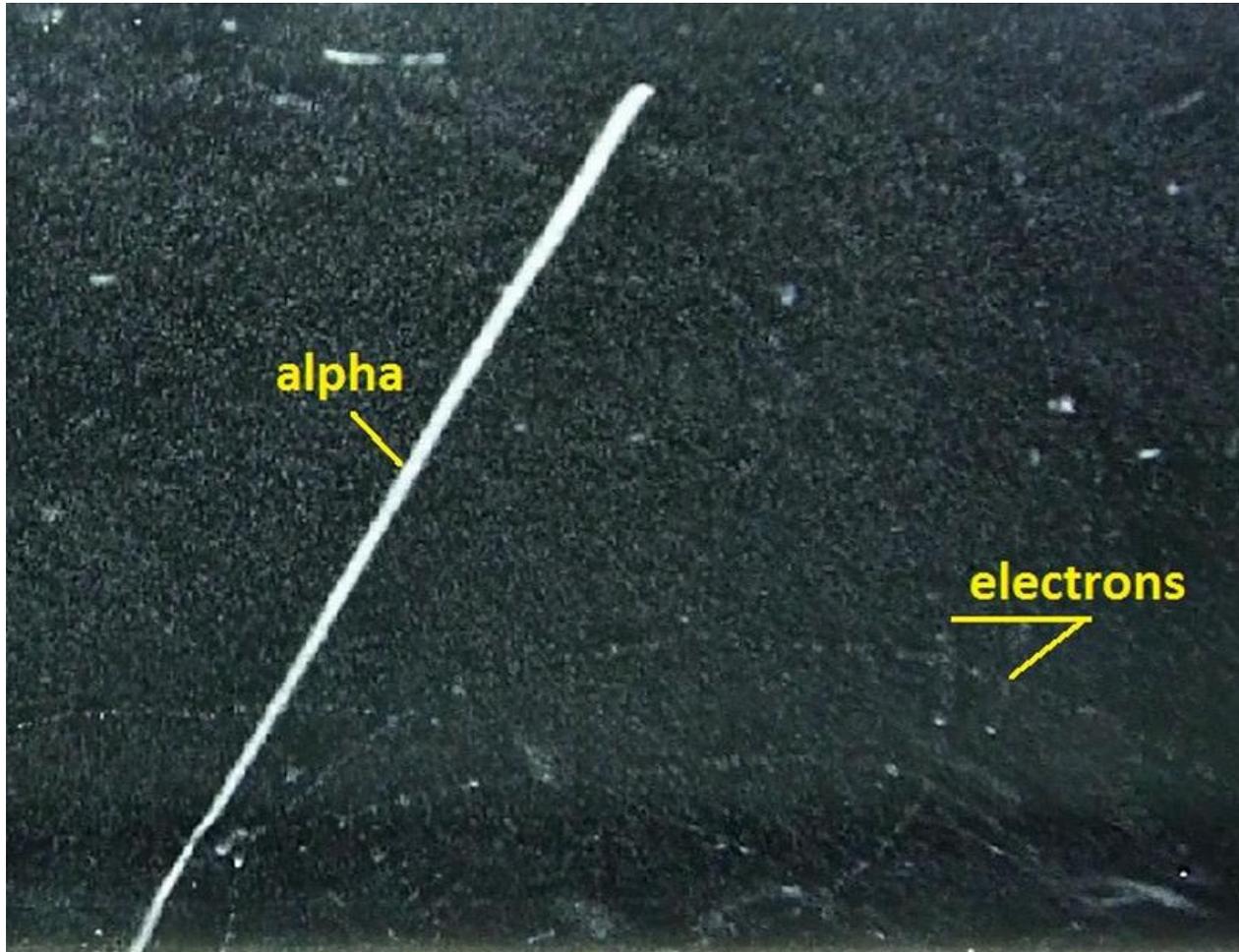
Event : 0x00000000D3BBE693

Заряженная частица ионизирует газ,  
электроны под действием электрического  
поля попадают на торцы ТРС

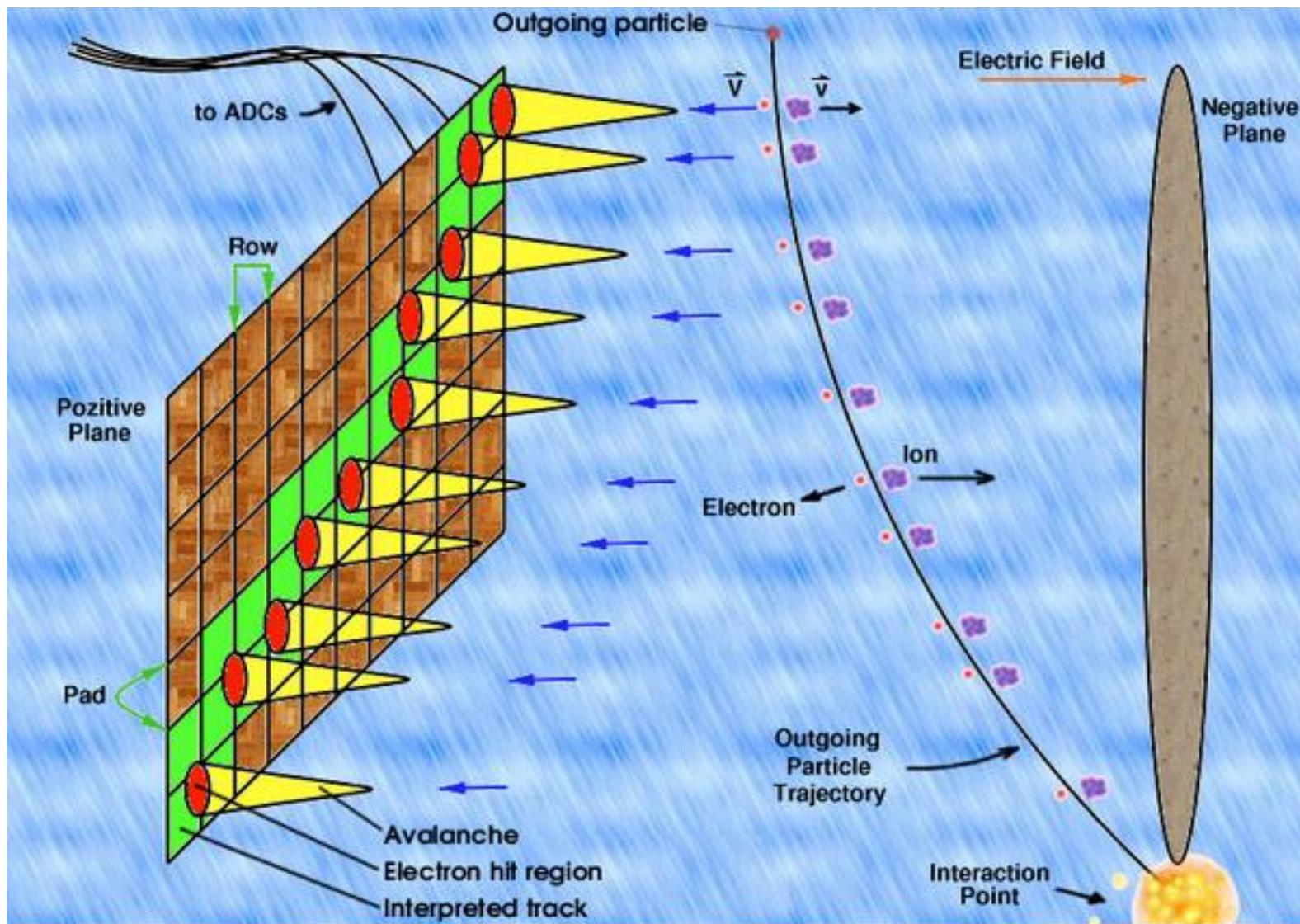


**Принцип:** при прохождении через вещество, разные частицы по-разному теряют энергию!

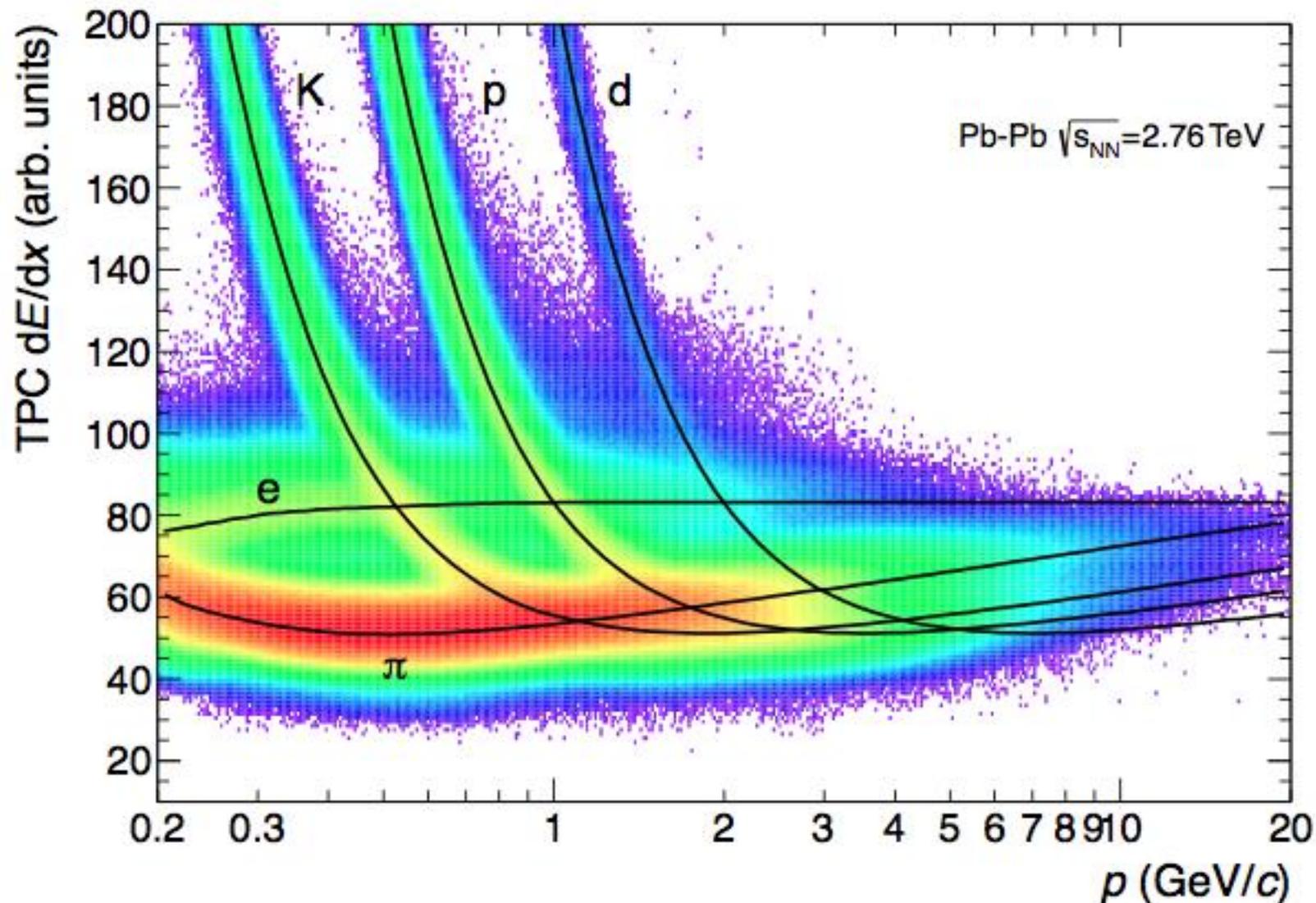
**Пример:** альфа-частица и электроны в камере Вильсона:



Время-проекционная камера ТРС дает **3D-координаты хитов** и информацию о **соре** каждой частицы!

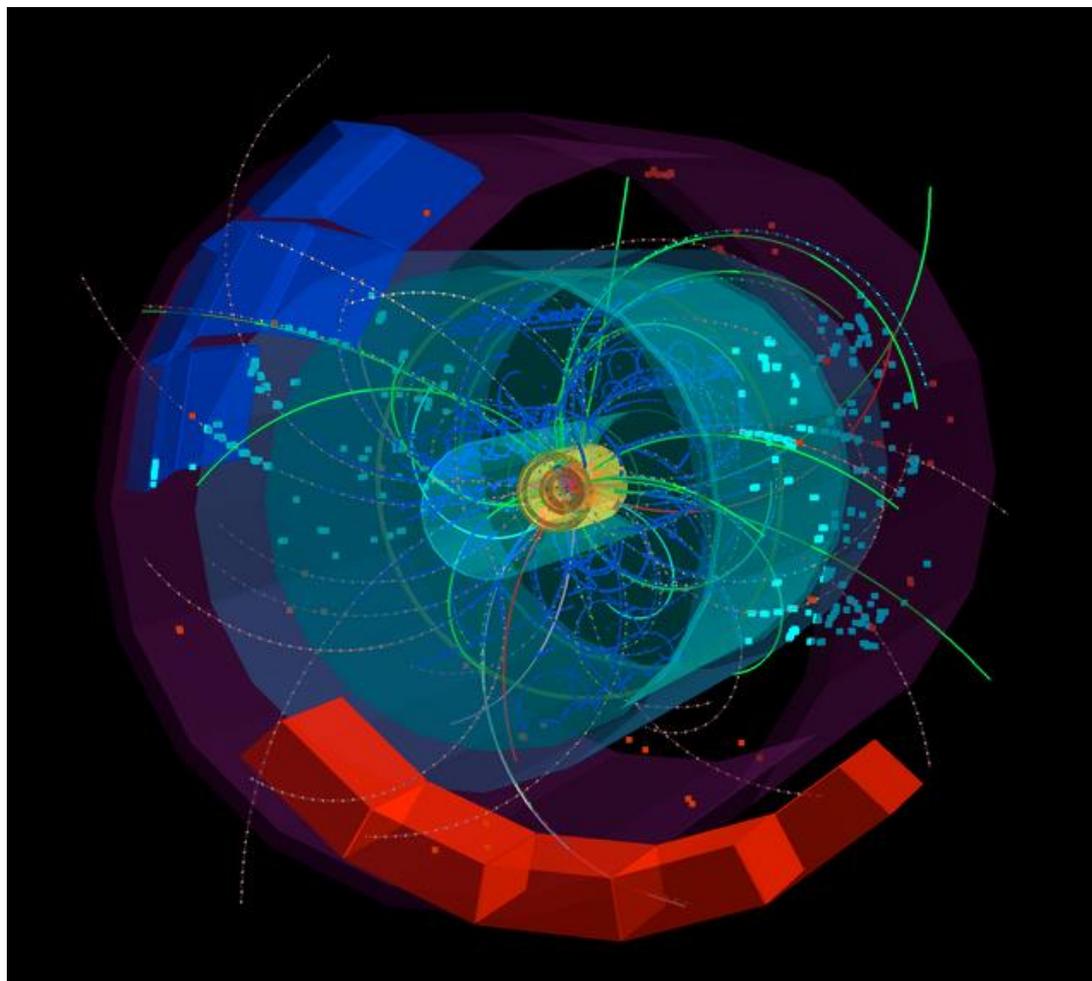


# Потери энергии в Time Projection Chamber



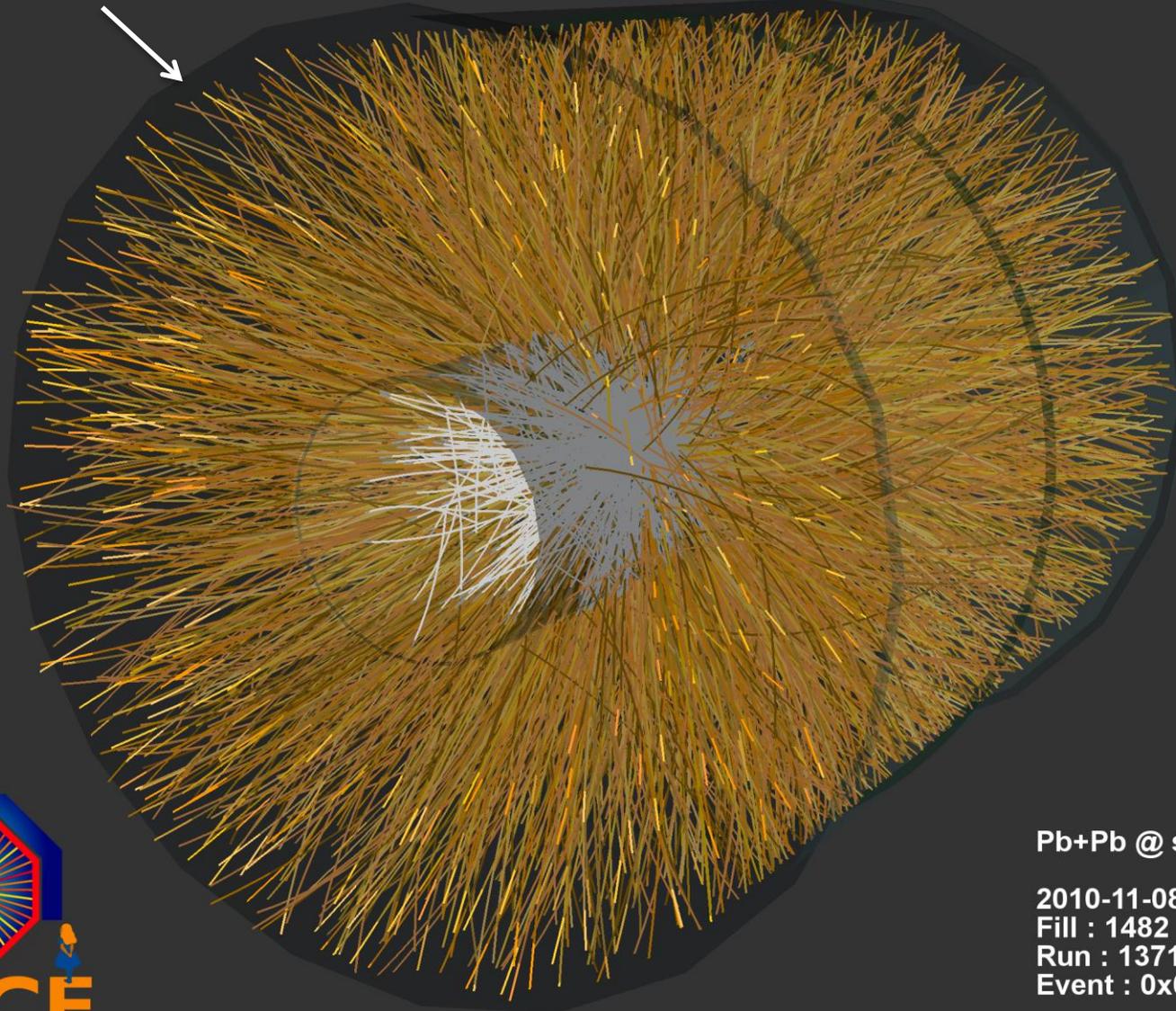
**Fig. 34:** Specific energy loss ( $dE/dx$ ) in the TPC vs. particle momentum in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. The lines show the parametrizations of the expected mean energy loss.

# Регистрация треков от протон-протонного соударения в детекторе ALICE



Базовые объекты в НЕР-данных: **событие (event)** и **трек частицы (track)**.

Это – реконструированные треки частиц, которые родились в одном «событии» – столкновении двух ядер свинца.



Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV

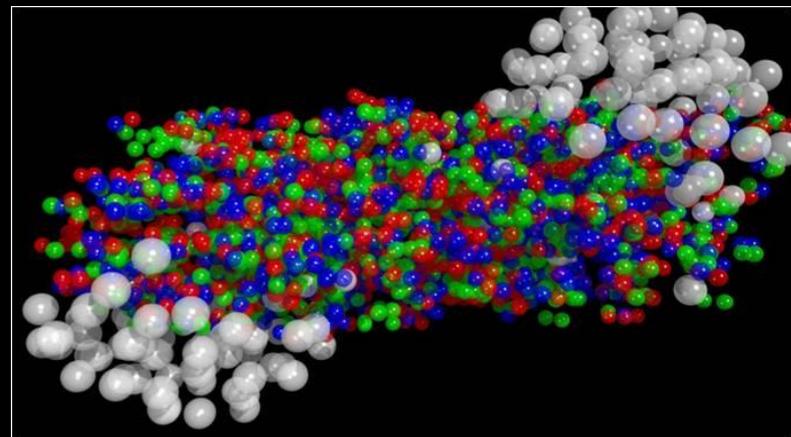
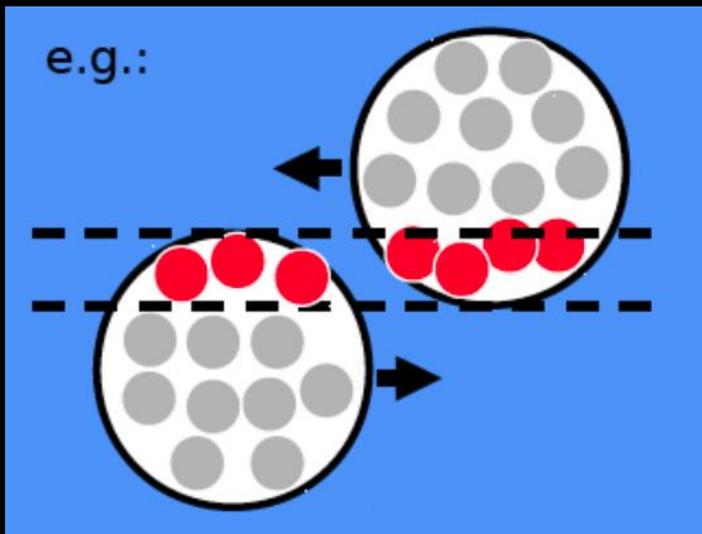
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

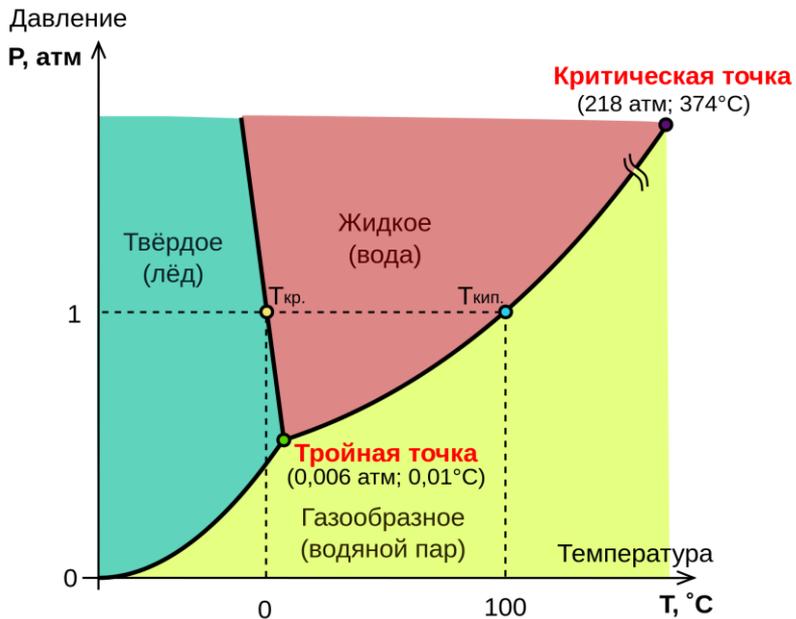
Event : 0x00000000D3BBE693

# Соударения ядер – путь к новому состоянию вещества

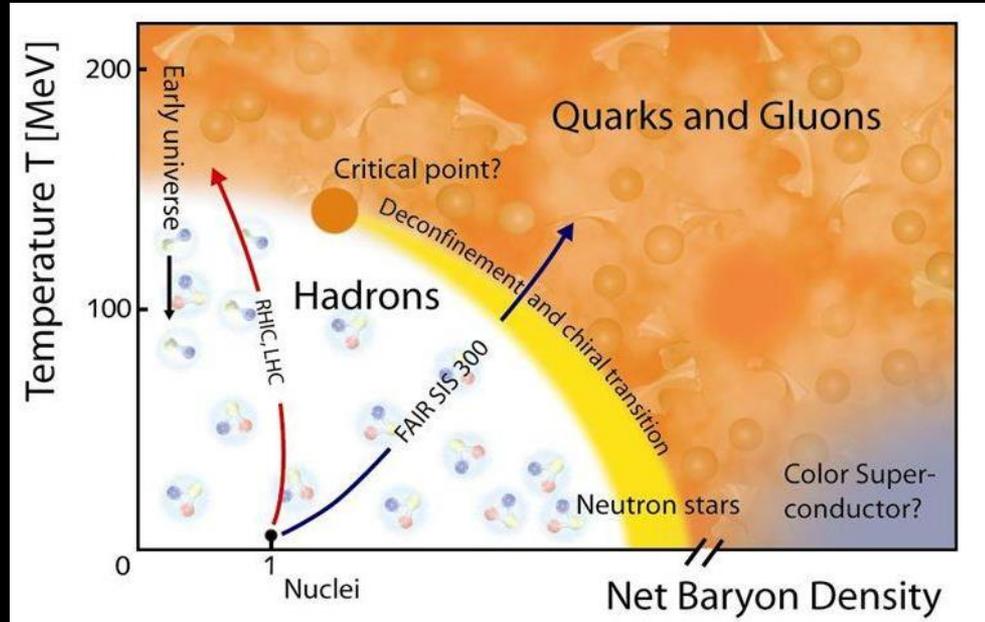


# Фазовая диаграмма ядерной материи

Вода:

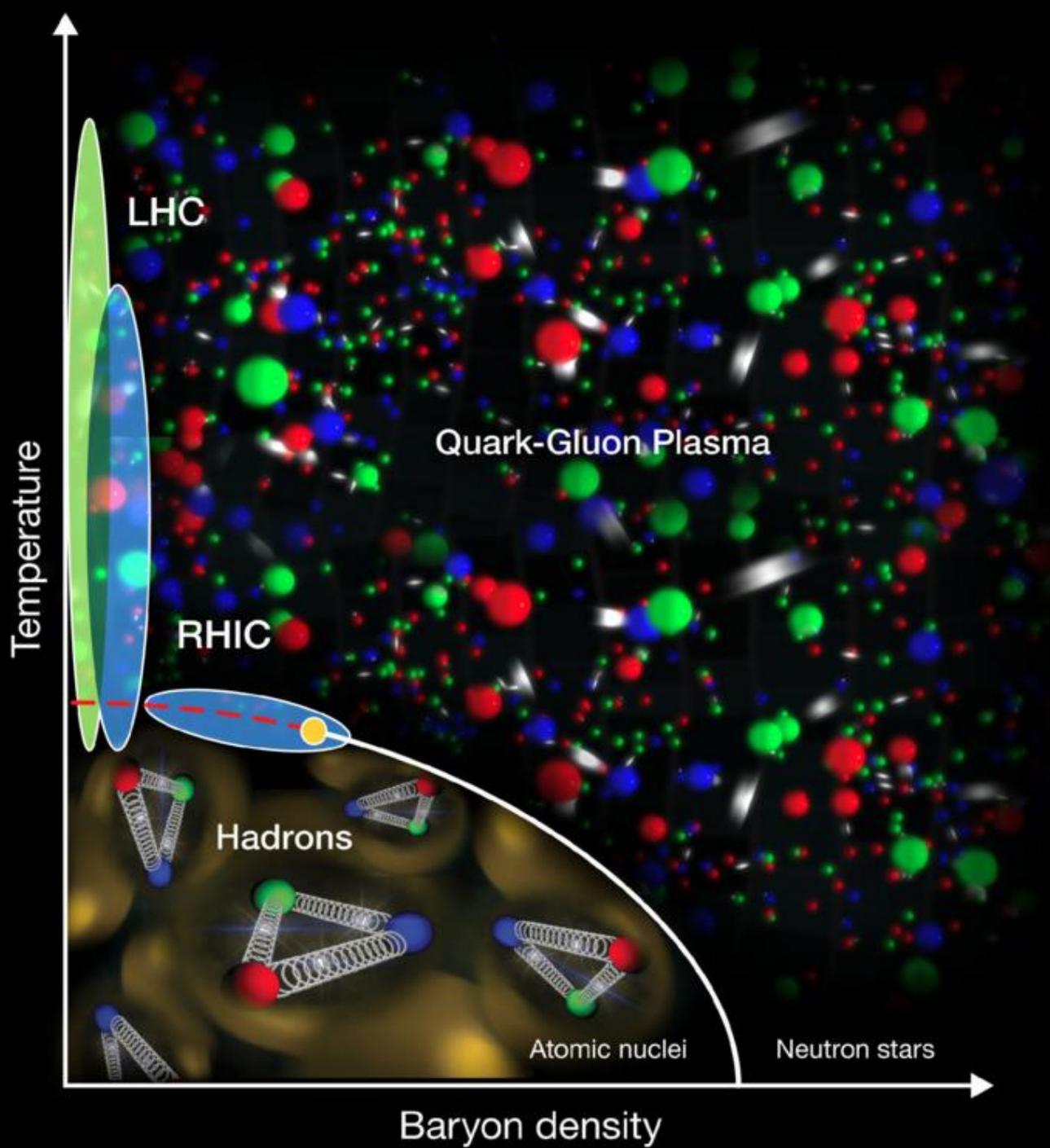


Ядерная материя:



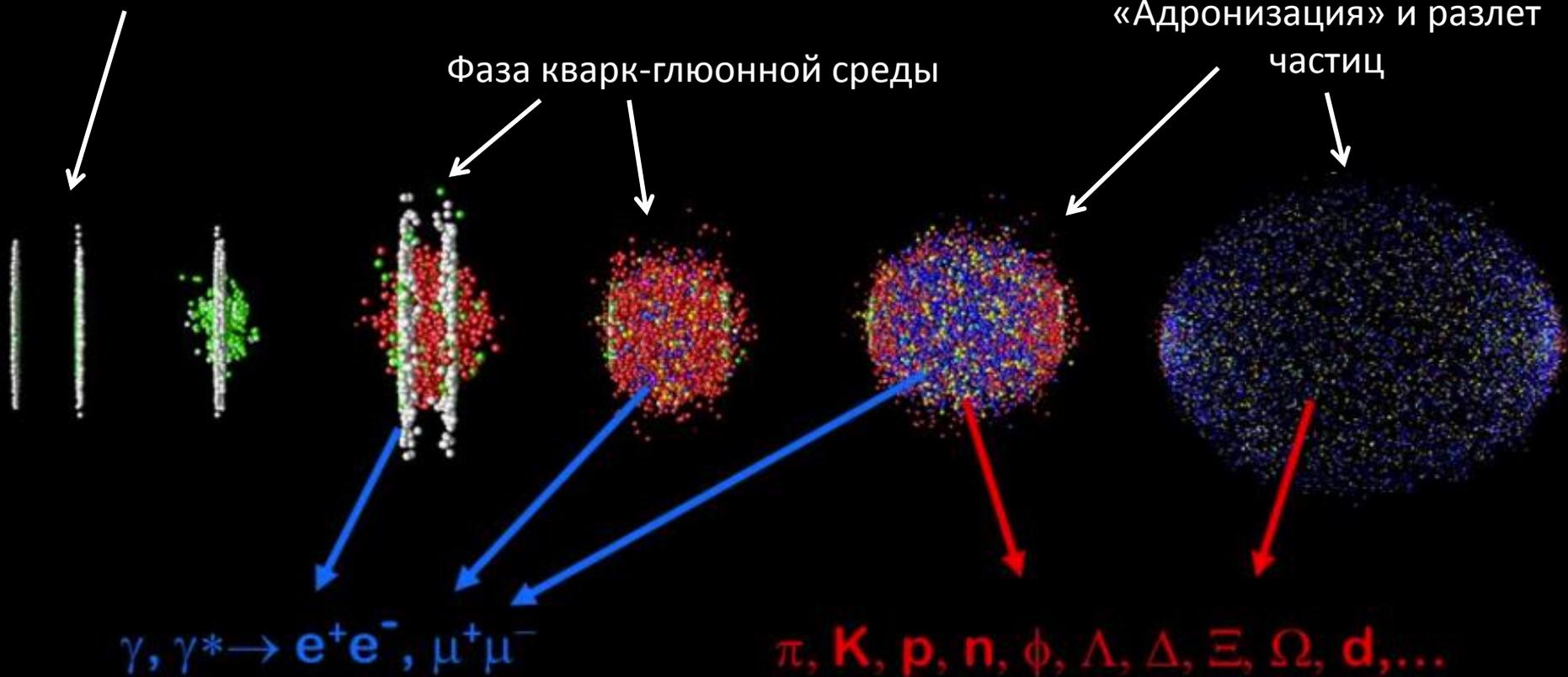
Теория сильного взаимодействия – **квантовая хромодинамика** – предсказывает, что при высоких температурах и плотностях кварки и глюоны больше не связаны внутри адронов.

→ Новое состояние материи со свободными кварками и глюонами – «кварк-глюонная плазма»!



# Столкновение двух ядер свинца: эволюция системы со временем

Ускоренные ядра представляют собой «блины»  
из-за релятивистского Лоренц-сжатия



**Если достигается состояние кварк-глюонной плазмы,  
то должен возрасти выход странных частиц!**

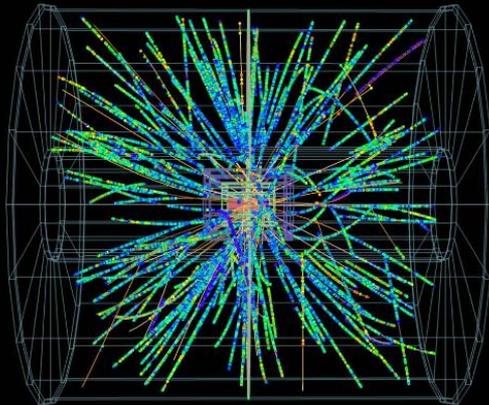
# «Зоопарк» частиц:

## Важные замечания:

1. В детекторе мы видим только частицы с достаточно большим временем жизни, позволяющим их зарегистрировать:

$\gamma, e, \mu, \pi, K, p, n$

2. Частица, чтобы быть зарегистрированной, должна испытать какое-то взаимодействие с детектором.



<http://pdg.lbl.gov>

~ 180 Selected Particles

18

$\pi^{\pm}, W^{\pm}, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}, \pi^{\pm}, \pi^0, \eta, f_0(600), g(700),$   
 $\omega(782), \eta'(958), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235),$   
 $a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320),$   
 $f_0(1370), f_1(1420), \omega(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450),$   
 $f_0(1500), f_2'(1525), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680),$   
 $g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010),$   
 $a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^{\pm}, K^0, K_S^0, K_L^0, K^*(892),$   
 $K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_0^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680),$   
 $K_2(1770), K_3^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^{\pm}, D^0, D^*(2007)^0,$   
 $D^*(2010)^{\pm}, D_1^*(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^{\pm}, D_s^{\pm}, D_s^*(\pm),$   
 $D_{s1}(2536)^{\pm}, D_{s2}(2573)^{\pm}, B^{\pm}, B^0, B^*(\pm), B_S^0, B_c^{\pm}, \eta_c(1S), J/\psi(1S),$   
 $\chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160),$   
 $\psi(4415), \Upsilon(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \Upsilon(2S), \chi_{b0}(2P),$   
 $\chi_{b2}(2P), T(3S), \Upsilon(4S), \Upsilon(10860), \Upsilon(11020), p, n, N(1440),$   
 $N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710),$   
 $N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600),$   
 $\Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950),$   
 $\Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1690),$   
 $\Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100),$   
 $\Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670),$   
 $\Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-,$   
 $\Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-,$   
 $\Lambda_c^+, \Lambda_c^0, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c^{\prime+}, \Xi_c^{\prime0}, \Xi(2645),$   
 $\Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0, \Xi_b^-, t, \bar{t}$

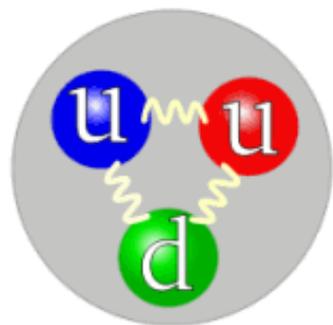
There are many more

Влетевшая в пузырьковую камеру частица столкнулась с протоном в жидком водороде. Пузырьки вдоль траекторий – «треки».

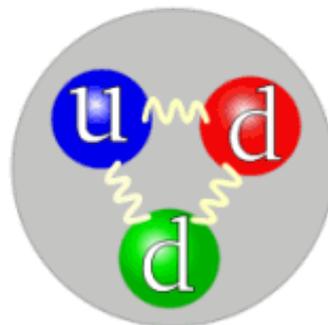


Лямбда-частица  
пролетает несколько сантиметров!

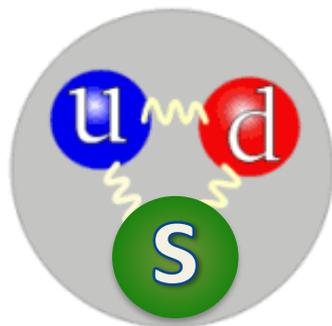
Странные частицы живут долго – видно «топологию распада»!



протон



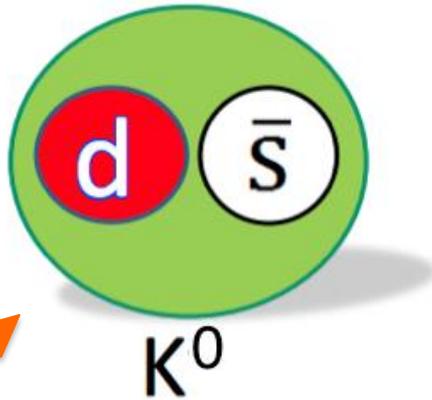
нейтрон



лямбда-частица (Λ)

содержит S-кварк!

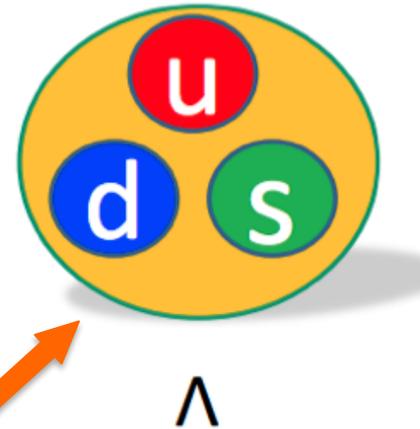
**Странные частицы** – частицы, содержащие хотя бы один странный кварк



$K^0$

**мезон**

состоит из кварка и антикварка

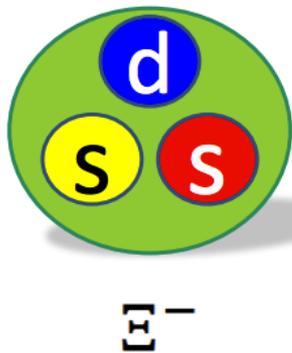
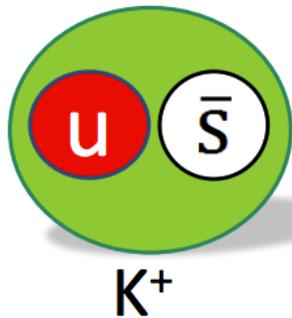


$\Lambda$

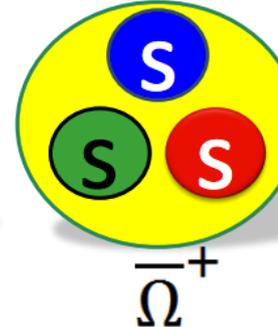
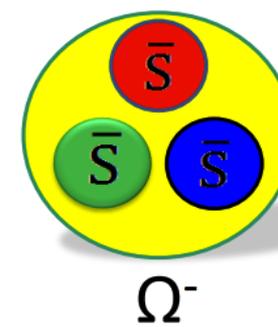
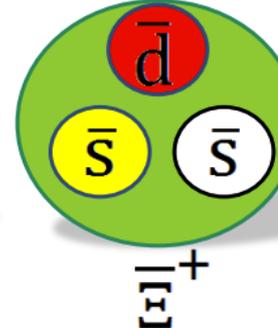
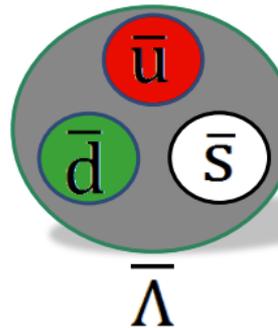
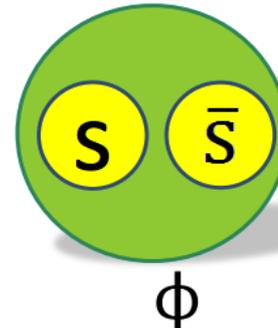
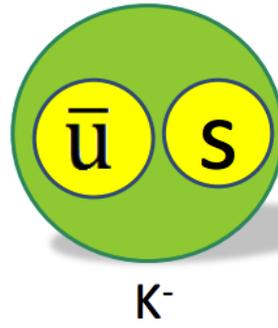
**барион**

состоит из трех кварков  
либо антикварков

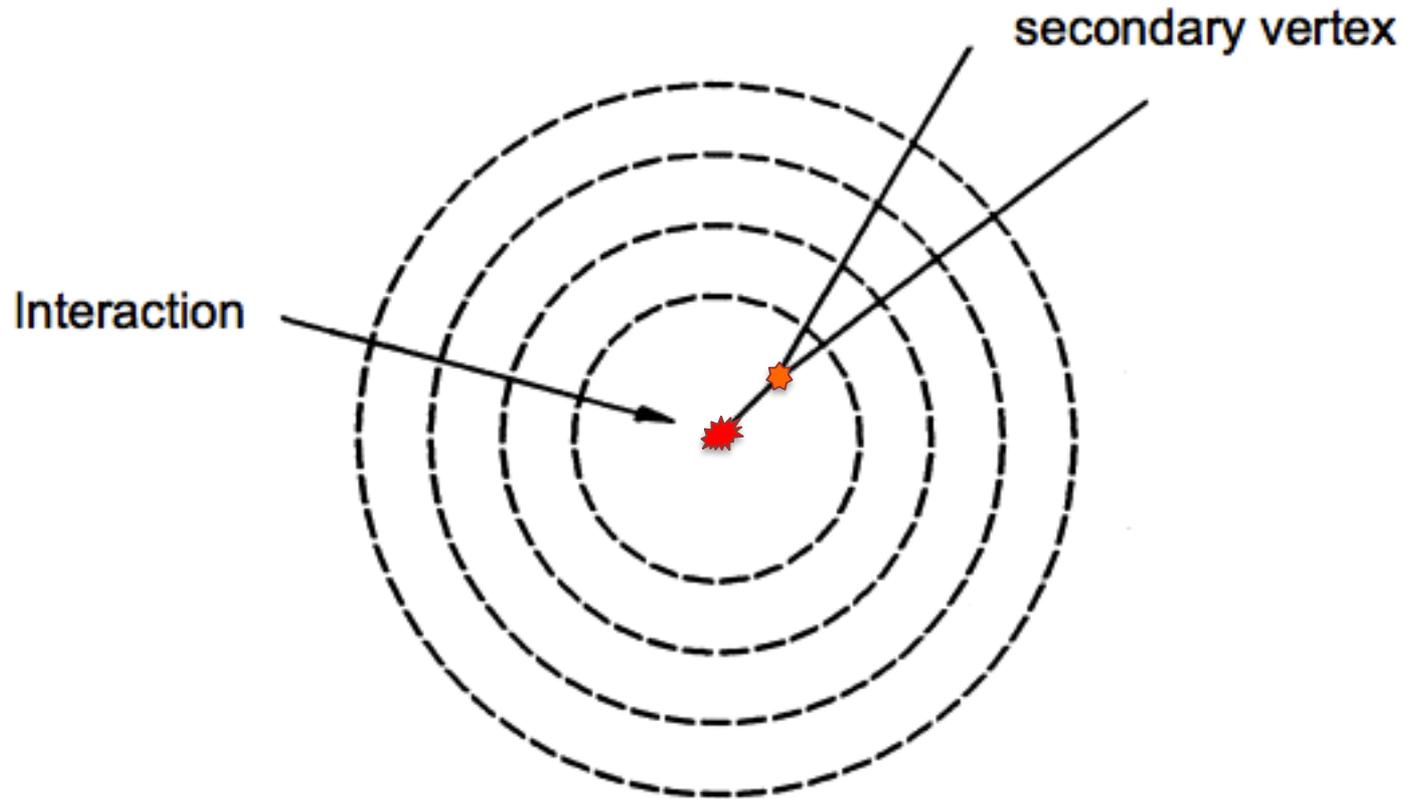
Странные частицы, содержащие «начальный» кварк (*u* или *d*)



Странные частицы, состоящие только из рожденных кварков

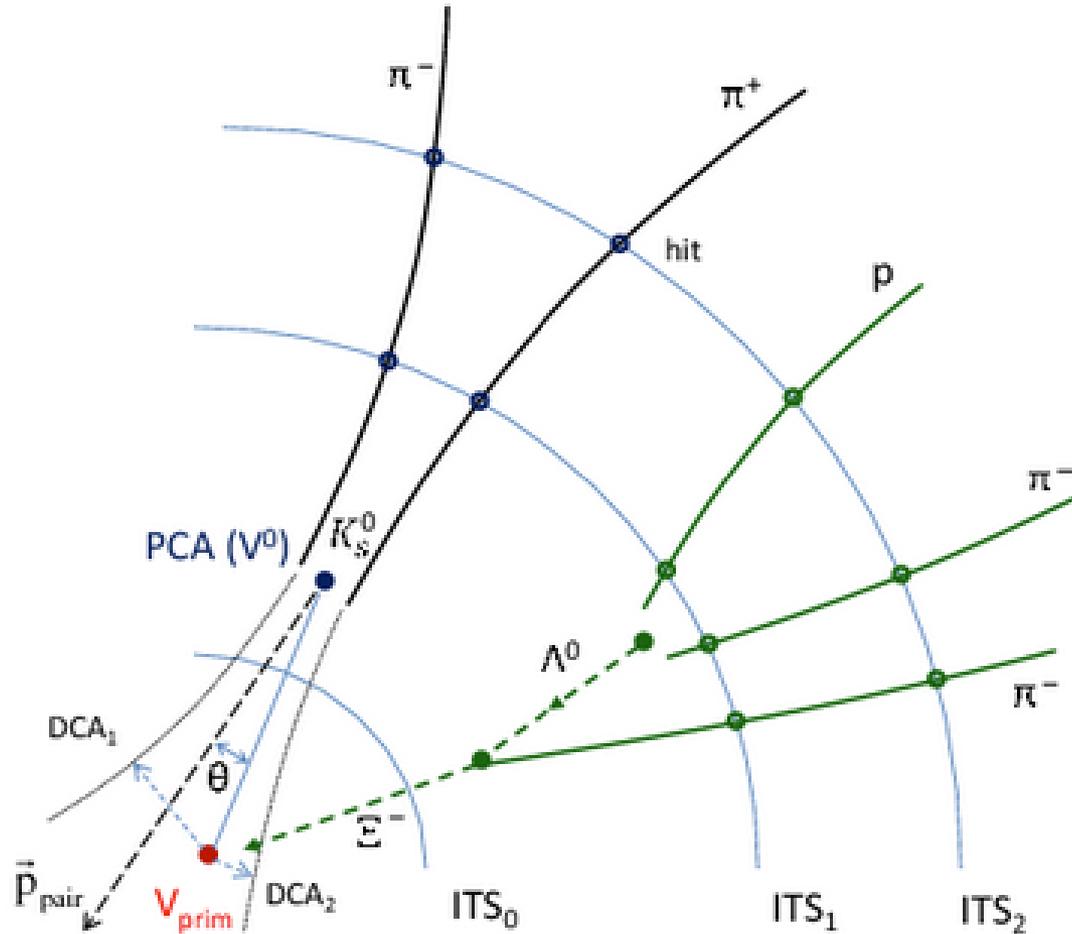


# Распад нестабильной частицы

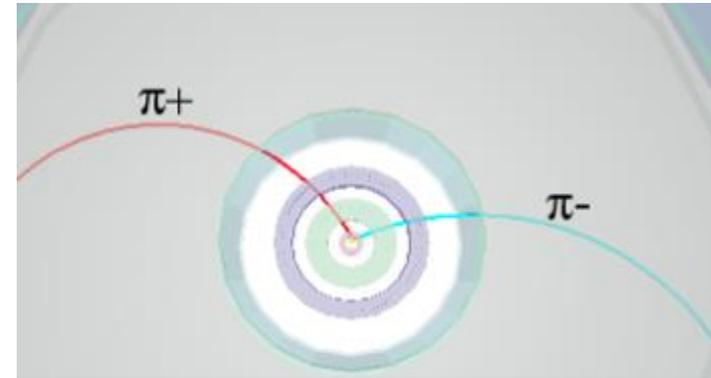
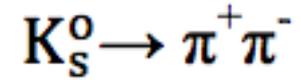
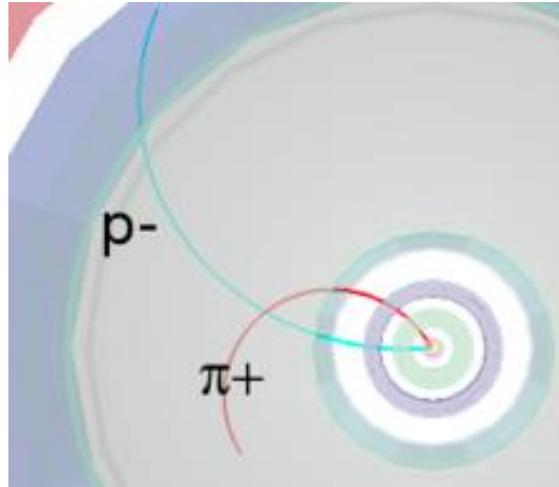
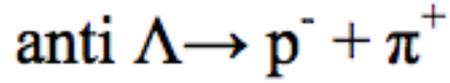
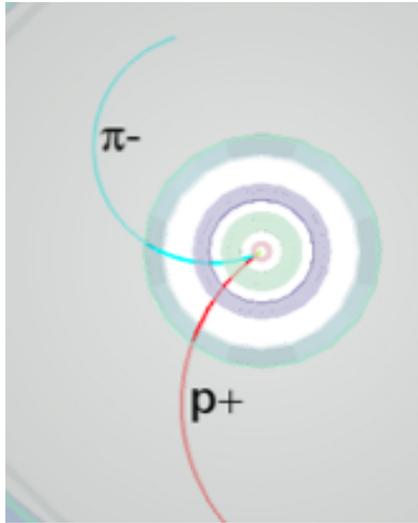
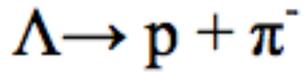


*Термины:* **главная и вторичная вершины**

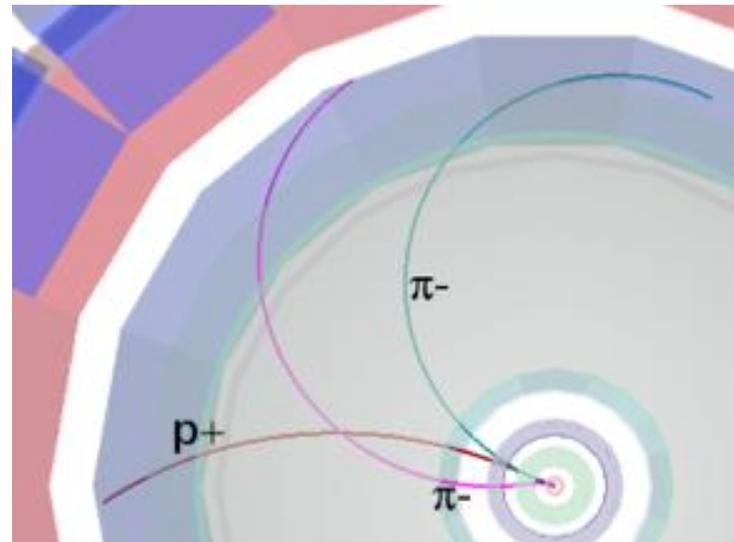
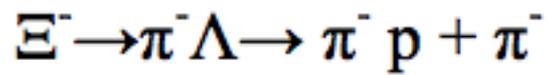
# Более детальный вид «топологии» распадов по измеренным точкам траектории



# Топологии распадов частиц, содержащих странные кварки



*Каскадный распад:*



# Расчет массы исходной частицы

Сохранение энергии

Сохранение импульса

Теории относительности (приняв  $c=1$ )

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

$$E^2 = p^2 + M^2$$



... и для **дочерних** частиц:

$$E_1^2 = p_1^2 + m_1^2$$

$$E_2^2 = p_2^2 + m_2^2$$

**Масса исходной частицы:**

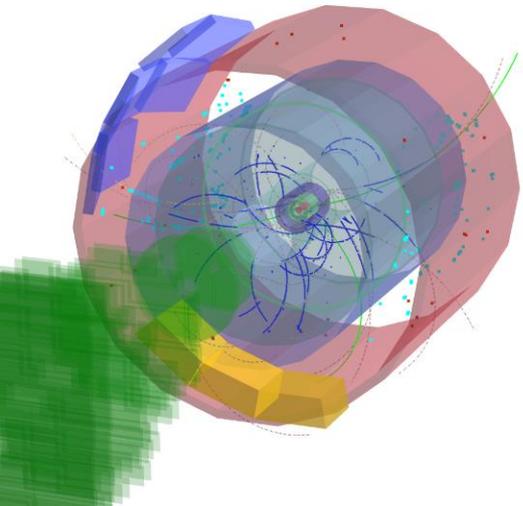
$$M^2 = E^2 - p^2$$

$$= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2$$

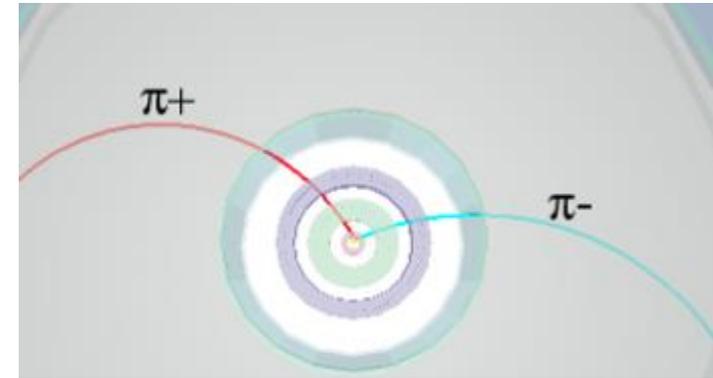
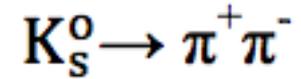
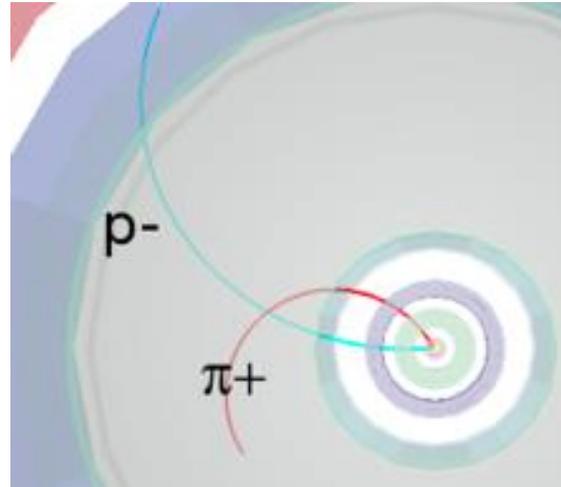
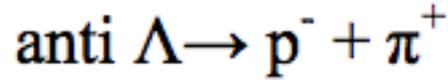
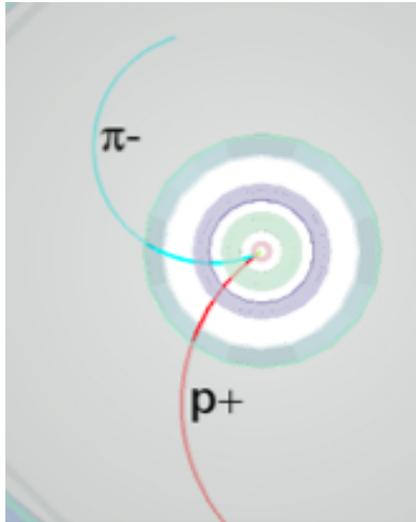
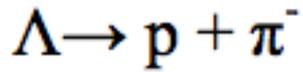
$$= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2$$

# Мастеркласс, часть 1

визуальный поиск странных частиц,  
рожденных в столкновениях протонов на LHC  
и зарегистрированных детектором ALICE



# Топологии распадов частиц, содержащих странные кварки

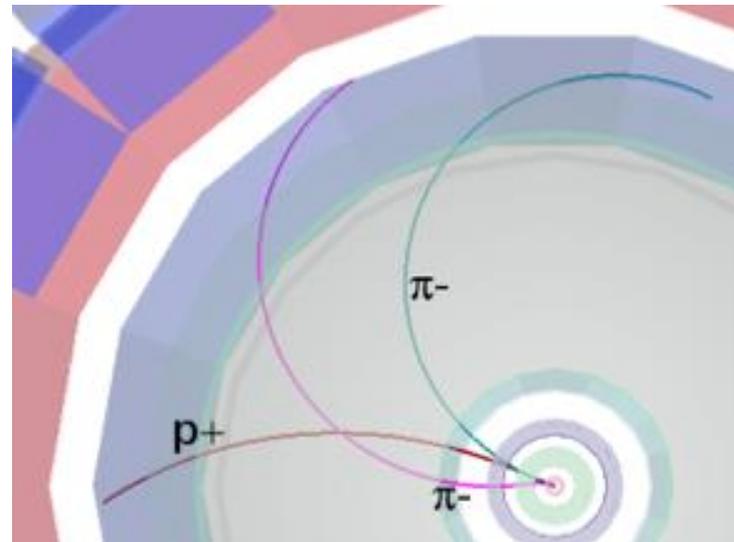
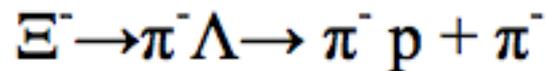


Масса протона = 0.938 ГэВ

Масса пиона = 0.139 ГэВ

Масса электрона = 0.000511 ГэВ

*Каскадный распад:*

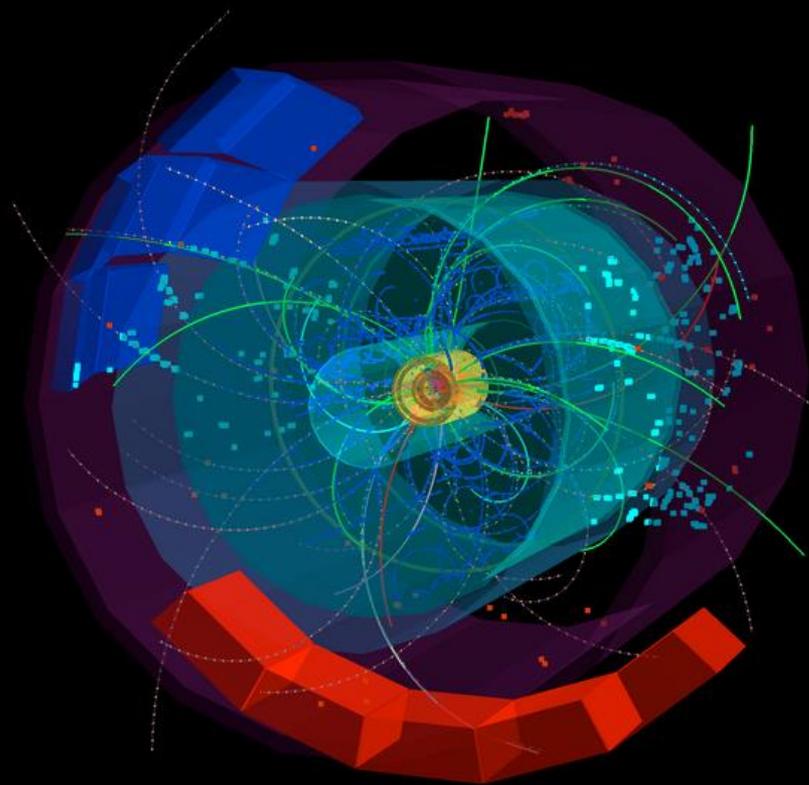


# Итоги мастеркласса (часть 1)

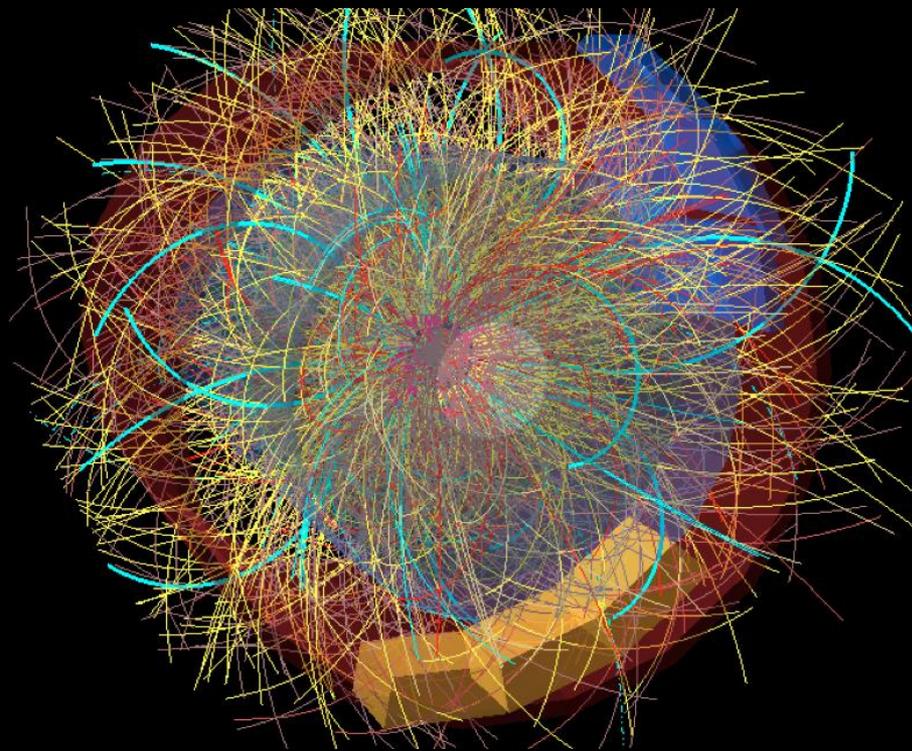
- ✦ Заряженные частицы оставляют в детекторе сигналы («хиты»), по которым реконструируются их траектории («треки»)
- ✦ Заряды и импульсы заряженных частиц определяются благодаря магнитному полю детектора
- ✦ Системы детектора ALICE умеют определять типы заряженных частиц
- ✦ Странные частицы реконструируются
  - ✦ по «топологии» их распадов
  - ✦ по инвариантной массе дочерних частиц

# Столкновения в детекторе ALICE

протон-протонные



Pb-Pb



Отобранные события направляются сперва в  
**Вычислительный центр ЦЕРН**



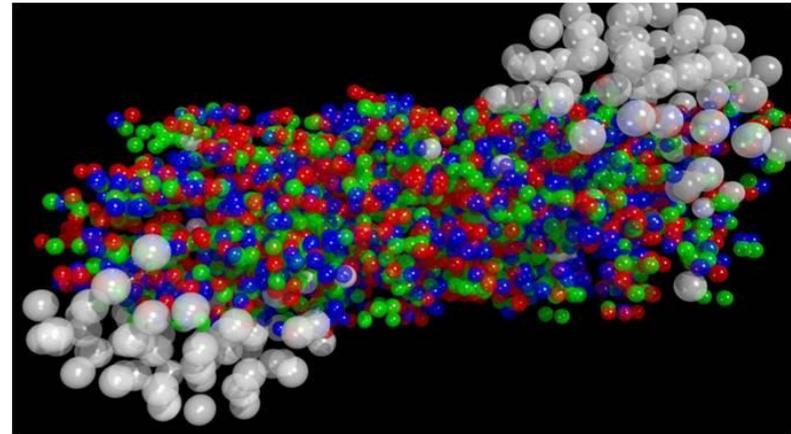
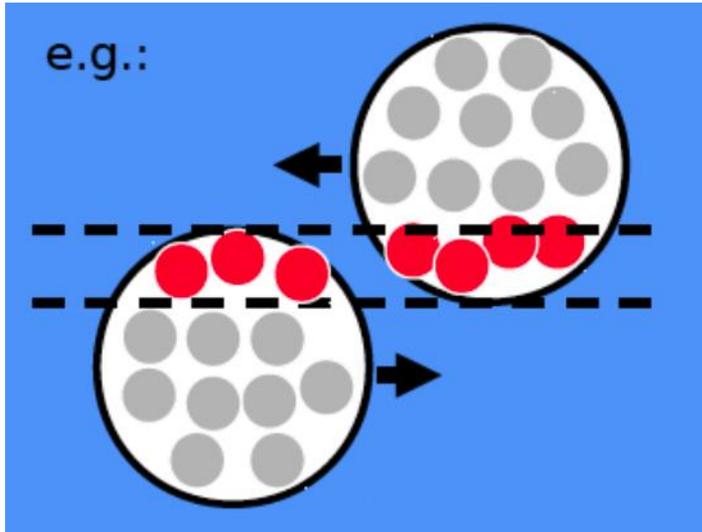
Далее для хранения анализа и данные с БАК поступают во всемирную распределенную вычислительную систему GRID



# Физики пишут код анализа данных

```
// Event loop -----  
for ( int eventId = 0; eventId < data->GetNumberOfEvents(); eventId++ )  
{  
    Event *event = data->GetEvent(eventId);  
  
    // Track loop -----  
    for (int trackId = 0; trackId < event->GetNumberOfTracks(); trackId++)  
    {  
        Track *track = event->GetTrack( trackId );  
  
        if ( !track ) {  
            Printf("ERROR: Could not receive track %d", trackId);  
            continue;  
        }  
  
        //Track variables  
        double mass = track->GetParticleMass();    // mass  
        double eta = track->GetEta();    // eta  
        double phi = track->GetPhi();    // phi  
  
        histogram->Fill( phi );  
        // do analysis ...  
        // fill histograms  
    }  
}
```

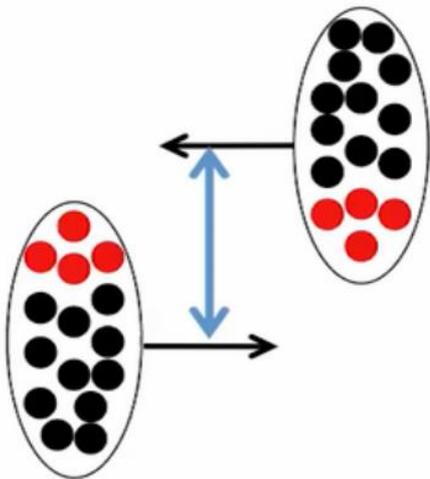
# «Центральность» соударения ядер



- ❖ С ростом центральности меняются многие параметры события, например, количество рожденных частиц
- ❖ Наблюдаются также **«коллективные» эффекты**, например, **увеличение выхода странных частиц**

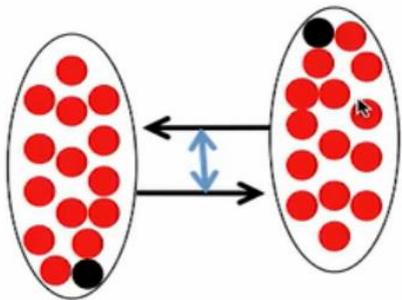
# «Центральность» соударения ядер

«Периферическое» соударение:



- ✧ Большое расстояние между центрами ядер
- ✧ Малое число **нуклонов-участников**
- ➔ Малая множественность рожденных частиц

«Центральное» соударение:

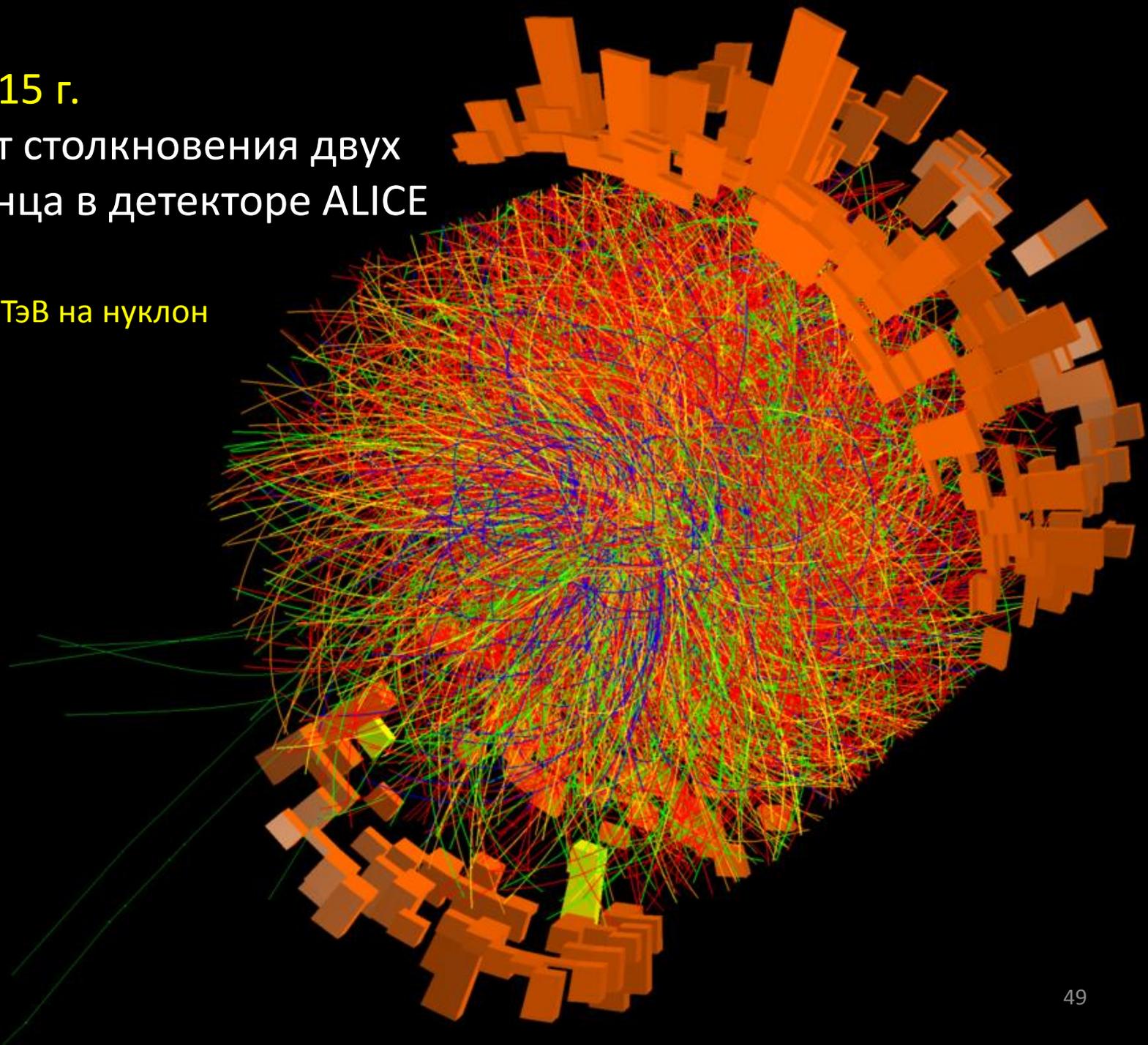


- ✧ Малое расстояние между центрами ядер
- ✧ Большое число **нуклонов-участников**
- ➔ Много рожденных частиц

Ноябрь 2015 г.

Частицы от столкновения двух  
ионов свинца в детекторе ALICE

Энергия: 5.02 ТэВ на нуклон

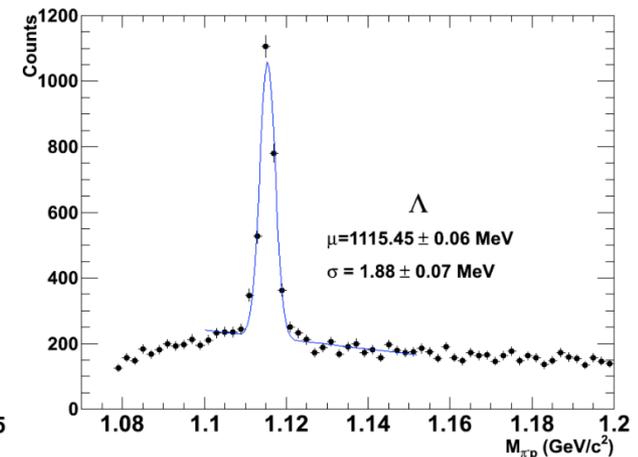
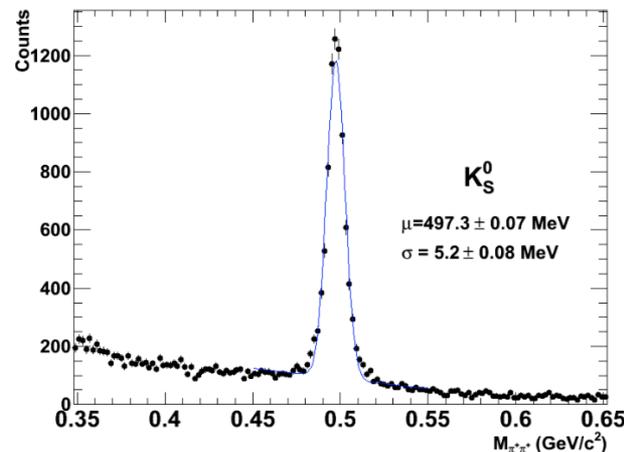
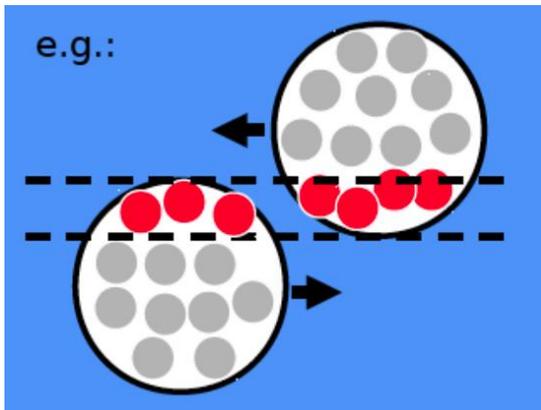


# Мастеркласс, часть 2

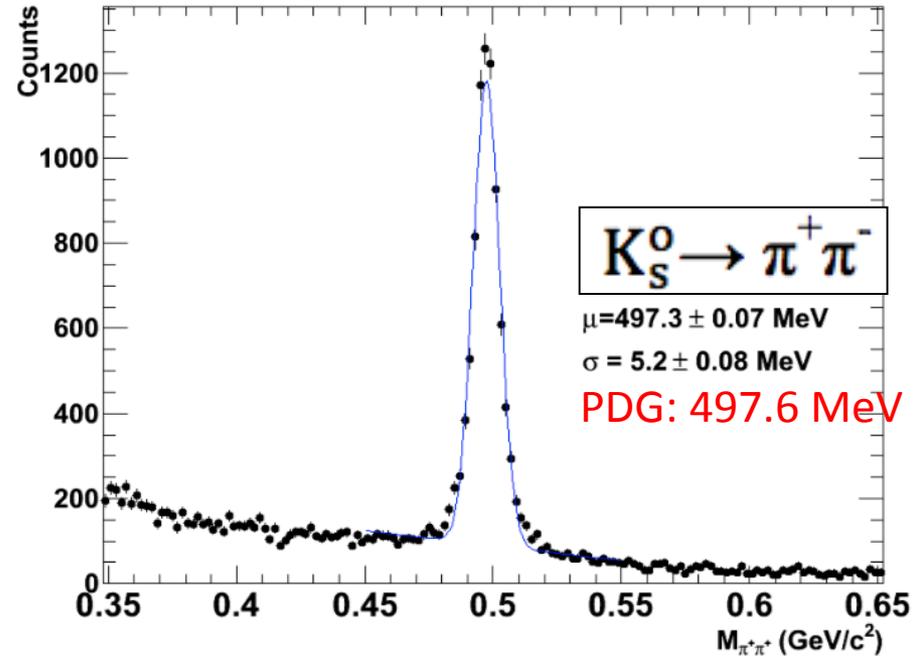
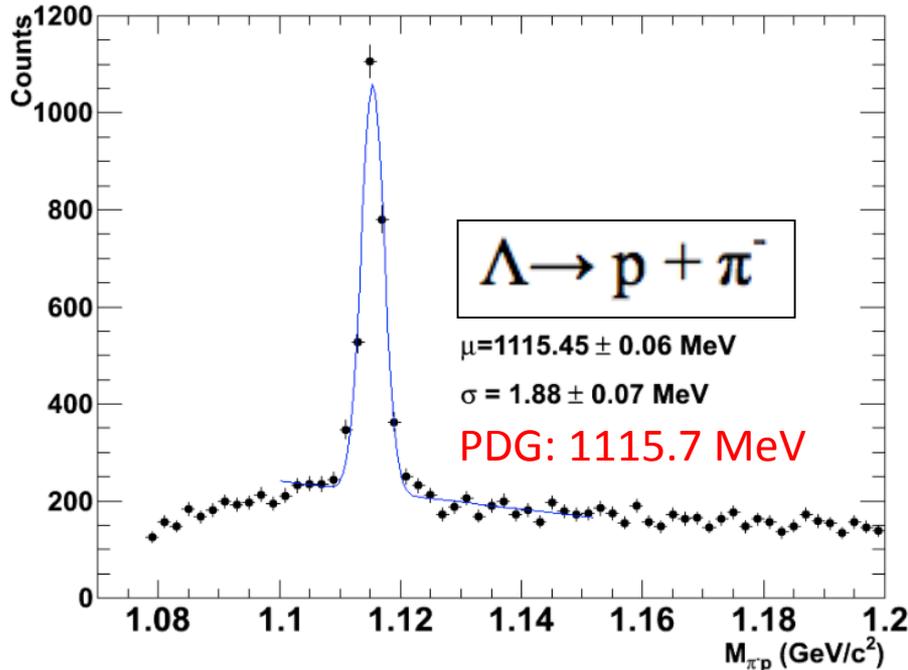
## Автоматический анализ большой статистики событий (large-scale analysis)

### Задача:

- 1) Произвести аппроксимацию распределений по инвариантной массе в Pb-Pb событиях (парабола + Гаусс)
- 2) Определить выход  $K^0$ ,  $\Lambda$  и анти- $\Lambda$  после вычитания фона



# Распределения по инвариантным массам



## Ширина пика:

- ✦ Во-первых, ширина увеличивается из-за ограниченной точности восстановления треков в наших детекторах.
- ✦ Во-вторых, существует естественная ширина пика из-за принципа неопределенности Гейзенберга.

$$\Delta E \Delta t \gtrsim h$$

# Расчет увеличения выхода странности

## **Определения:**

### **Выход частиц (определенного сорта)**

= число частиц, рожденных в соударении

### **Эффективность регистрации**

=  $N$  частиц (измеренное) /  $N$  частиц (рожденное в соударении)

### **Выход частиц (определенного сорта) в эксперименте**

=  $N$  частиц (измеренное) / (эффективность  $\times$  число событий)

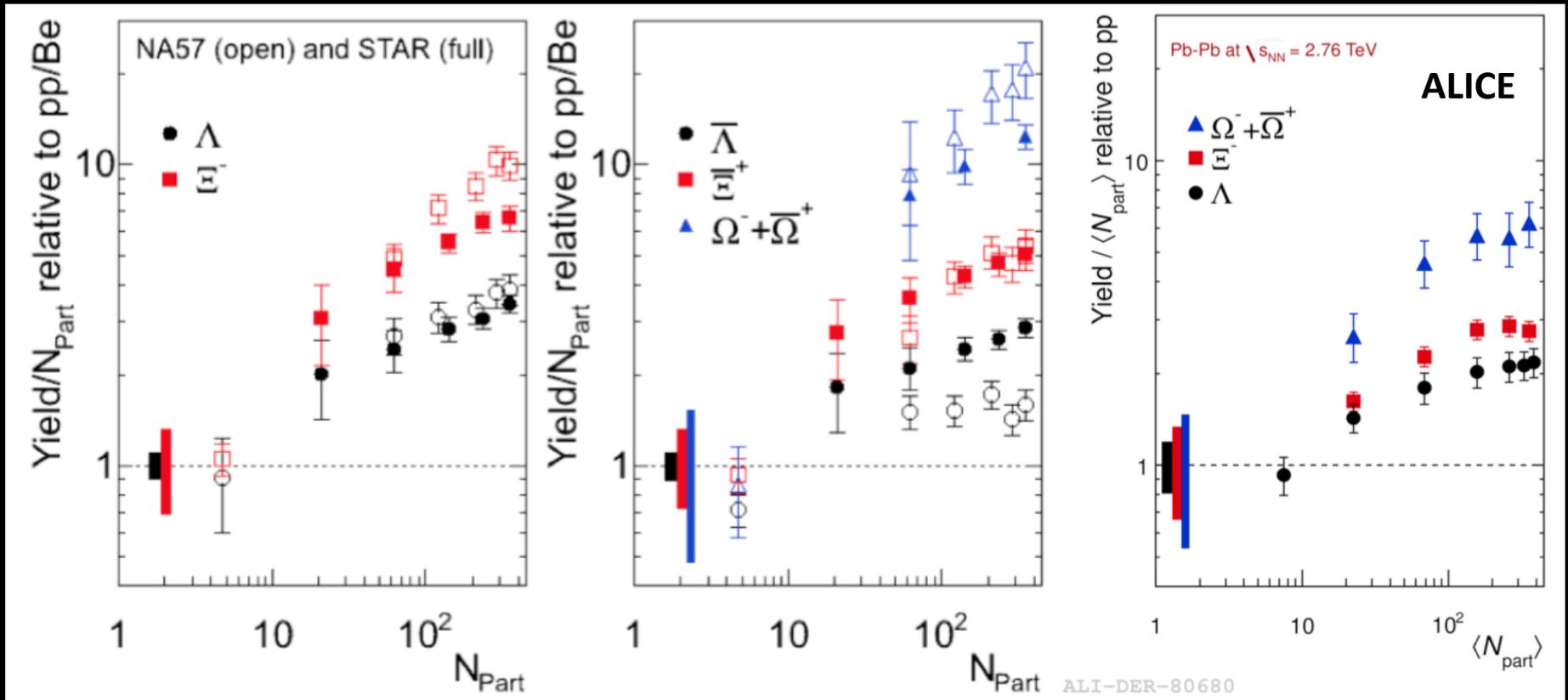


## **Расчет фактора увеличения выхода странных частиц:**

выход частиц, нормированный на число нуклонов-участников соударения, и разделенный затем на выход частиц в протон-протонных соударениях.

СБОР ДАННЫХ В ТАБЛИЦУ

Увеличение выхода странных частиц в ядро-ядерных соударениях по отношению к протон-протонным в зависимости от числа нуклонов-участников:



Увеличение выхода сильнее для частиц с большим числом s-кварков! (в  $\Omega$  их 3 штуки, в  $\Xi$  их 2, в  $\Lambda$  – только 1).

## Итоги мастеркласса (часть 2)

- ✦ Анализ большого количества данных невозможно провести вручную  
→ требуется автоматический анализ! (т.е. написание программ)
- ✦ Выход странности возрастает с ростом центральности соударений – в соответствии с ожиданиями в случае формирования кварк-глюонной плазмы!

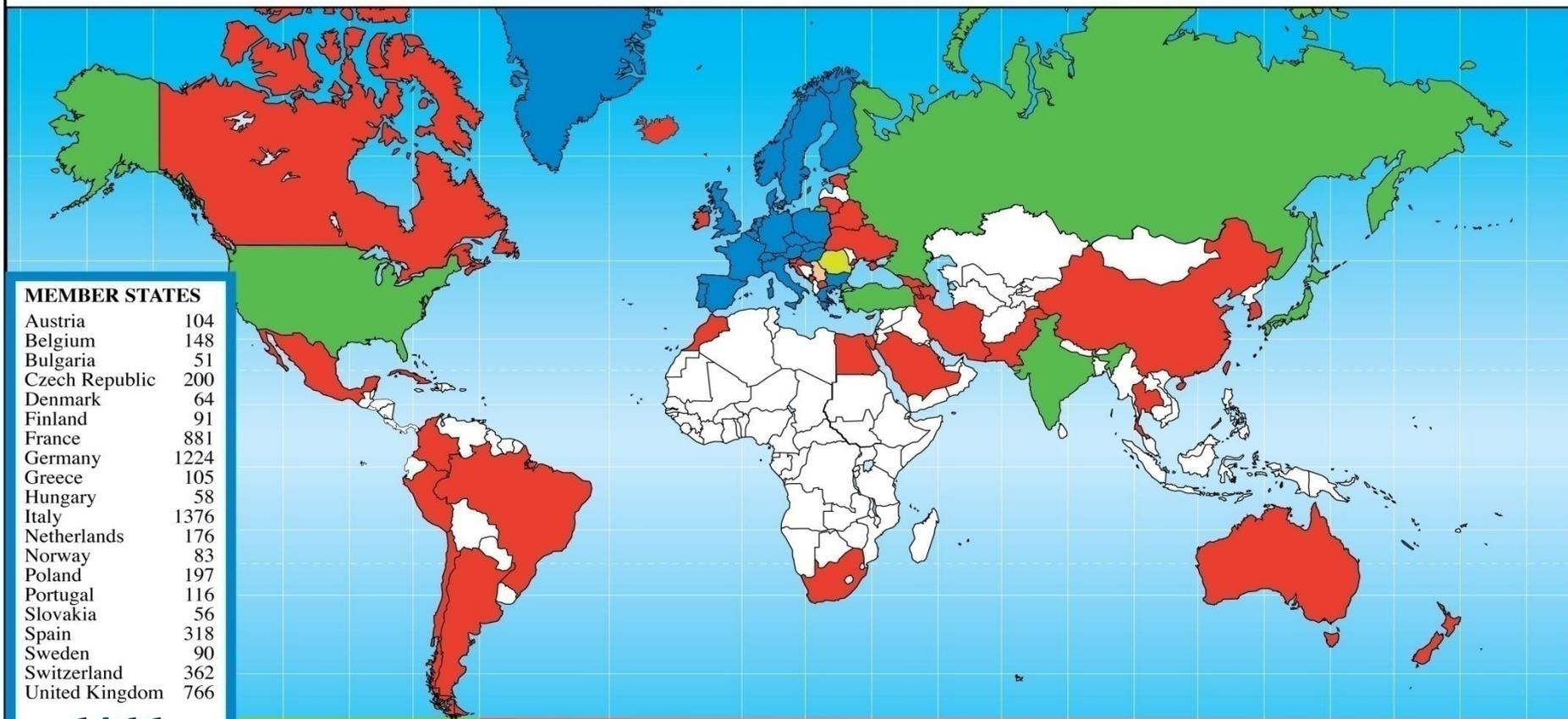
# Дополнительные слайды

# Комната управления детектором ALICE



# Наука все более и более глобальна!

## Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 2 September 2013



### MEMBER STATES

Austria	104
Belgium	148
Bulgaria	51
Czech Republic	200
Denmark	64
Finland	91
France	881
Germany	1224
Greece	105
Hungary	58
Italy	1376
Netherlands	176
Norway	83
Poland	197
Portugal	116
Slovakia	56
Spain	318
Sweden	90
Switzerland	362
United Kingdom	766

**6466**

### OBSERVERS

India	154
Japan	224
Russia	899
Turkey	106
USA	1787

**3170**

### CANDIDATE FOR ACCESSION

Romania	82
---------	----

### ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

Israel	57
Serbia	30

### OTHERS

Chile	7	Georgia	10	New Zealand	6
China	130	Iceland	4	Pakistan	21
China (Taipei)	70	Iran	22	Peru	2
Colombia	11	Ireland	7	Saudi Arabia	3
Croatia	25	Korea	103	Slovenia	25
Azerbaijan	2	Lithuania	16	South Africa	31
Belarus	23	Mexico	40	Thailand	6
Brazil	110	Montenegro	1	T.F.Y.R.O.M.	1
Canada	154	Morocco	9	Ukraine	26
Estonia	18				

**987**



# Вместо заключения

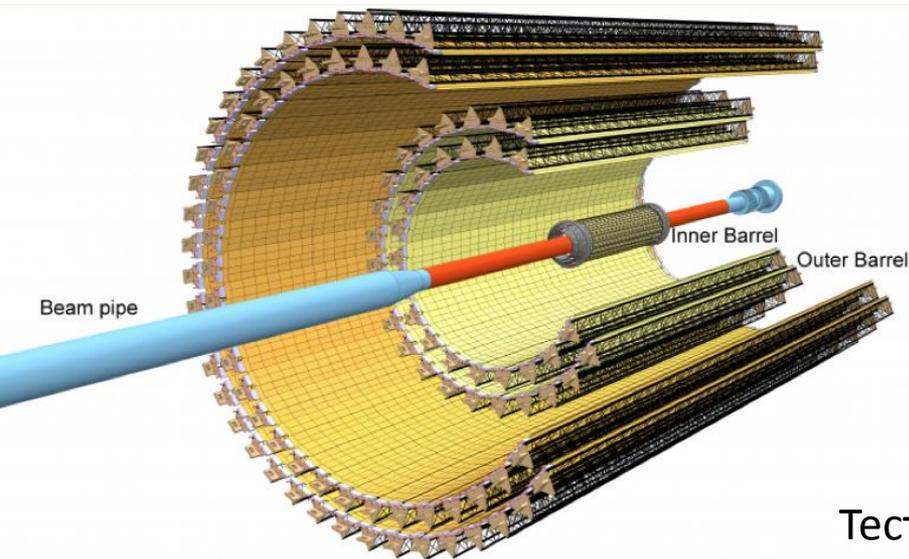
- в проекты физики высоких энергий вовлечены люди с разнообразными специализациями:
  - физики-теоретики, физики-экспериментаторы («детекторщики» и «анализаторы данных»), инженеры и техники
  - ... а также IT-специалисты (без сегодня них никуда!) и административные кадры
- Для работы с данными физики частиц нужно не только знать теорию – нужно быть подкованным всесторонне: физика, математика, программирование, понимание как работает «железо»
- важно владеть современными языками программирования! (C++, Python)
- ... и английским языком! ( а также фр., нем., итал. и др.)
- наконец, нужно умение изложить результат и выступить с докладом

Открытия не совершаются сиюсекундно – нужно длительное время набирать статистику событий и тщательно выделять из «мусора» слабые сигналы

# Мероприятия, проводимые ЦЕРН:

- Летние студенческие программы
- Краткосрочные и долгосрочные контракты для специалистов (ПИЯФ, ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, но не только!)
- Видеоконференции
- Экскурсии для школьников
- Музеи для частных посетителей
- Мастерклассы по анализу данных
- CERN Opendata project

# Обновленная трековая система ALICE после 2019 г.



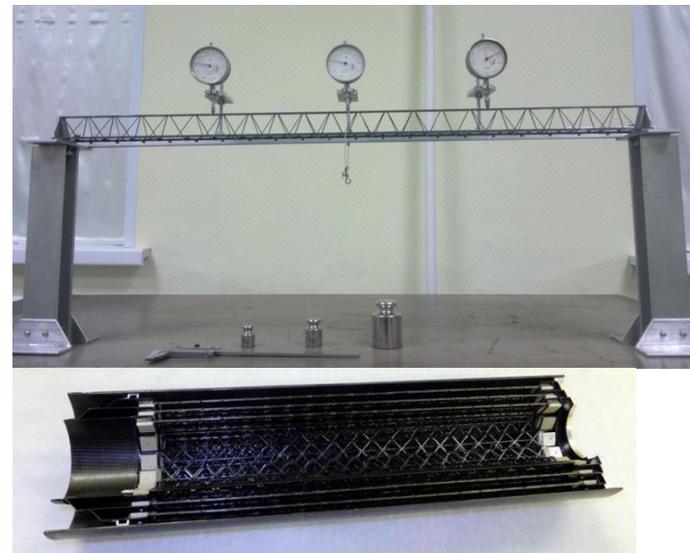
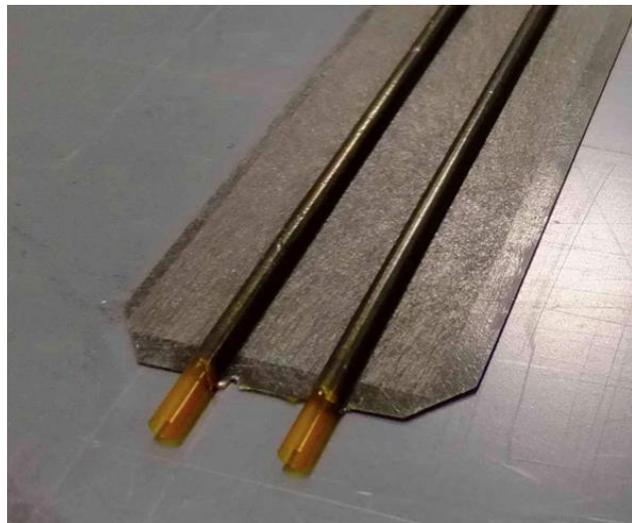
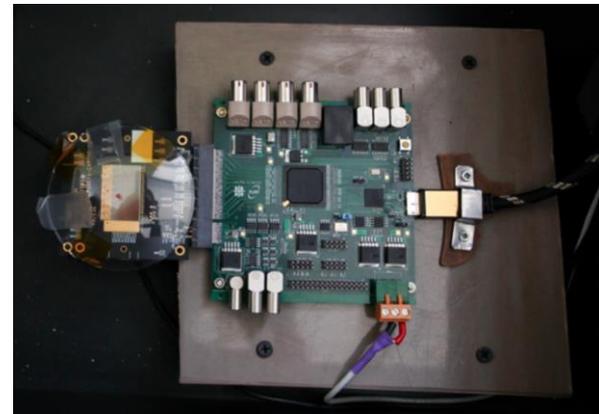
- 7 слоев вместо 6ти
  - новые чипы с пикселями
- высокоточная реконструкция распадов частиц с  $c$  и  $b$  кварками

## Разработки в СПбГУ:

Система охлаждения:

Температурные и механические испытания ферм:

Тестирования матриц ALPIDE на стенде



# НЕИНТЕРЕСНЫЙ СНИМОК: ВЫБРАСЫВАЕМ

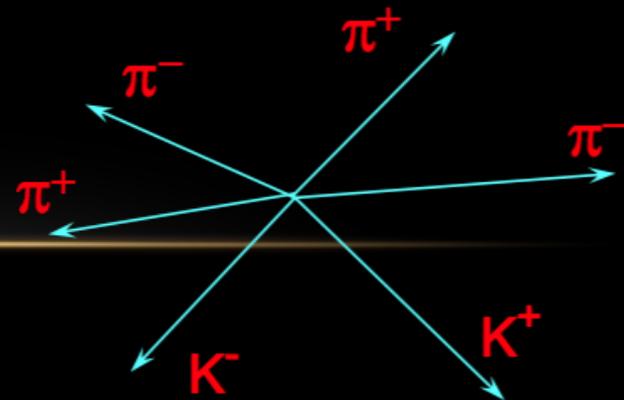
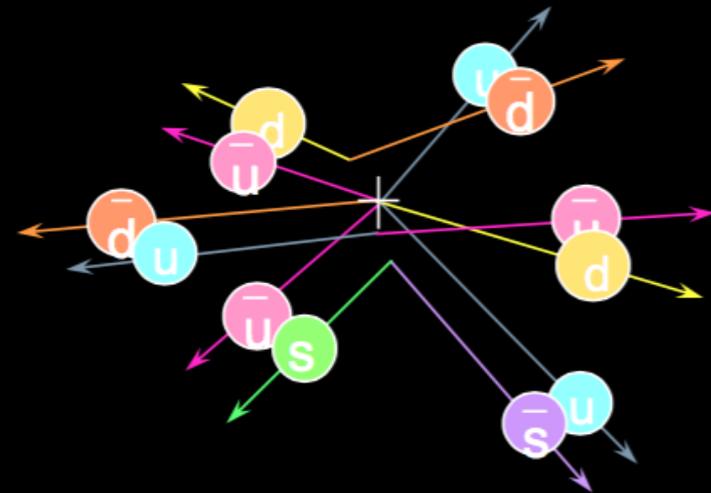


- Пример столкновения протона и антипротона:

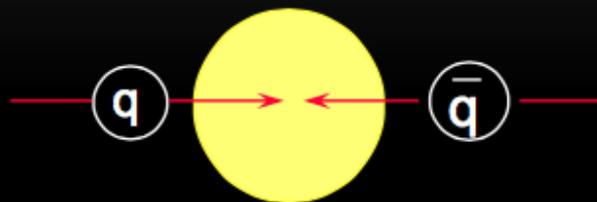
- они состоят из кварков и глюонов, которые нельзя разъединить

- Сталкиваются сразу несколько протонов в сгустке, а в каждом протоне несколько частиц

- И чаще всего происходит нечто не очень интересное:



# ИНТЕРЕСНЫЙ СНИМОК: ХРАНИМ

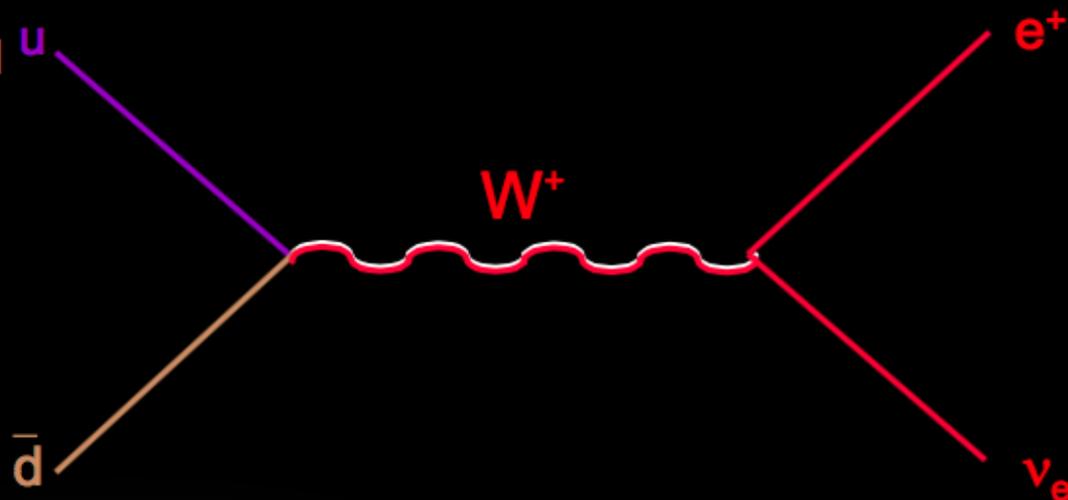


Аннигиляция кварка и антикварка

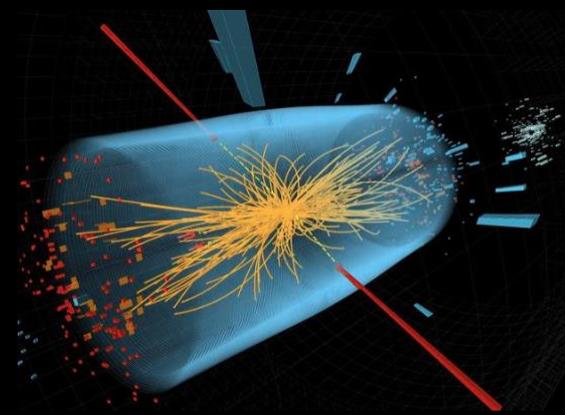
Пример: рождение  $W$ -бозона и его распад на позитрон и нейтрино

(в  $10^7$  раз реже, чем пред.)

(Фейнмановская диаграмма в пространстве-времени)



# Трудности отбора интересных событий



- Столкновения очень частые:  
пересечение сгустков протонов **~10 миллионов** раз в секунду!
- Интересные события очень редки:  
**менее 1 на 10 миллиардов** для наиболее искомых.
- Мы физически можем сохранить лишь **400** событий в секунду.

→ Нужно выбирать и принимать решение быстро!

**Необходимы уровни принятия решений («Триггер»)!**

- Предварительный анализ производится в течение  $\sim 10^{-6}$  с
- Конечный анализ занимает  $\sim 0.1$  с: используется  $\sim 10000$  компьютеров!

# Триггер: несколько уровней отсеивания событий

## Первые уровни:

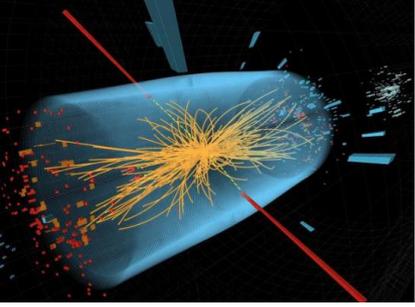
- отбор по грубым оценкам координат и энергии частиц

## Триггер высокого уровня:

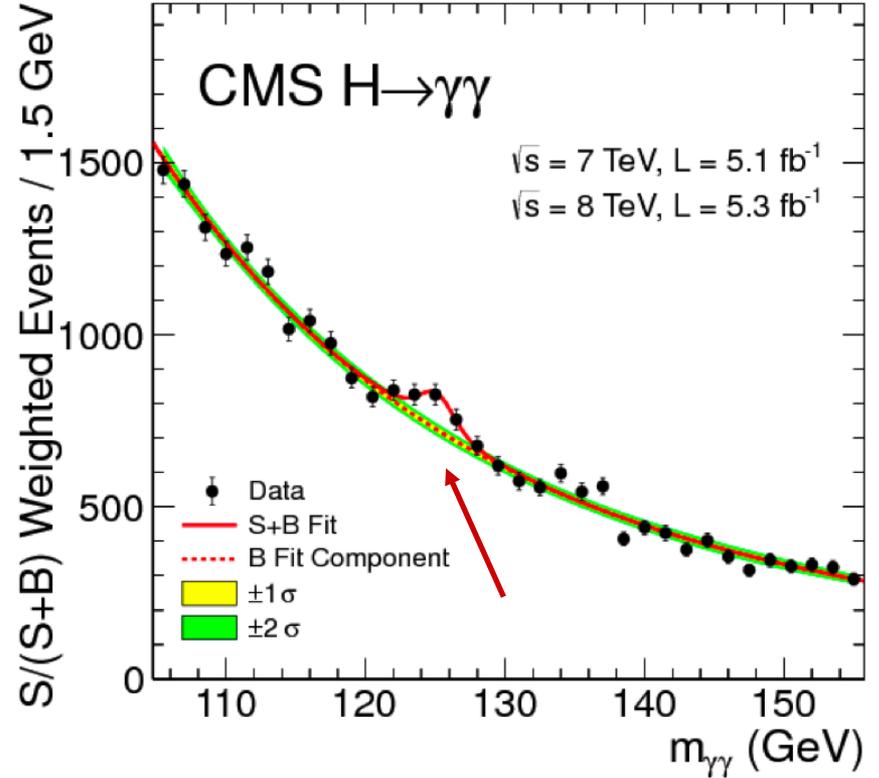
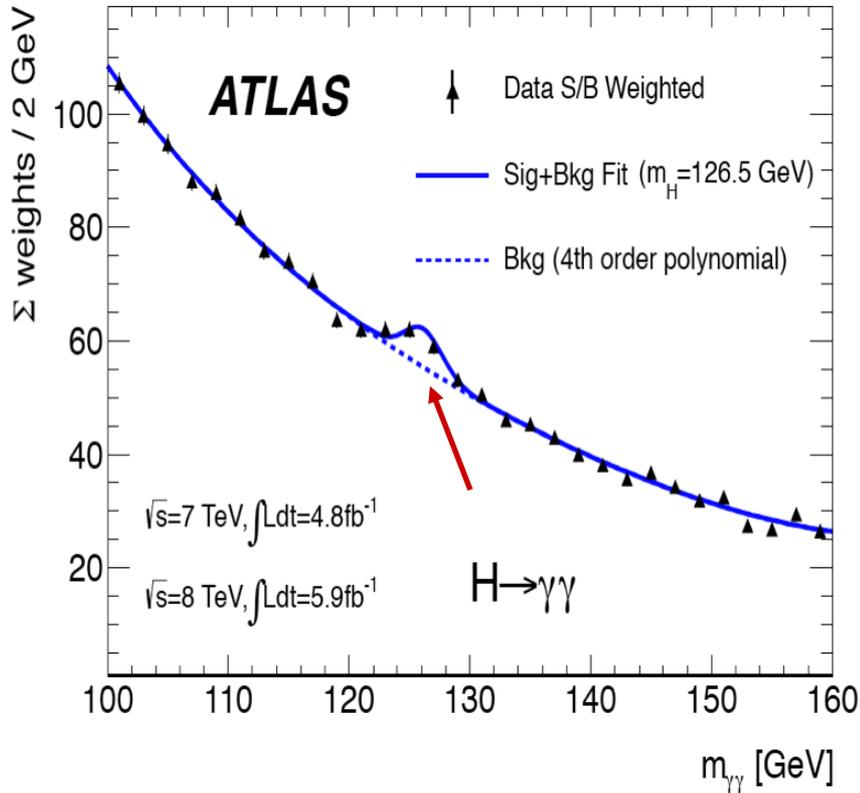
- вычислительные фермы для быстрой реконструкции и анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий

- Результат: 1000 ТБ/с → 100 МБ/с
- Одно событие: ~1 МБ
- Поток: ~3 ПБ/год ( $3 \times 10^{15}$ )

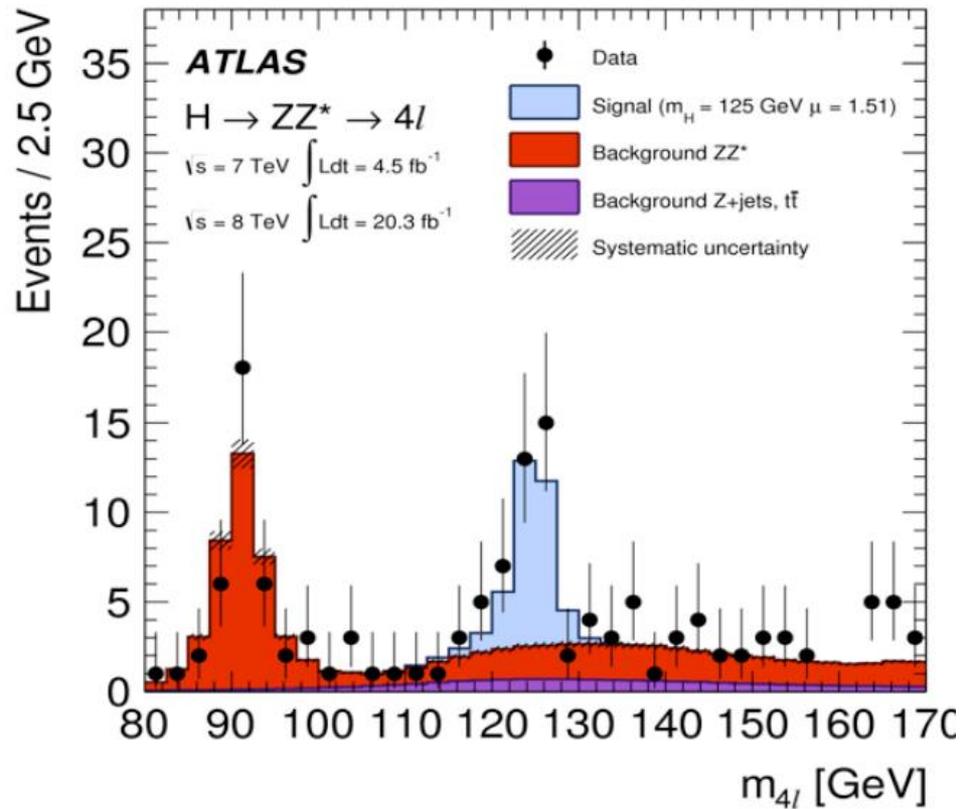




# Higgs decay to $\gamma\gamma$ , ATLAS and CMS, summer 2012 data



# Сигнал от распада бозона Хиггса в канале $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ :

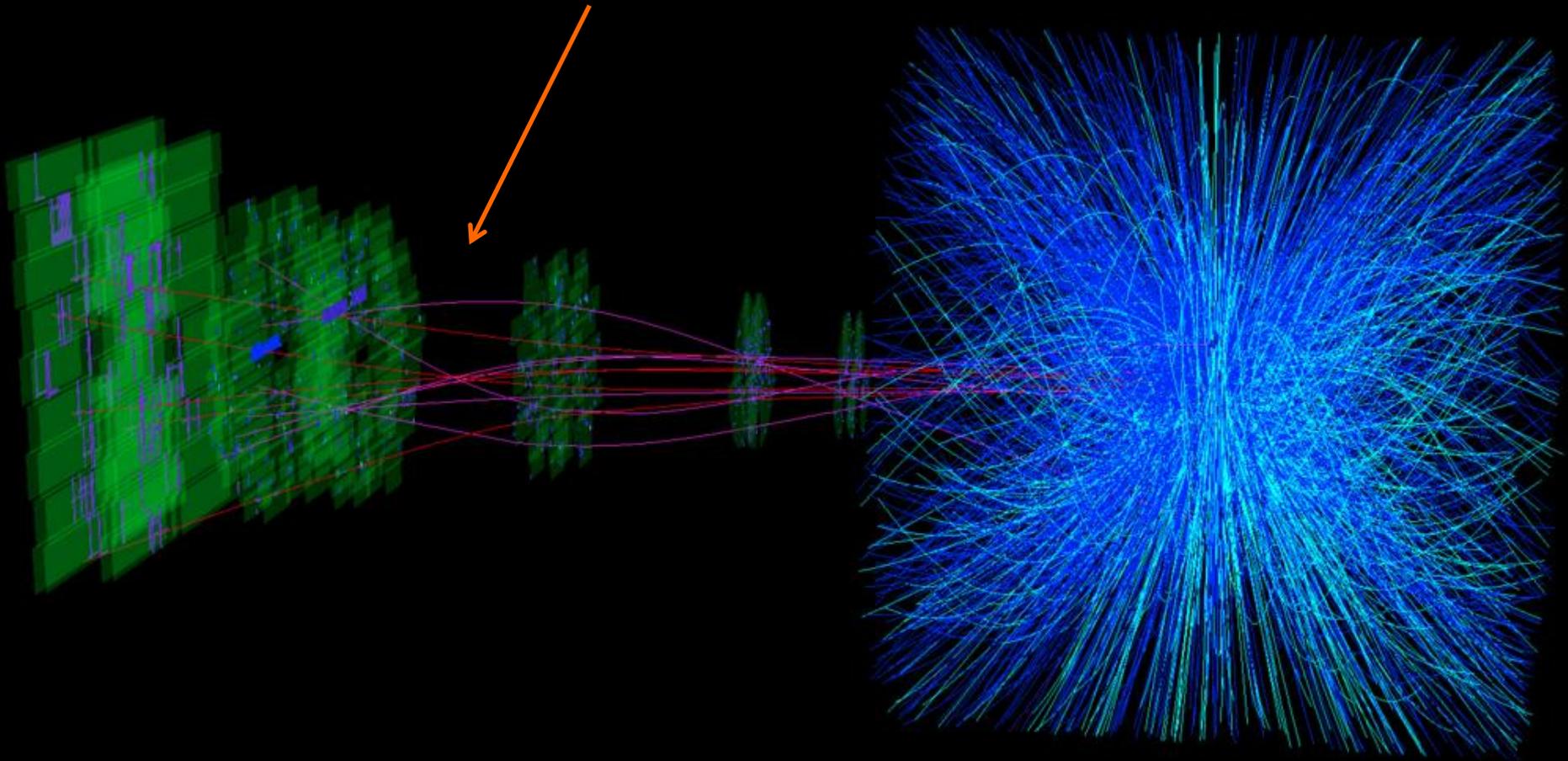


*сигнал, фон, данные эксперимента ATLAS*

July 4<sup>th</sup> at CERN, after the Higgs seminar



Частицы от столкновения ядер в ALICE:  
мюоны летят в «мюонный рукав»



# Визуализация научных результатов

