

# INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS





ALICE

# Поиск странных частиц в эксперименте ALICE

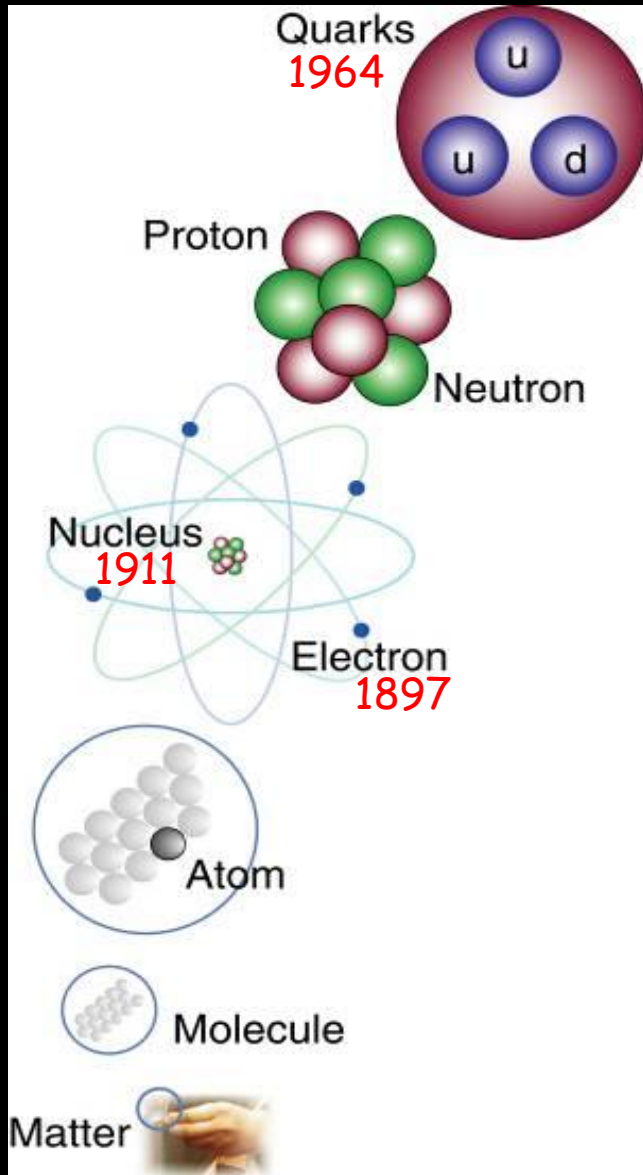
Игорь Алцыбеев

Санкт-Петербургский государственный университет

5 марта 2018



# Элементарные частицы



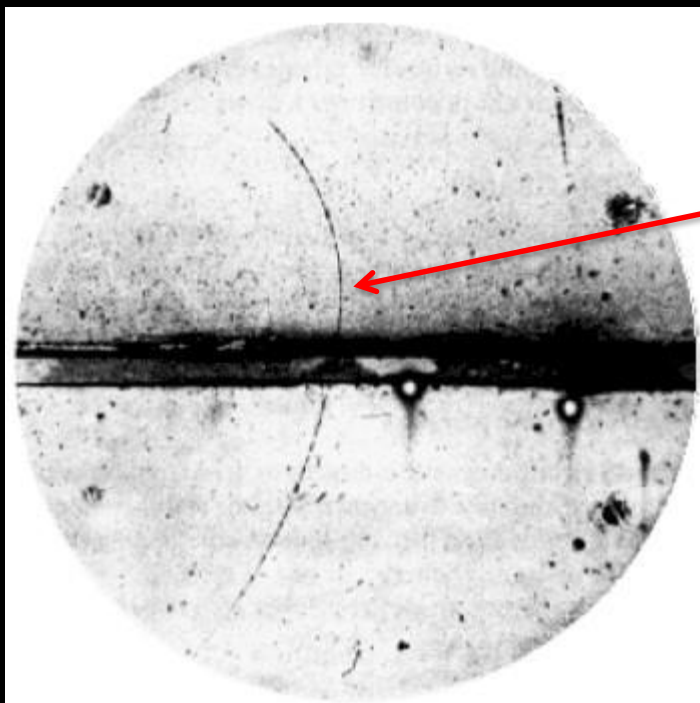
## Детектор: Камера Вильсона (изобретена в 1912 г.)



1927

### Принцип:

конденсация перенасыщенного пара на ионах, образующихся 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.



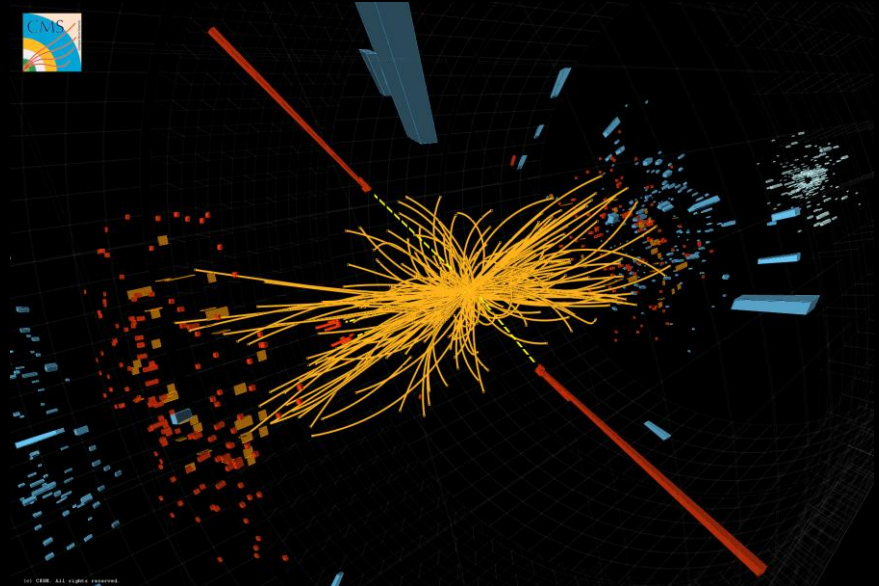
# Как можно роддать и изучать частицы?

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

Коллайдер LHC в туннеле:



Частицы от столкновения протонов, зарегистрированные в детекторе:



# Большой адронный коллайдер

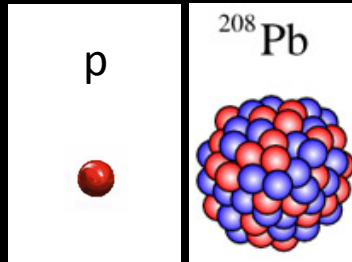
Длина кольца: 27 км

Сталкиваются:  
протоны либо ядра свинца

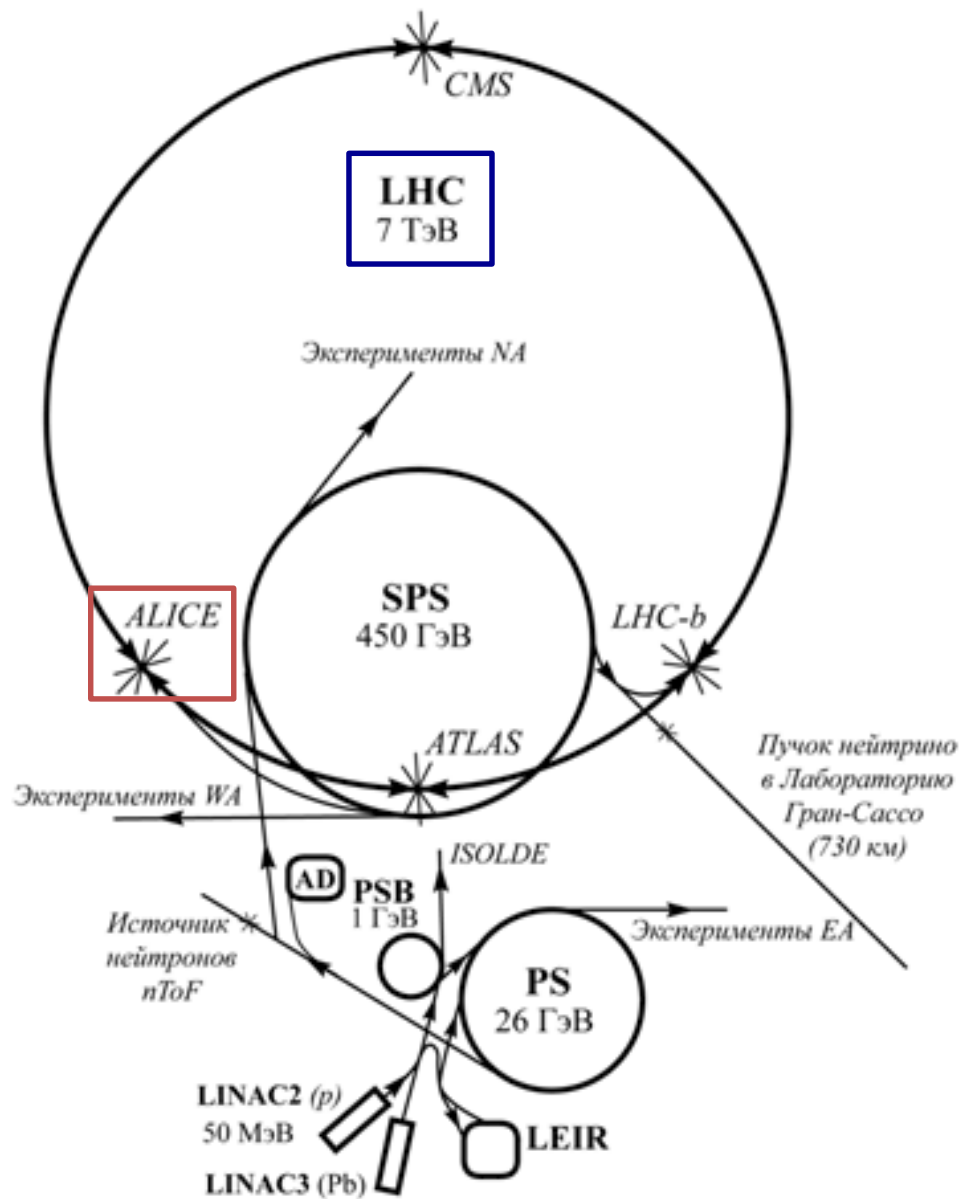
Энергия протонов:  
до 14 Тераэлектронвольт

Люди:  
> 5000 физиков

Стоимость:  
≈4 млрд евро (ускоритель + детекторы)



# Ускорительный комплекс в ЦЕРН



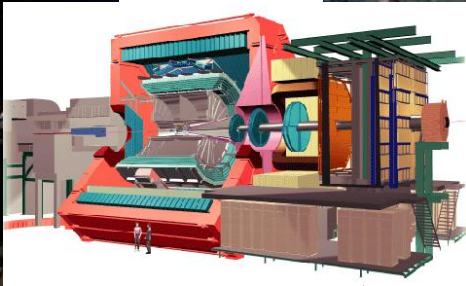


# Эксперименты на LHC

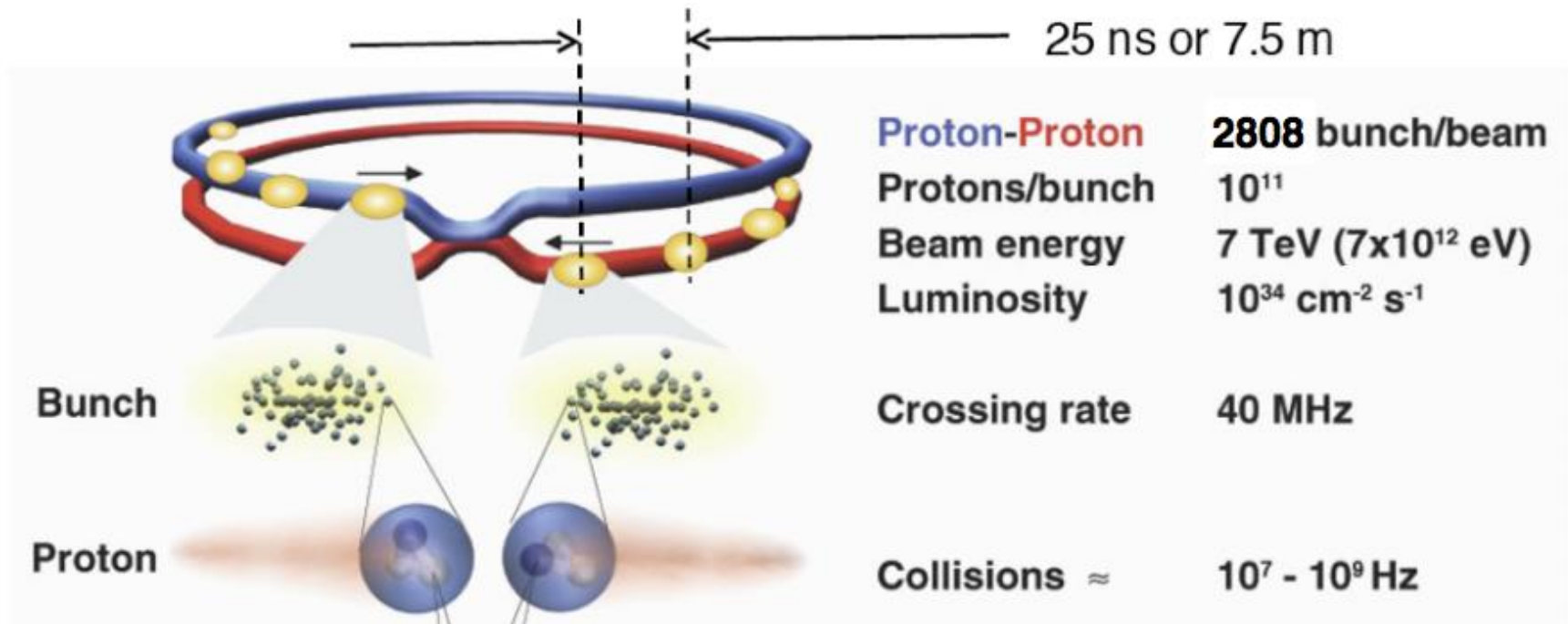


# Эксперименты на LHC

ALICE



# В LHC летят встречные **сгустки** частиц

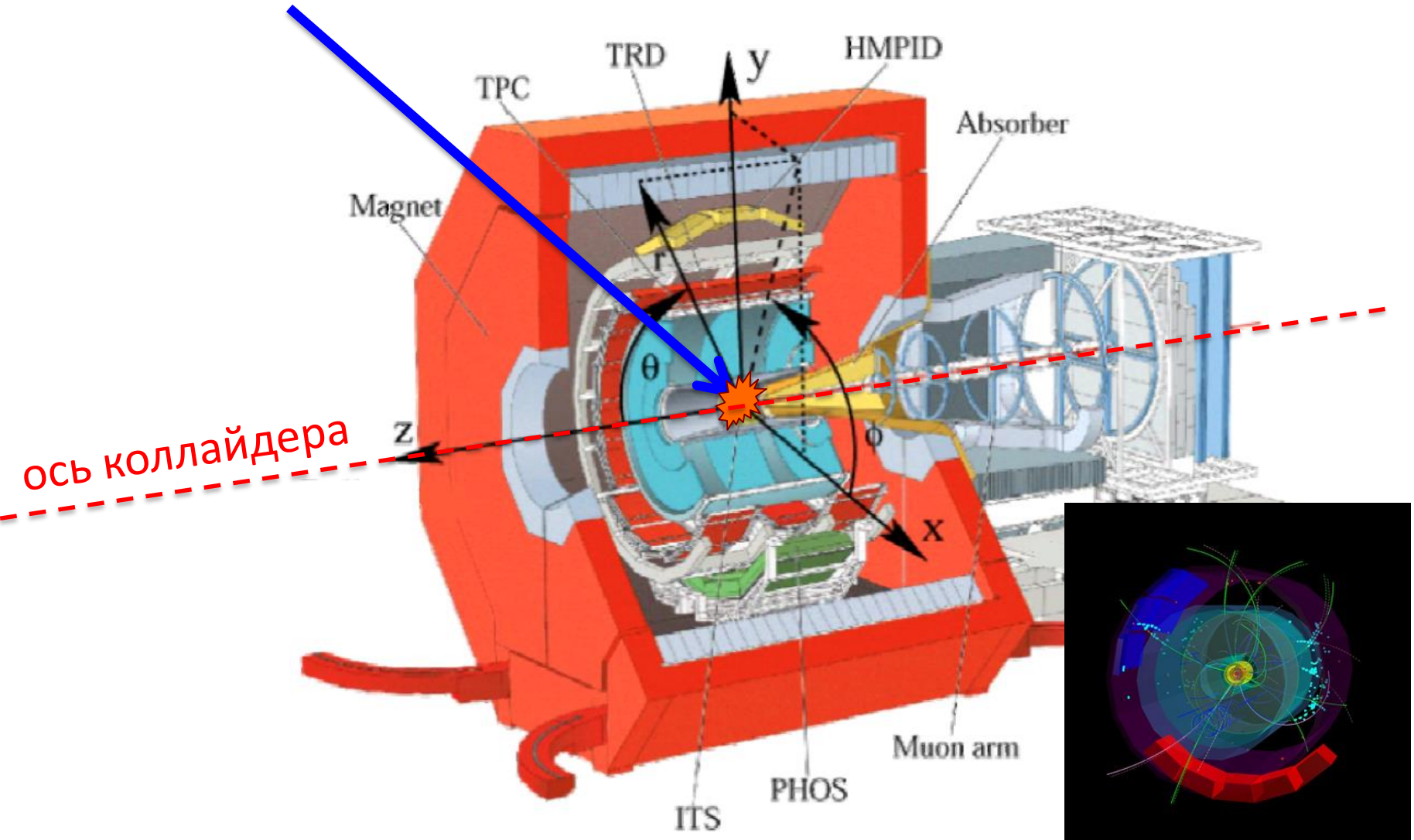


100 миллиардов протонов в одном сгустке x 2800 сгустков  
= **280 триллионов частиц** летает по кольцу почти со скоростью света!

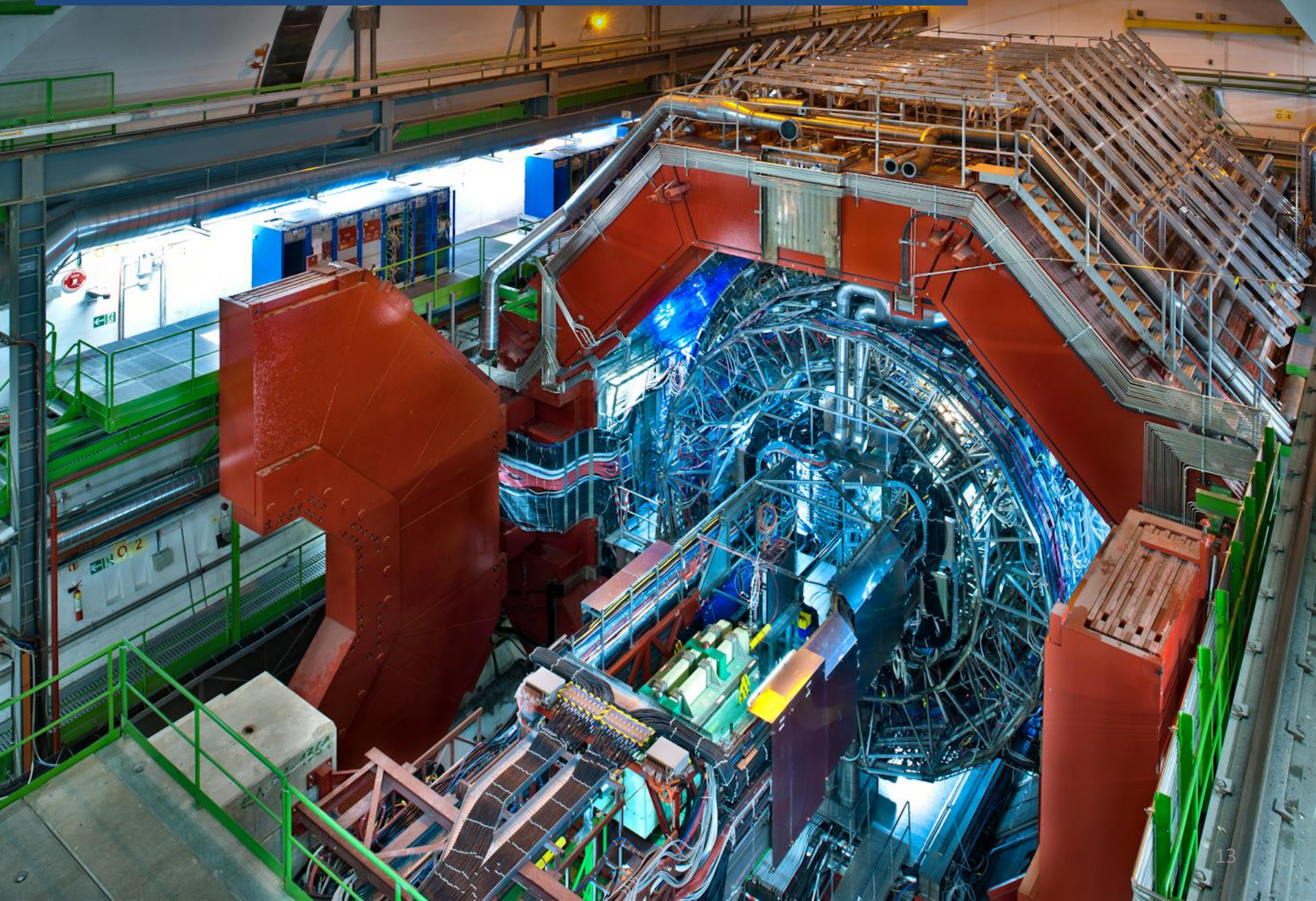
Энергия, запасенная в пучках LHC: **~300 МДж**

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

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



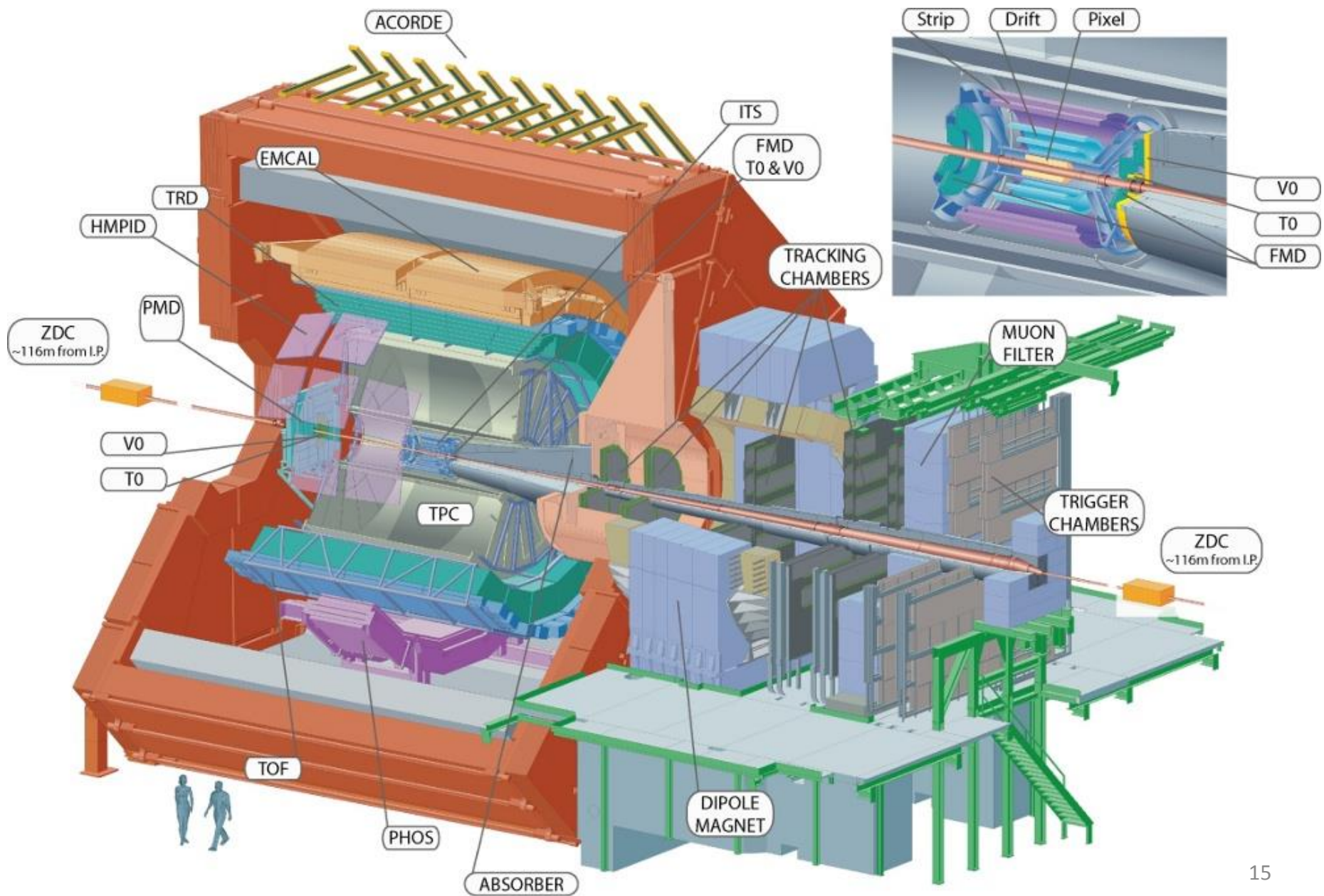
# Детектор ALICE с открытыми «воротами»



# Подготовка к Рождеству-2017 в Швеции

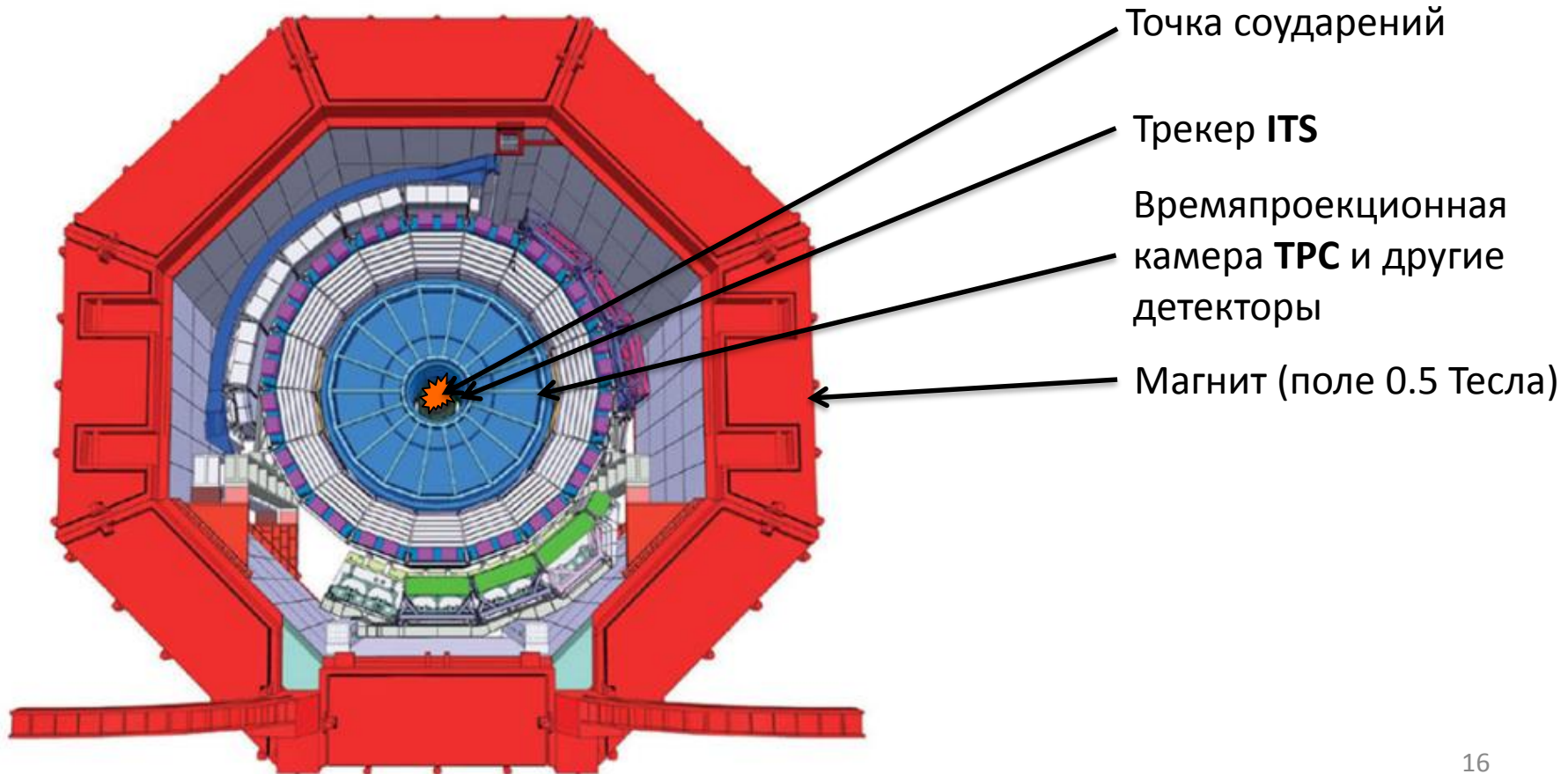


# Детектирующая установка ALICE

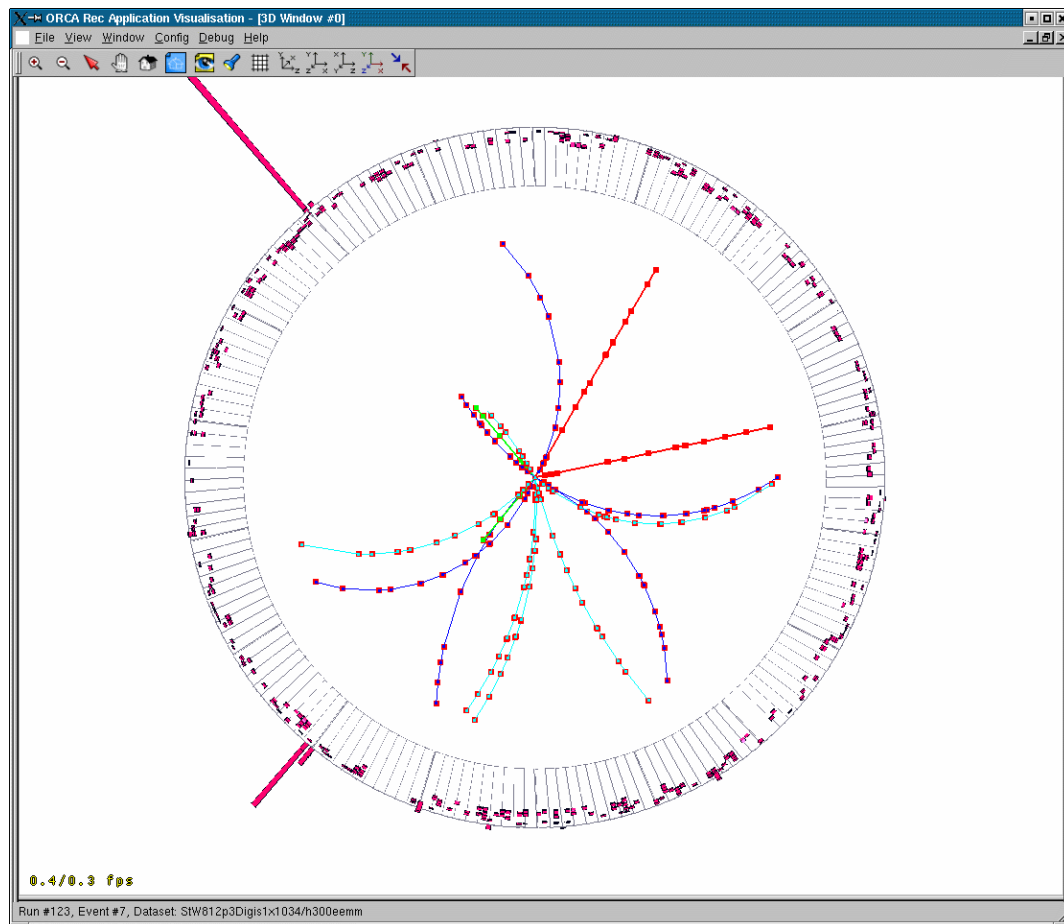


# Типичная структура современного эксперимента физики частиц – «матрёшка»

Поперечный «разрез» детектора ALICE:



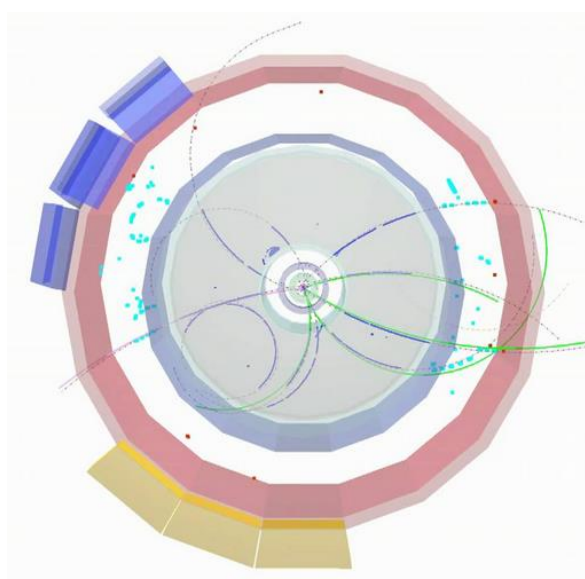




**Кластеры** = измеренные точки траектории частицы.  
Треки **реконструируются** по хитам.

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? ...)

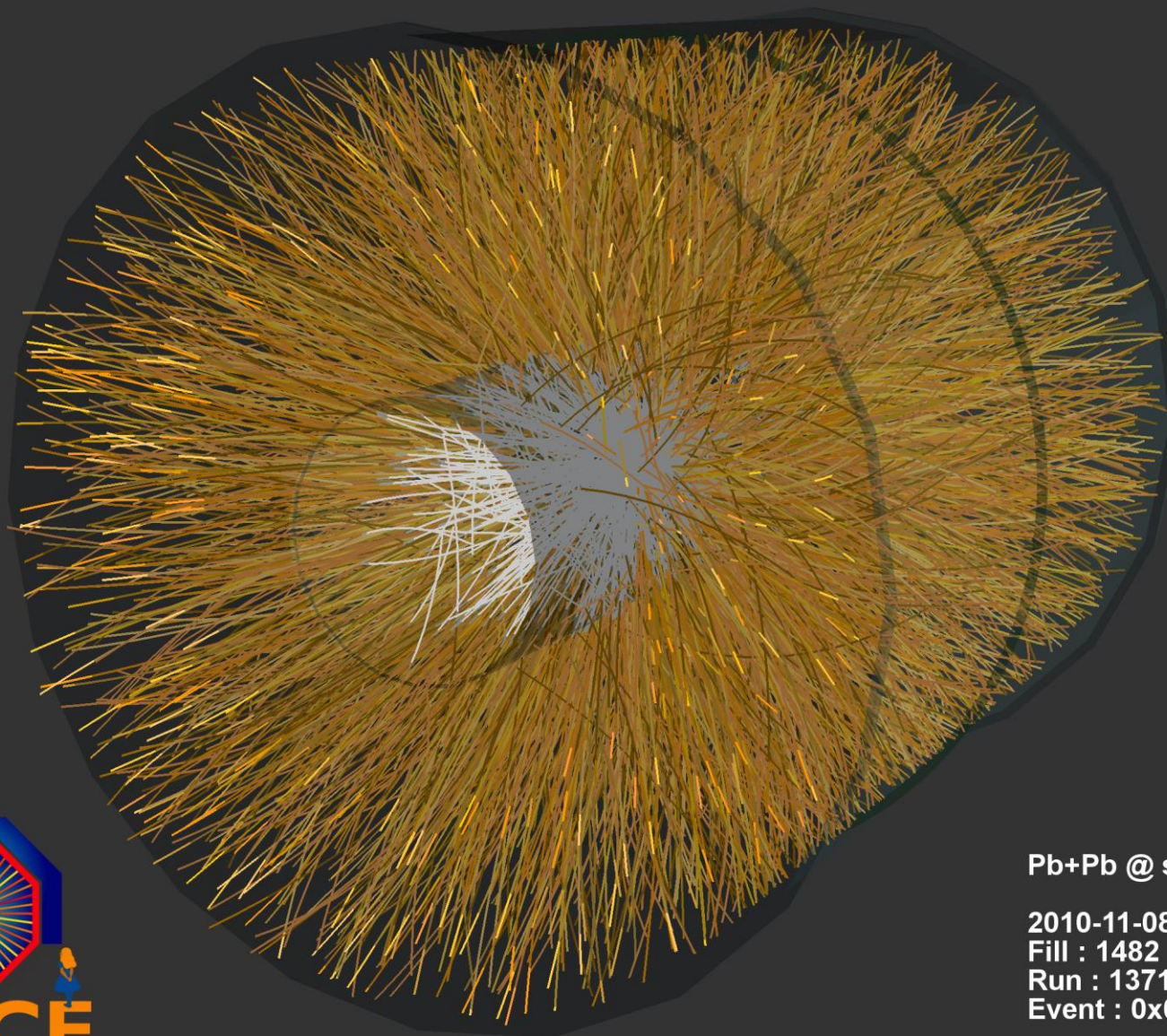
В установке **ALICE** основной детектор для трекинга и идентификации частиц:

## 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

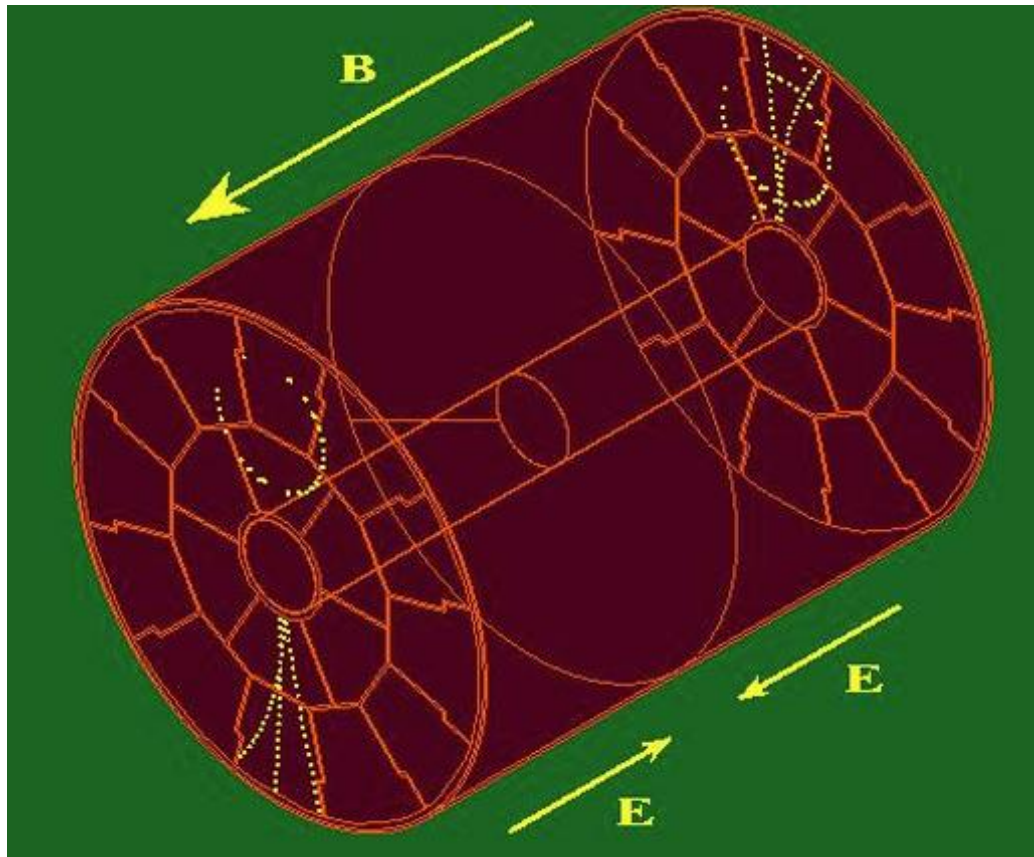
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

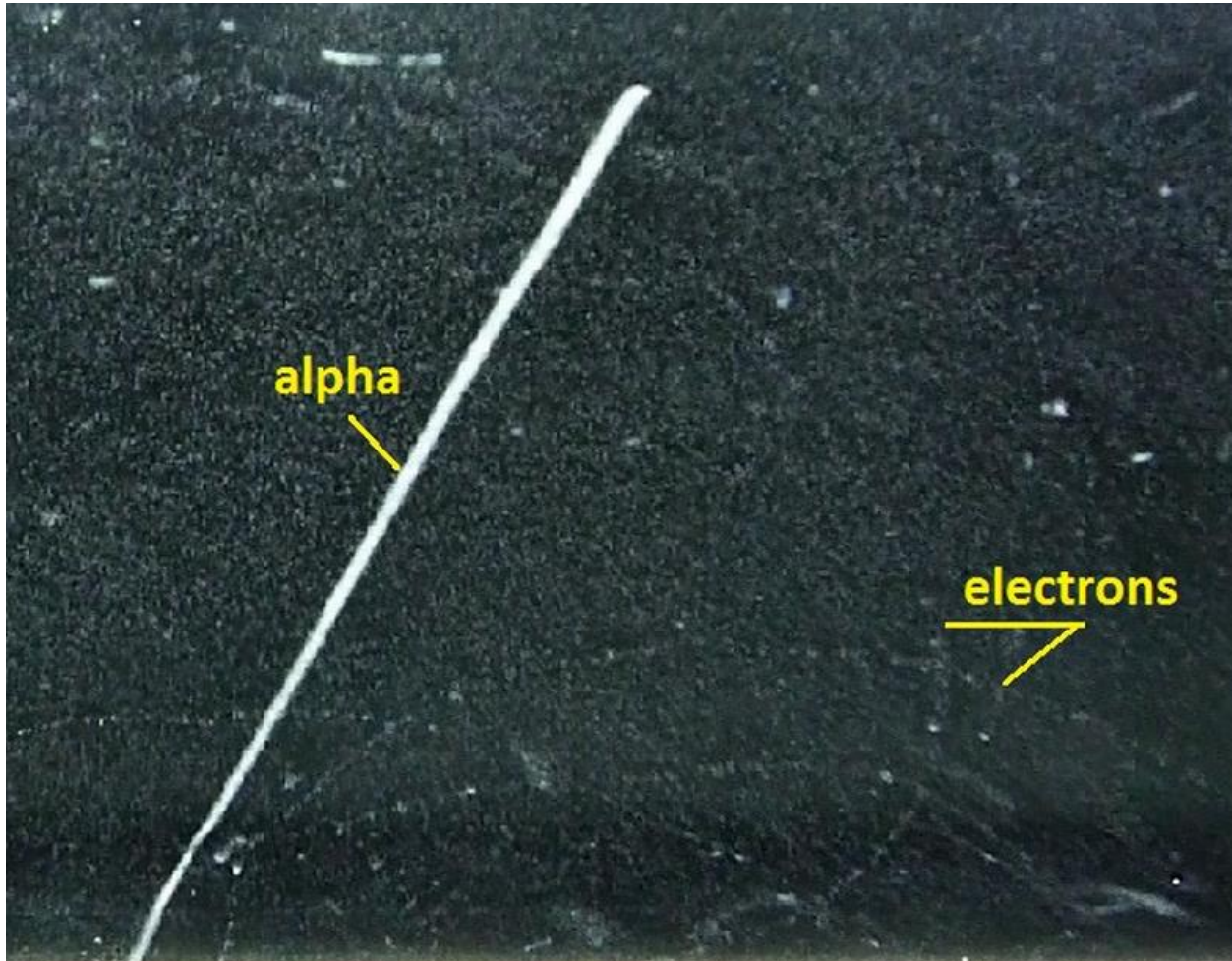
Event : 0x00000000D3BBE693

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

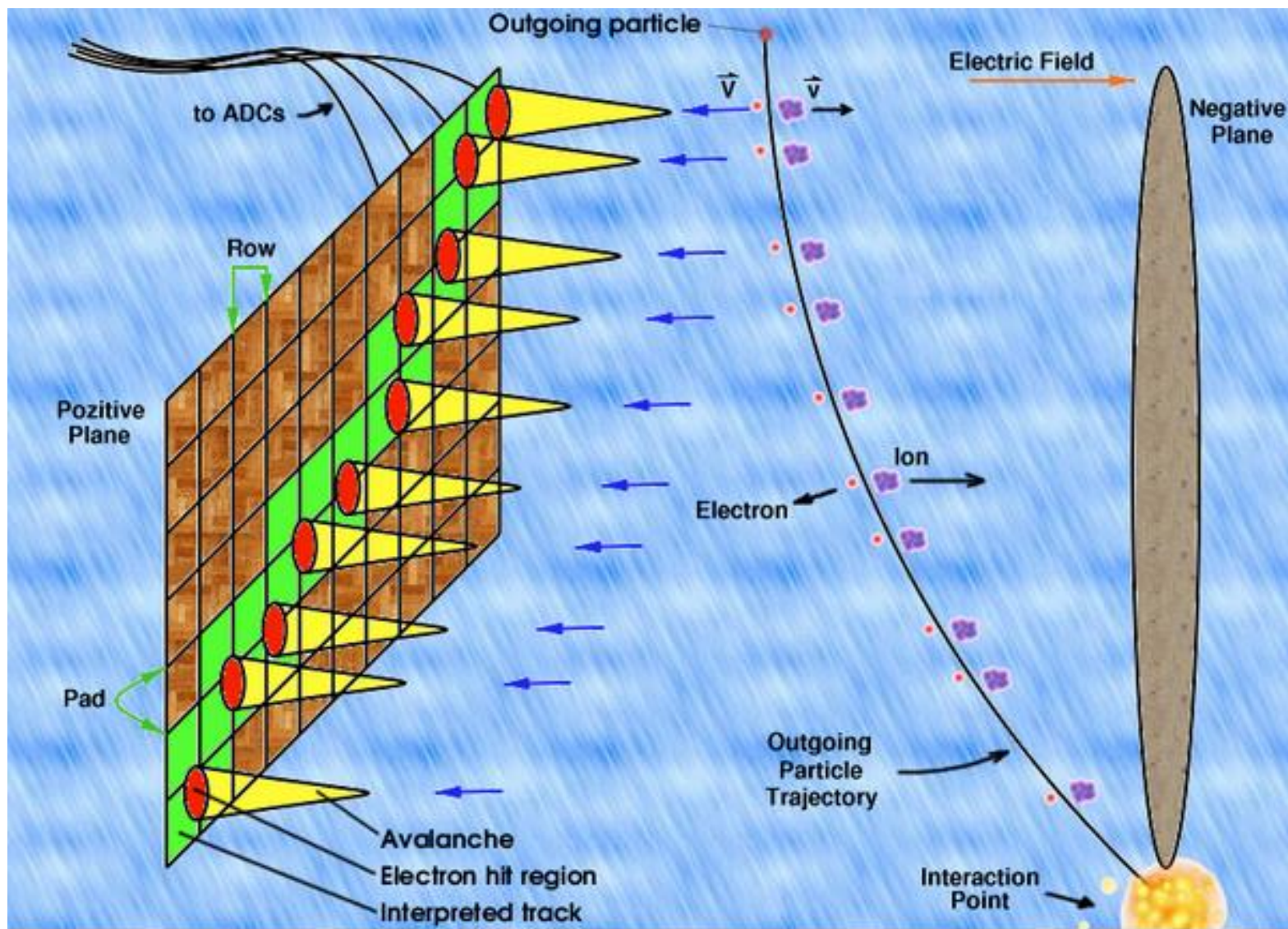


**Принцип:** при прохождении через вещество, разные частицы по-разному теряют энергию!

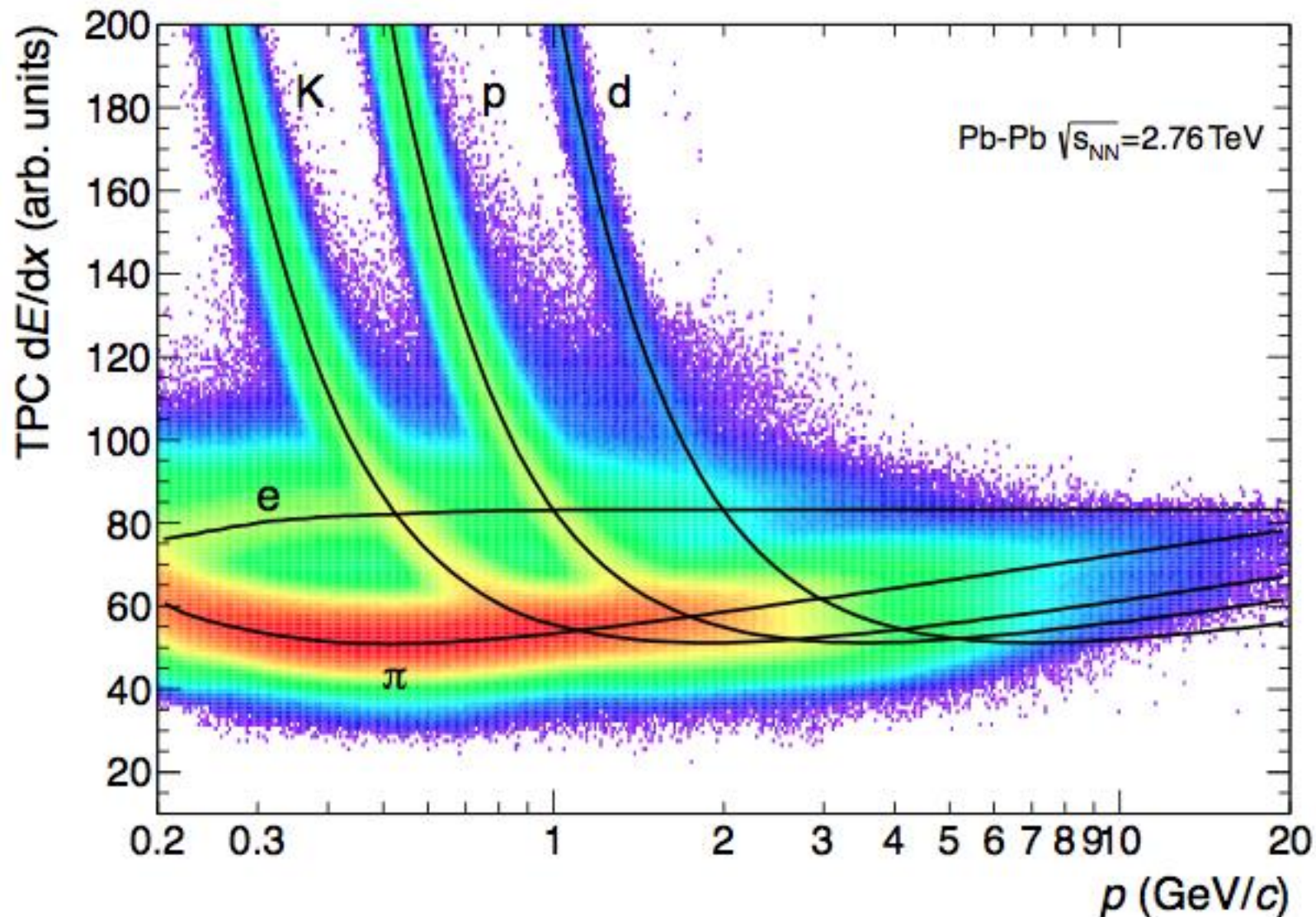
**Пример:** альфа-частица и электроны в камере Вильсона:



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



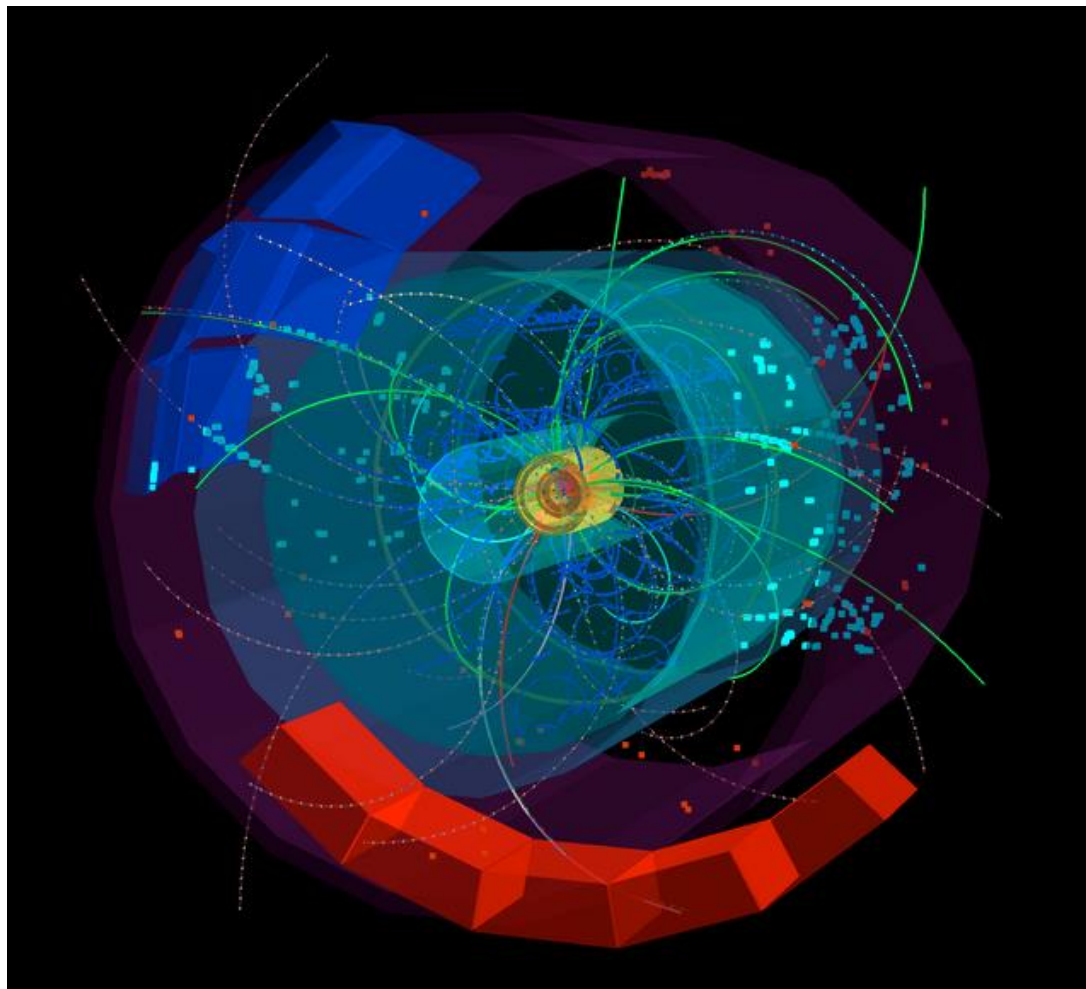
# Потери энергии в Time Projection Chamber



**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.

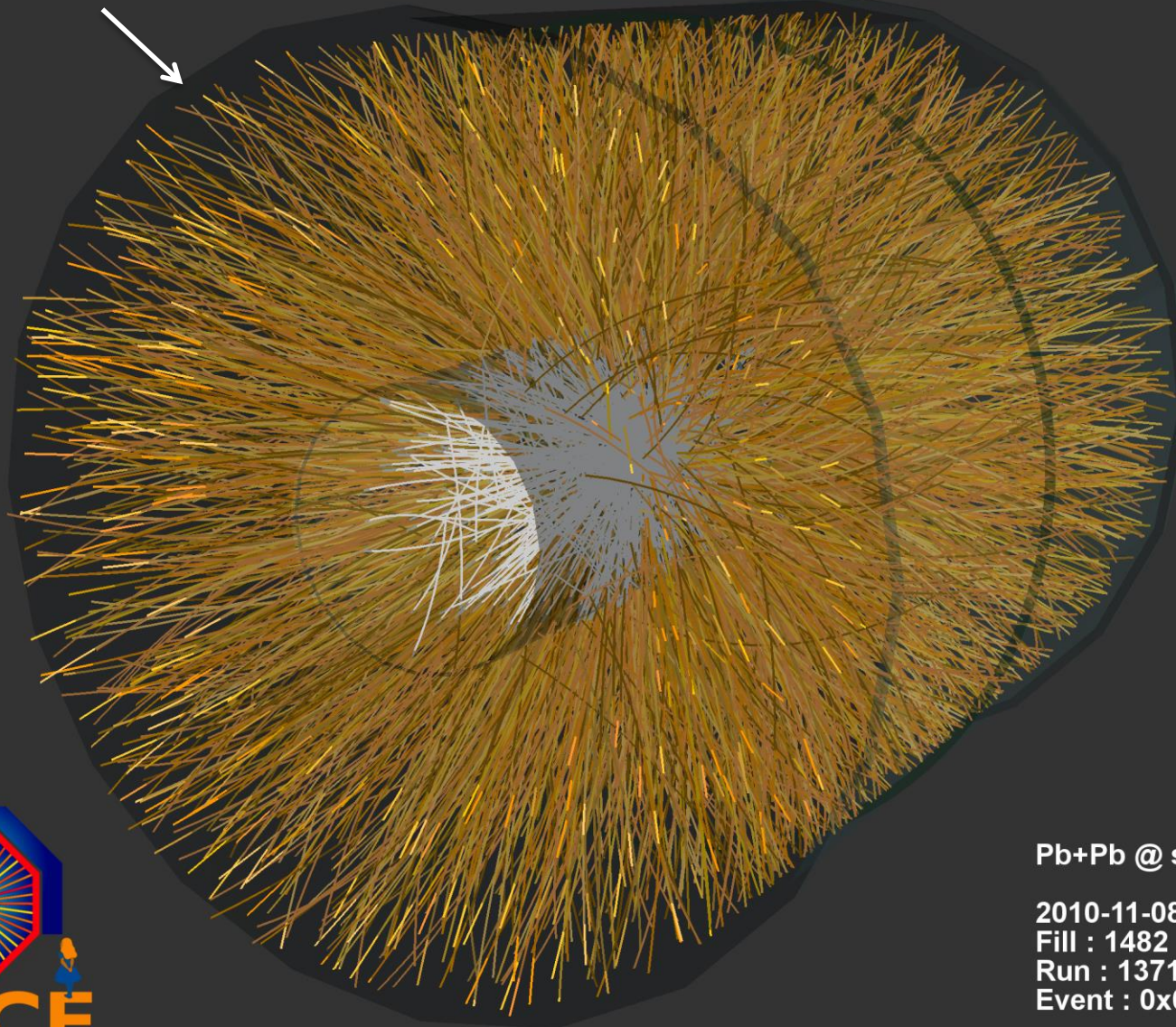


# Регистрация треков от протон-протонного соударения в детекторе ALICE



# 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

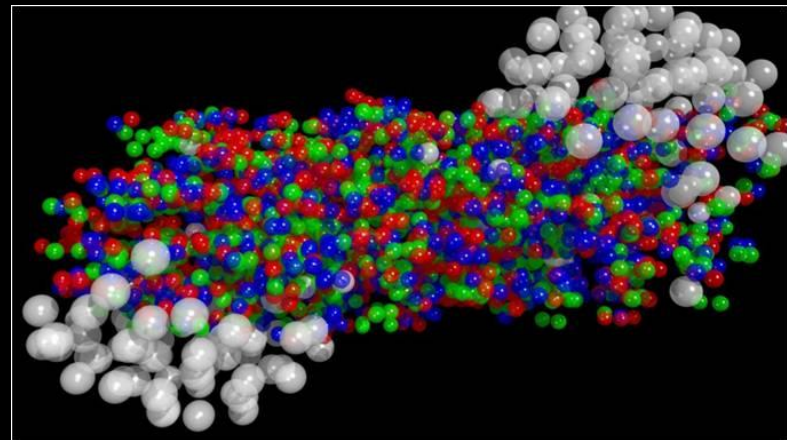
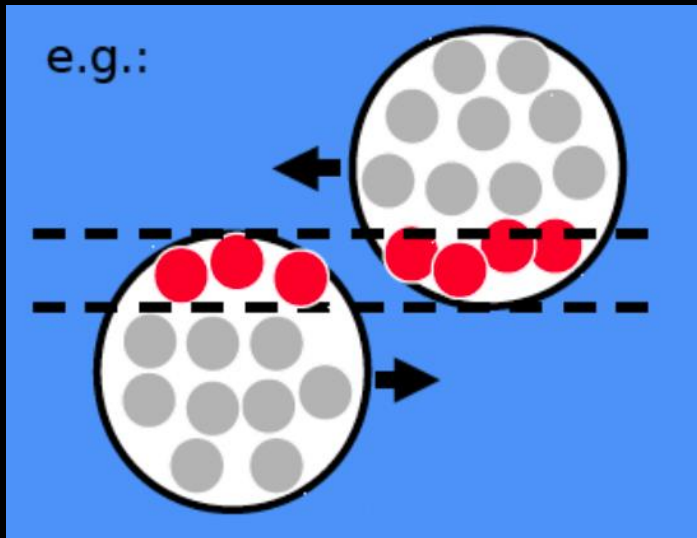
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

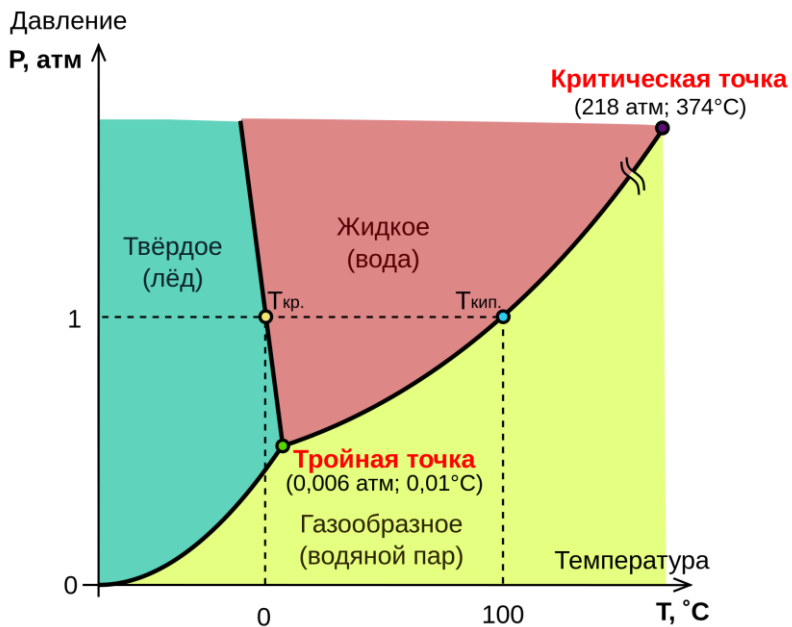
Event : 0x00000000D3BBE693

# Соударения ядер – путь к новому состоянию вещества

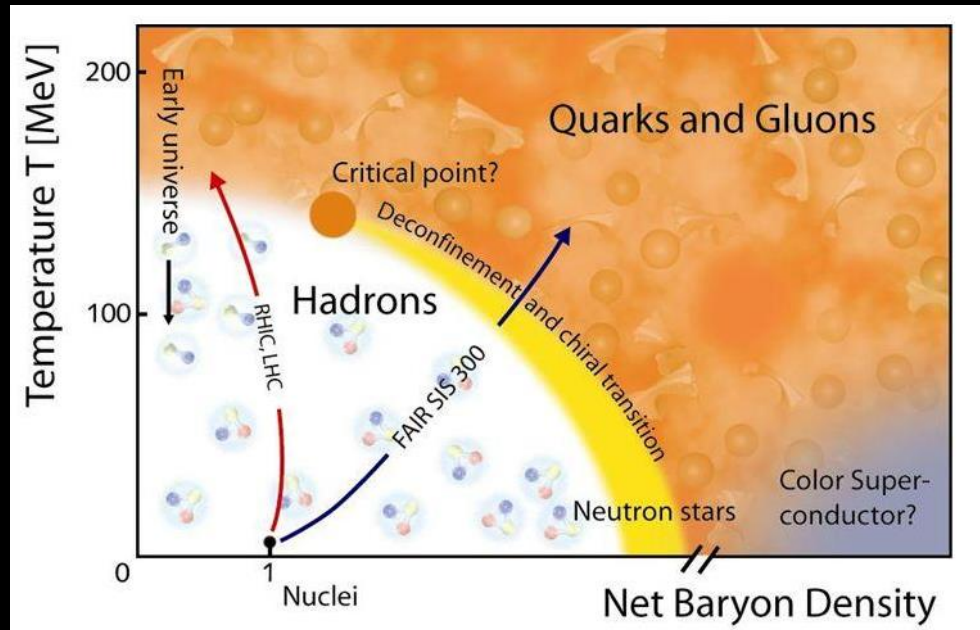


# Фазовая диаграмма ядерной материи

Вода:

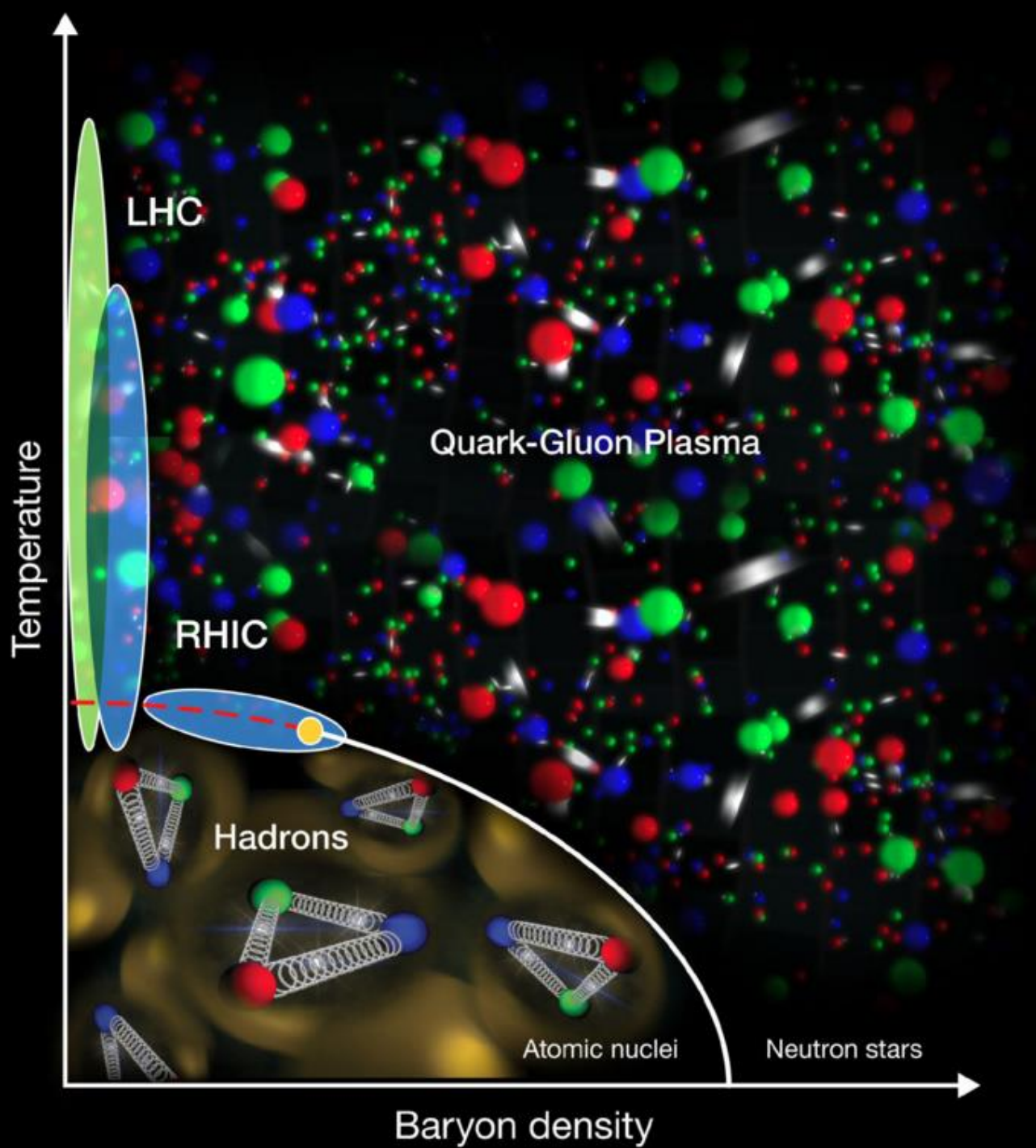


Ядерная материя:



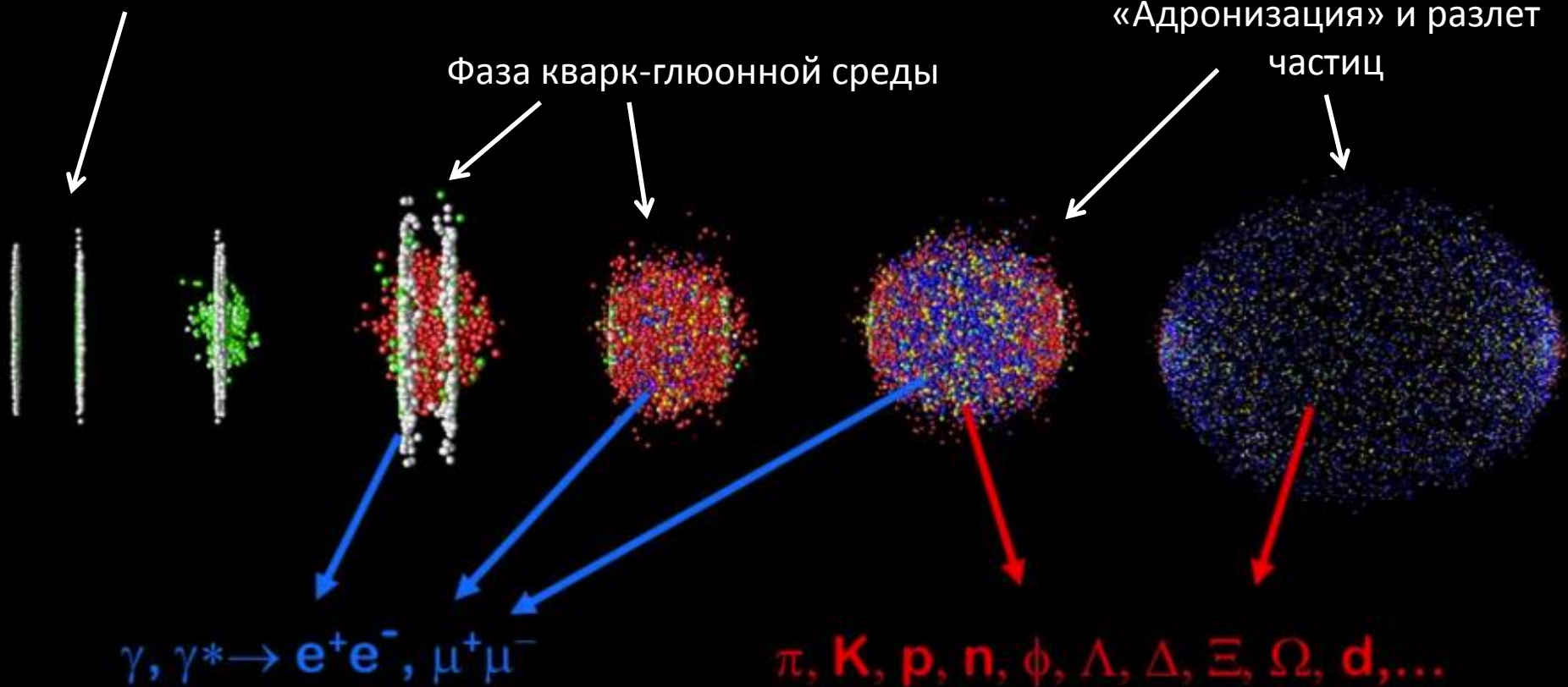
Теория сильного взаимодействия – **квантовая хромодинамика** – предсказывает, что при высоких температурах и плотностях кварки и глюоны больше не связаны внутри адронов.

→ **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!**

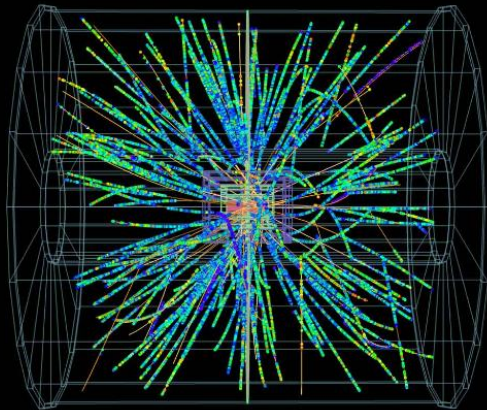
# «Зоопарк» частиц:

## 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

$\pi^{\pm}, W^{\pm}, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}, \pi^{\pm}, \pi^0, \eta, f_0(600), g(700),$   
 $\omega(782), \eta'(958), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235),$   
 $a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320),$   
 $f_0(1370), f_1(1420), \omega(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450),$   
 $f_0(1500), f_2'(1525), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680),$   
 $g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010),$   
 $a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^{\pm}, K^0, K_S^0, K_L^0, K^*(892),$   
 $K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_0^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680),$   
 $K_2(1770), K_3^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^{\pm}, D^0, D^*(2007)^0,$   
 $D^*(2010)^{\pm}, D_1^*(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^{\pm}, D_s^{\pm}, D_s^{*\pm},$   
 $D_{s1}^*(2536)^{\pm}, D_{s2}^*(2573)^{\pm}, B^{\pm}, B^0, B^*(800), B_S^0, B_c^{\pm}, \eta_c(1S), J/\psi(1S),$   
 $\chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160),$   
 $\psi(4415), \Upsilon(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \Upsilon(2S), \chi_{b0}(2P),$   
 $\chi_{b2}(2P), T(3S), T(4S), T(10860), T(11020), p, n, N(1440),$   
 $N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710),$   
 $N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600),$   
 $\Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950),$   
 $\Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1690),$   
 $\Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100),$   
 $\Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670),$   
 $\Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-,$   
 $\Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-,$   
 $\Lambda_c^+, \Lambda_c^0, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c^{\prime+}, \Xi_c^{\prime0}, \Xi(2645),$   
 $\Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0, \Xi_b^-, t, \bar{t}$

There are many more

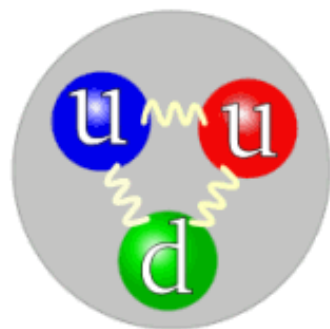
Влетевшая в пузырьковую камеру частица столкнулась с протоном в жидком водороде. Пузырьки вдоль траекторий – «треки».



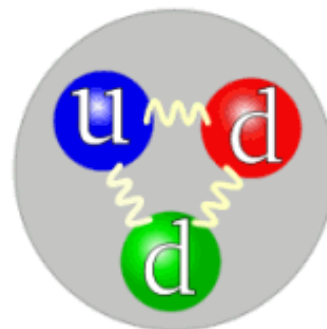
Лямбда-частица  
пролетает несколько сантиметров!

Странные частицы живут долго – видно «топологию распада»!

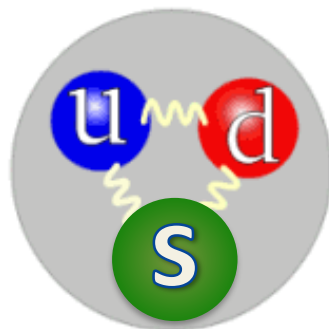




протон



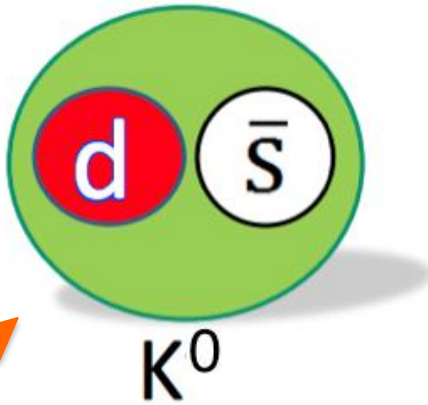
нейтрон



лямбда-частица (Λ)

содержит S-кварк!

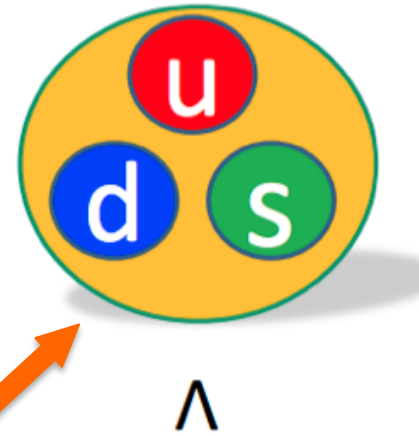
**Странные частицы** – частицы, содержащие хотя бы один странный кварк



$K^0$

**мезон**

состоит из кварка и антикварка

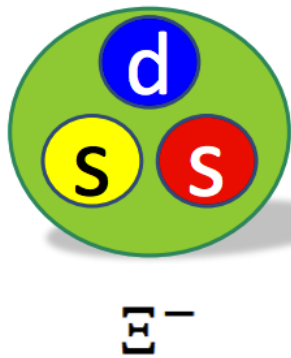
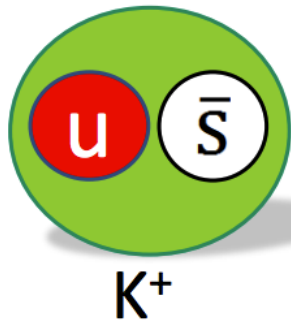


$\Lambda$

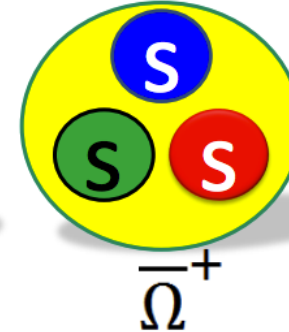
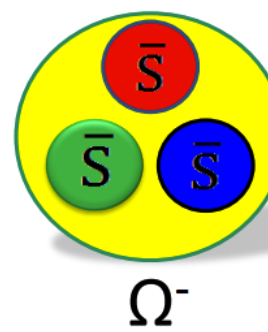
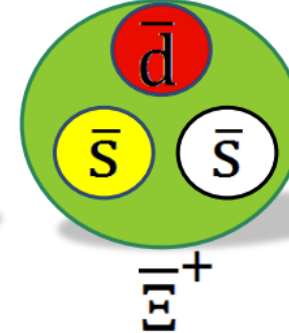
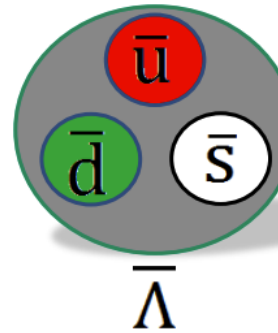
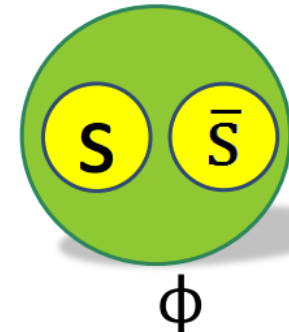
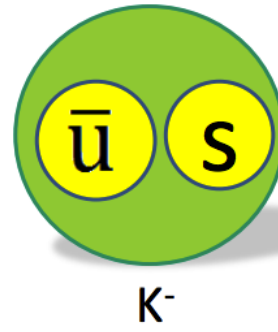
**барион**

состоит из трех кварков  
либо антикварков

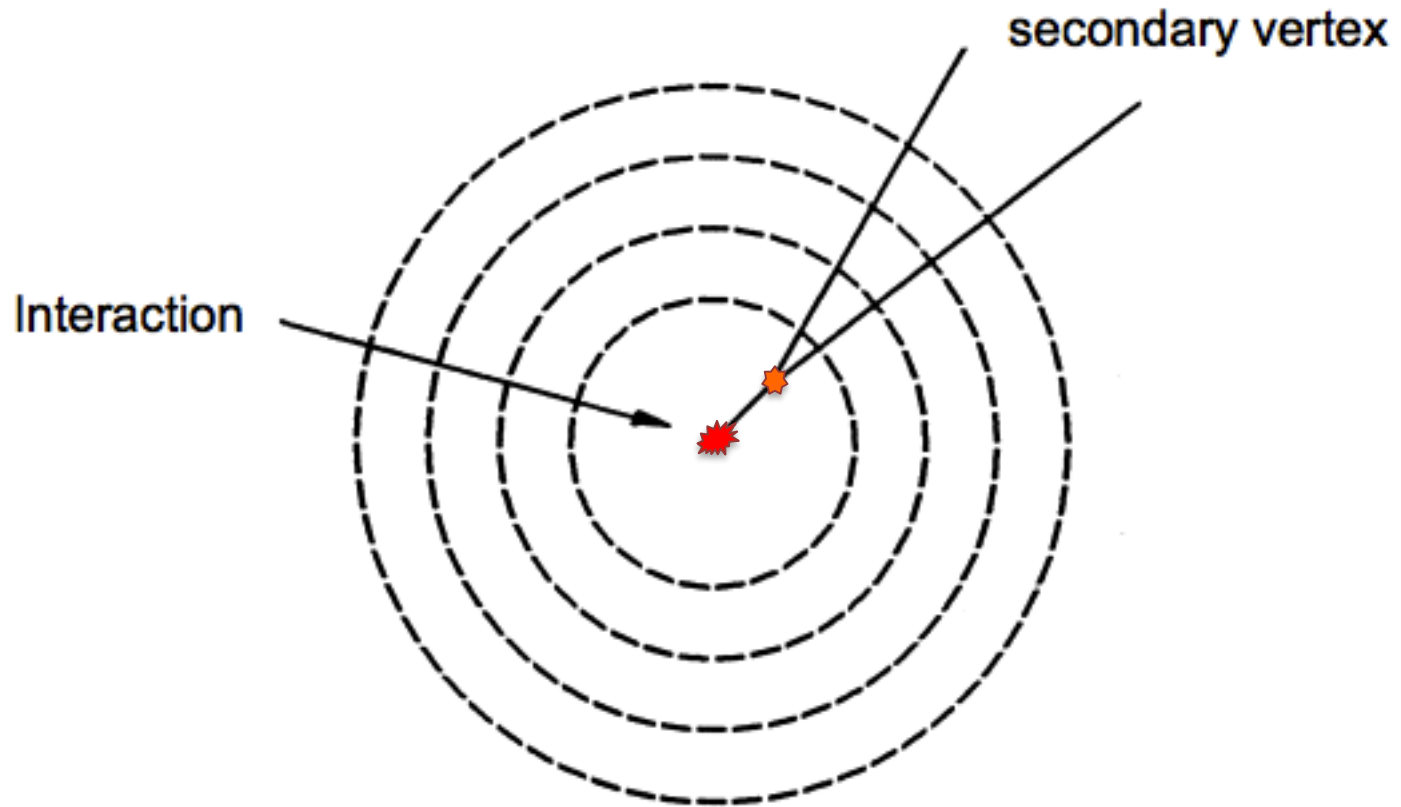
Странные частицы, содержащие «начальный» кварк (*u* или *d*)



Странные частицы, состоящие только из рожденных кварков

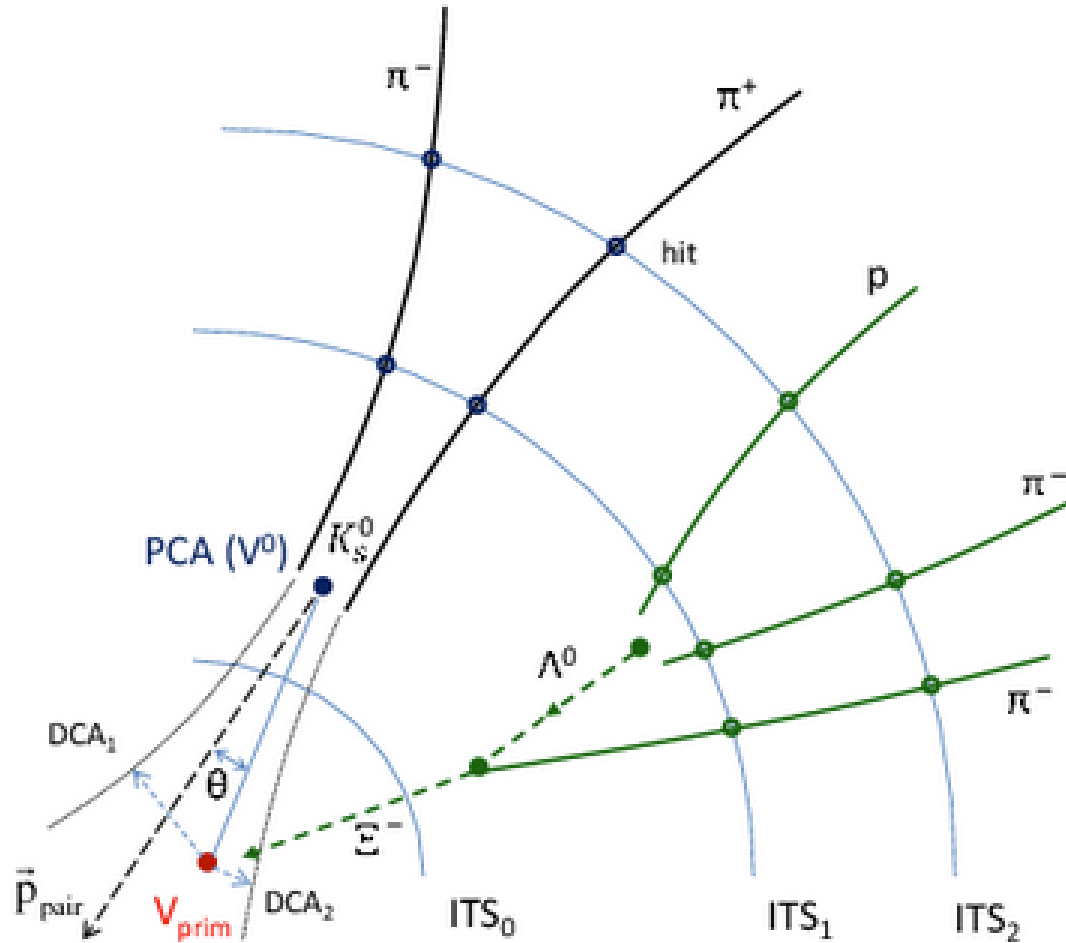


# Распад нестабильной частицы

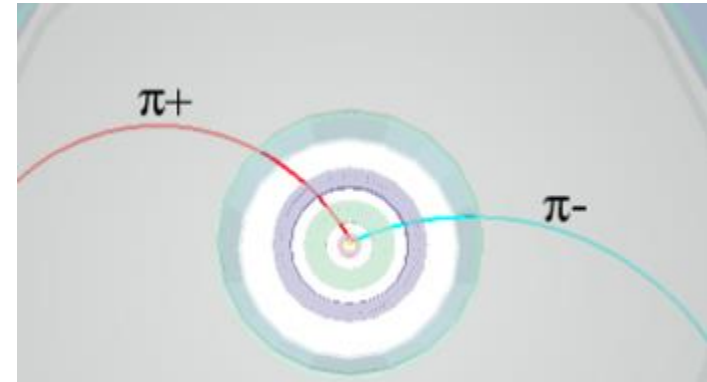
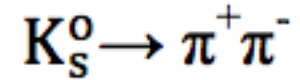
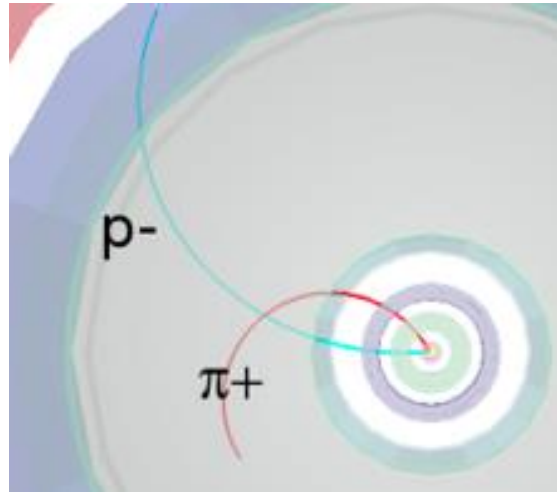
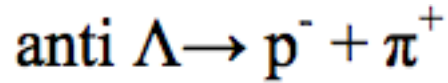
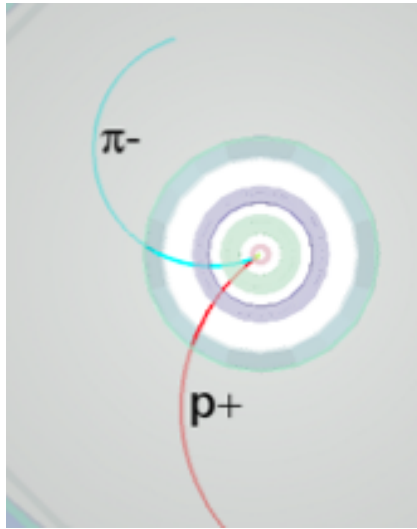
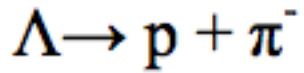


*Термины:* **главная и вторичная вершины**

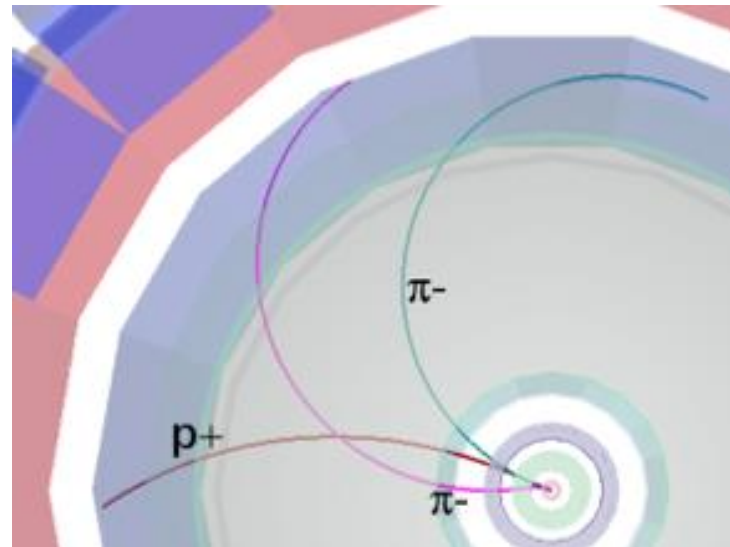
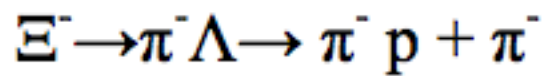
# Более детальный вид «топологии» распадов по измеренным точкам траектории



# 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:**

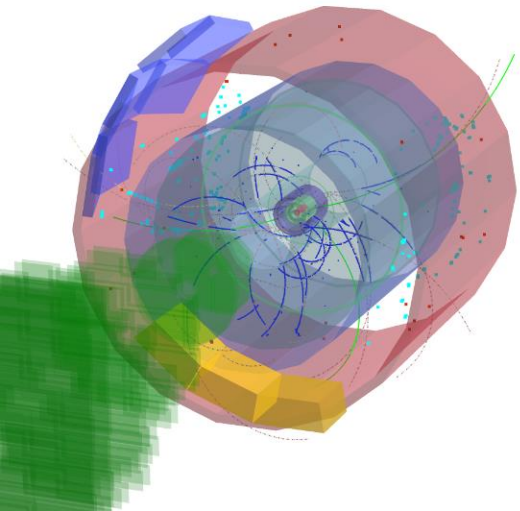
$$M^2 = E^2 - p^2$$

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

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

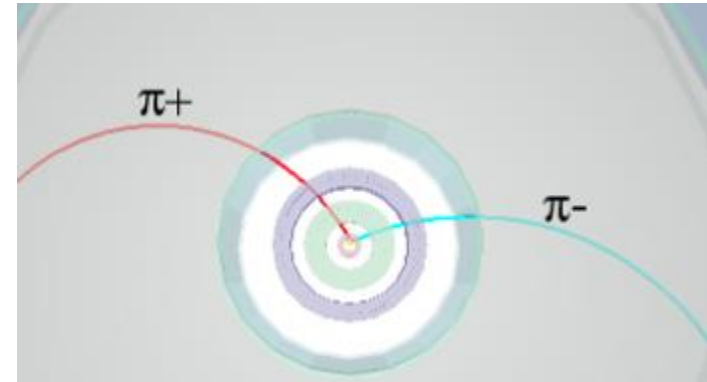
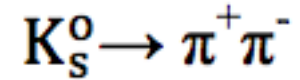
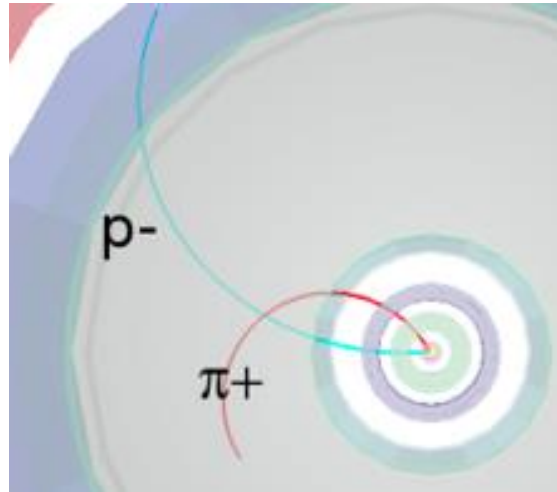
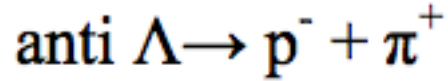
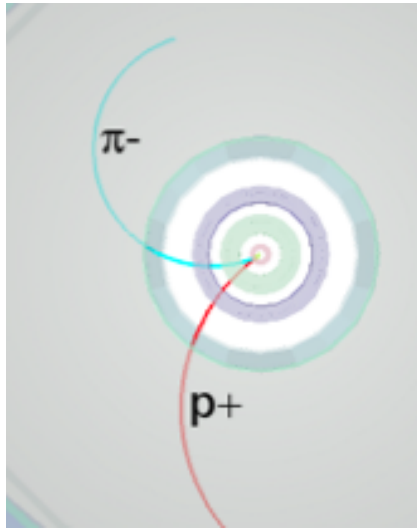
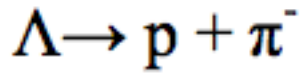
# Мастеркласс, часть 1

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





# Топологии распадов частиц, содержащих странные кварки

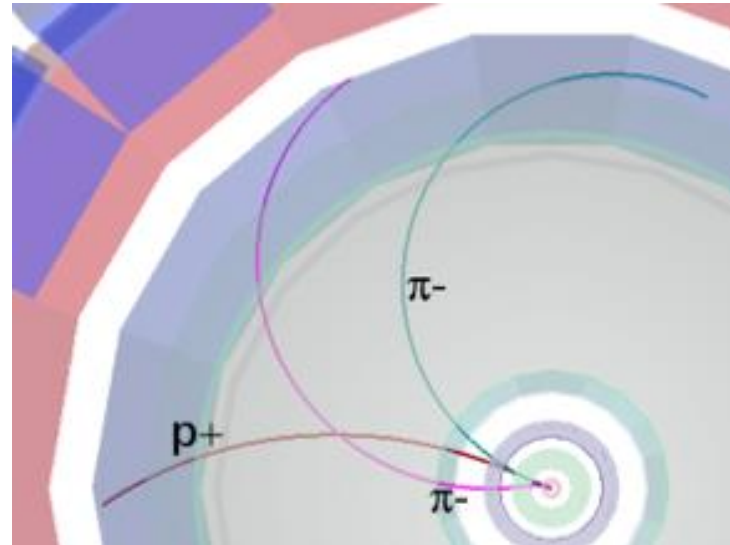
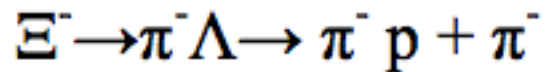


Масса протона = 0.938 ГэВ

Масса пиона = 0.139 ГэВ

Масса электрона = 0.000511 ГэВ

*Каскадный распад:*

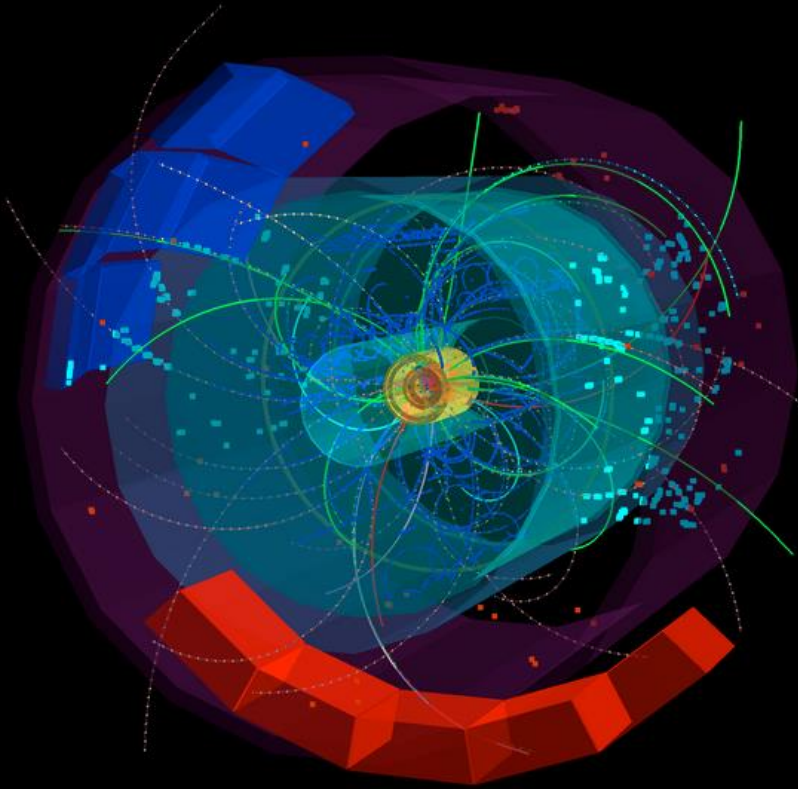


# Итоги мастеркласса (часть 1)

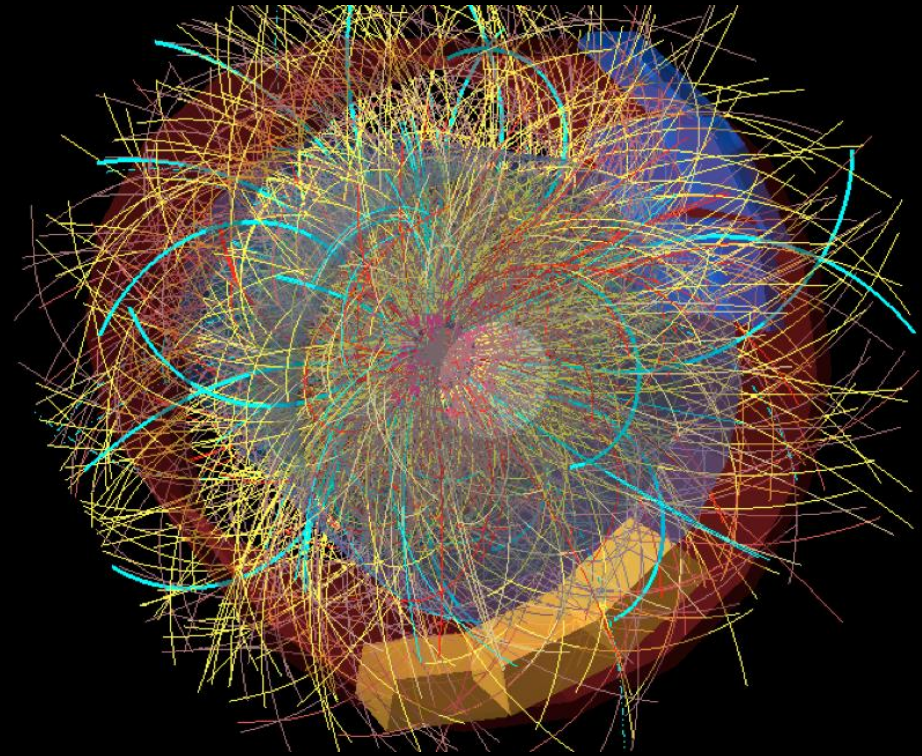
- ✦ Заряженные частицы оставляют в детекторе сигналы («хиты»), по которым реконструируются их траектории («треки»)
- ✦ Заряды и импульсы заряженных частиц определяются благодаря магнитному полю детектора
- ✦ Системы детектора ALICE умеют определять типы заряженных частиц
- ✦ Странные частицы реконструируются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

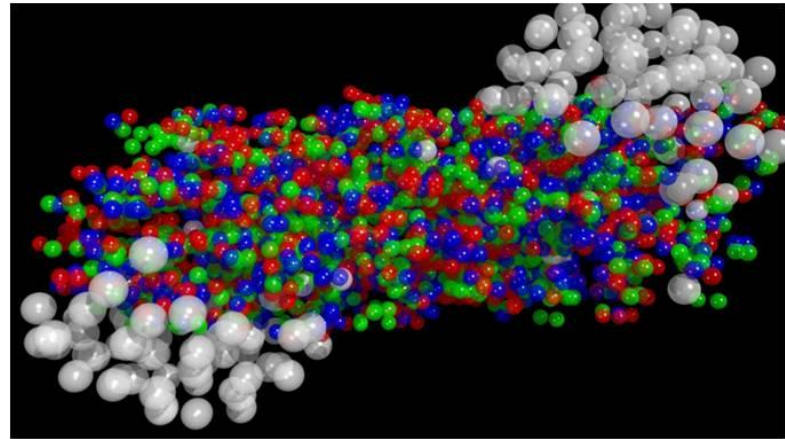
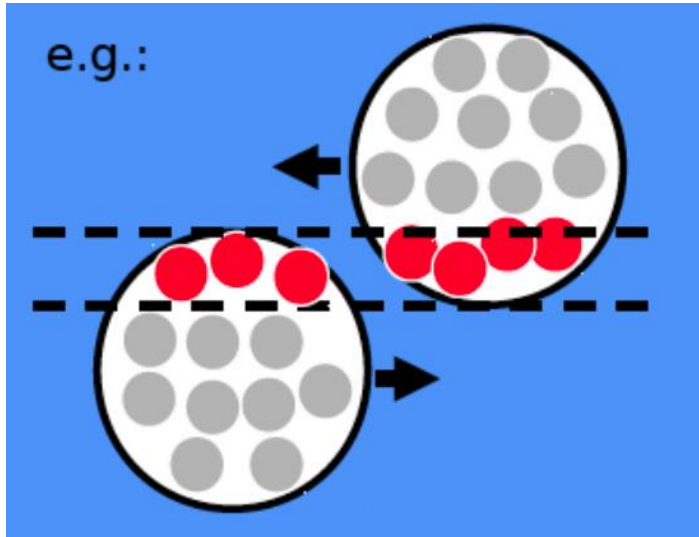
    // Track loop -----
    for (int trackId = 0; trackId < event->GetNumberOfTracks(); trackId++)
    {
        Track *track = event->GetTrack( trackId );

        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
    }
}
```

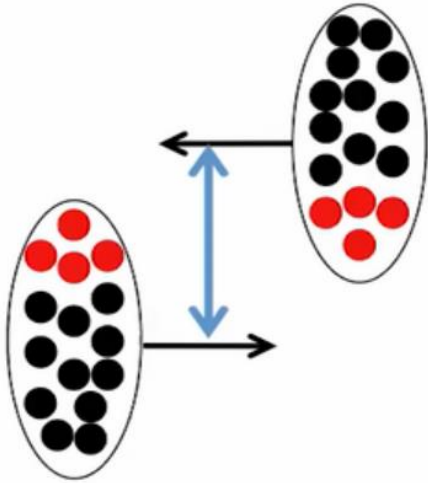
# «Центральность» соударения ядер



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

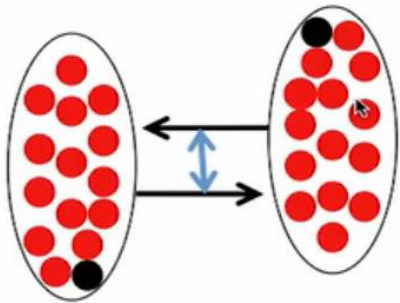
# «Центральность» соударения ядер

«Периферическое» соударение:



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

«Центральное» соударение:



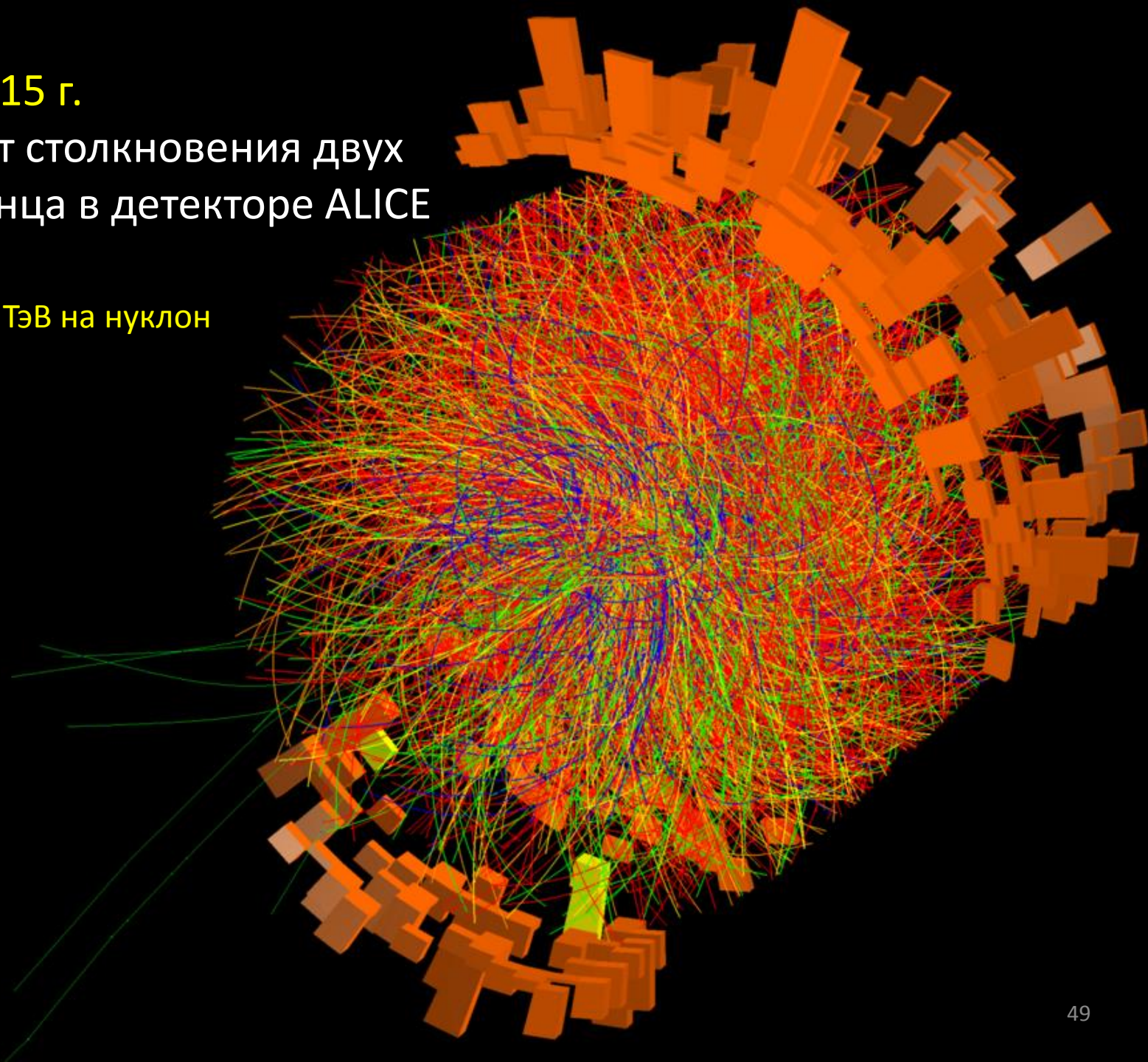
- ✧ Малое расстояние между центрами ядер
- ✧ Большое число **нуклонов-участников**
- ➔ Много рожденных частиц



Ноябрь 2015 г.

Частицы от столкновения двух  
ионов свинца в детекторе ALICE

Энергия: 5.02 ТэВ на нуклон

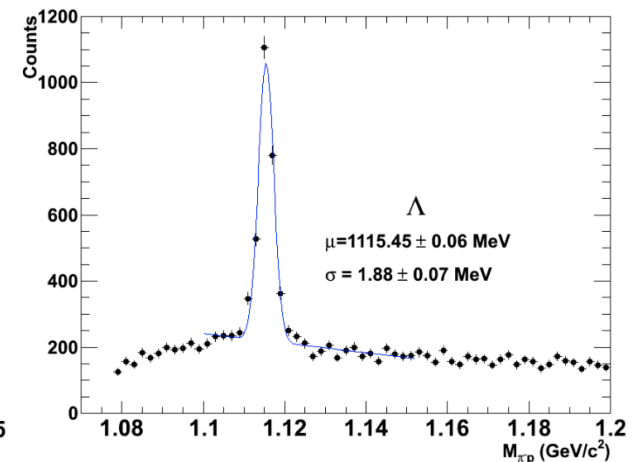
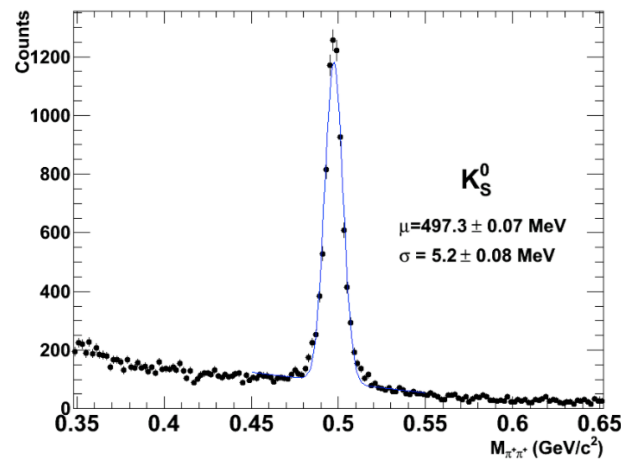
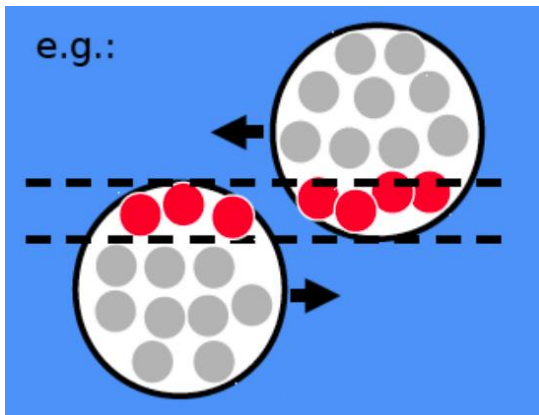


# Мастеркласс, часть 2

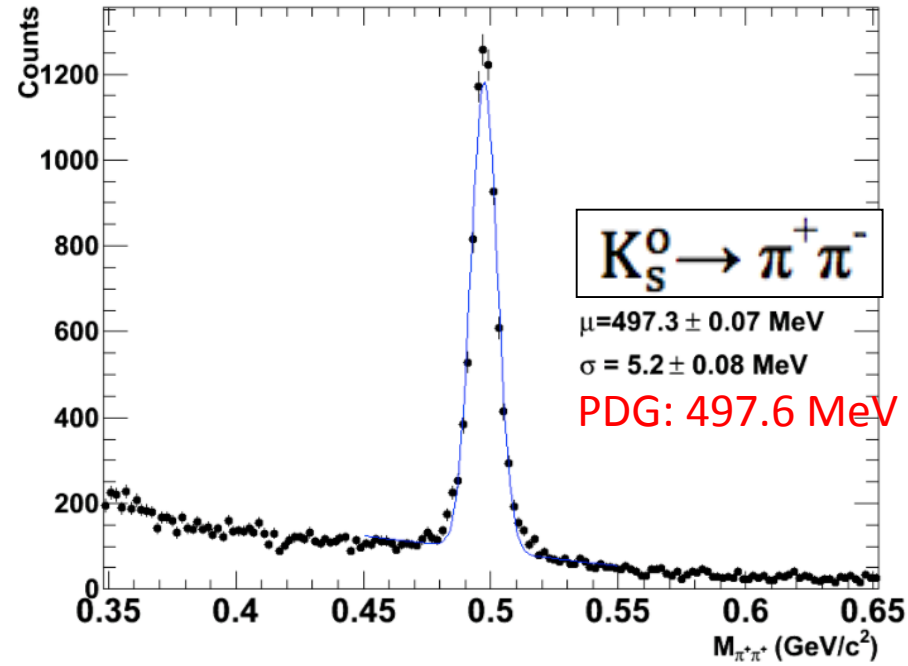
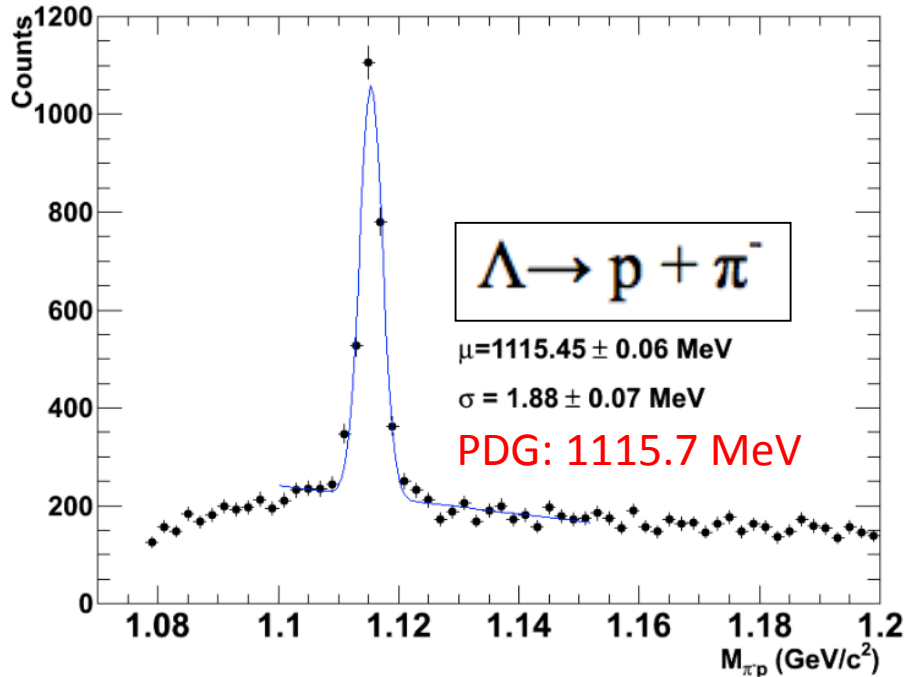
## Автоматический анализ большой статистики событий (large-scale analysis)

### 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)

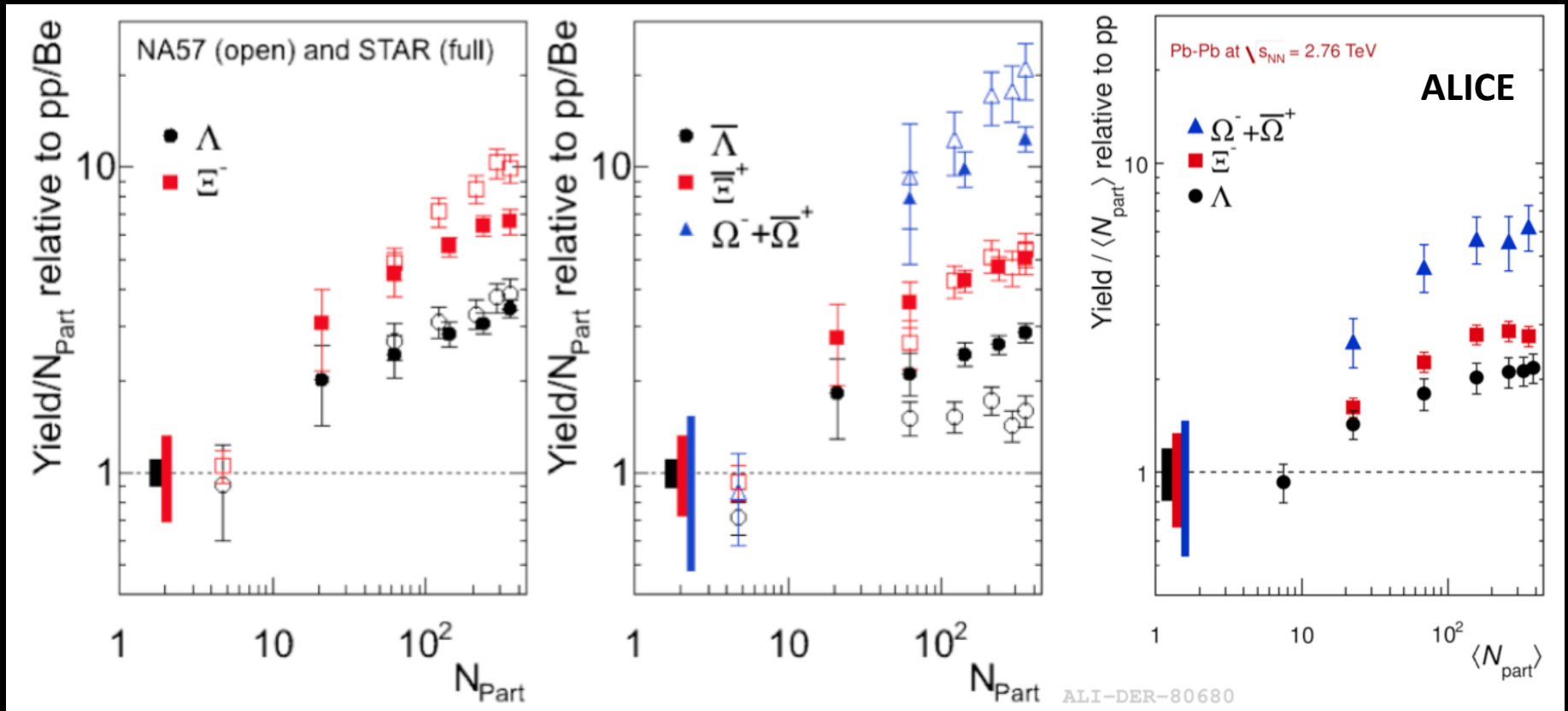


## **Расчет фактора увеличения выхода странных частиц:**

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

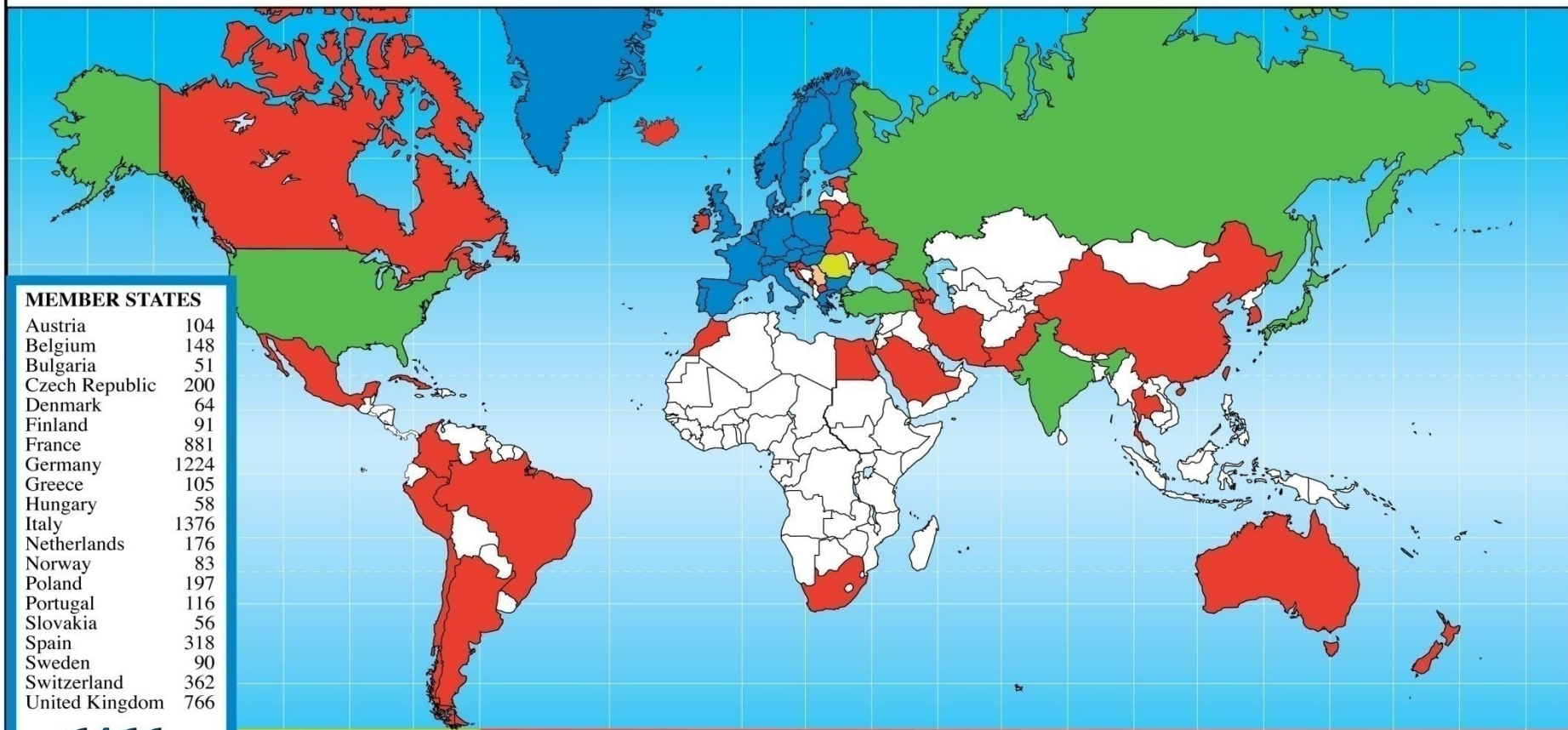
# Комната управления детектором ALICE





# 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

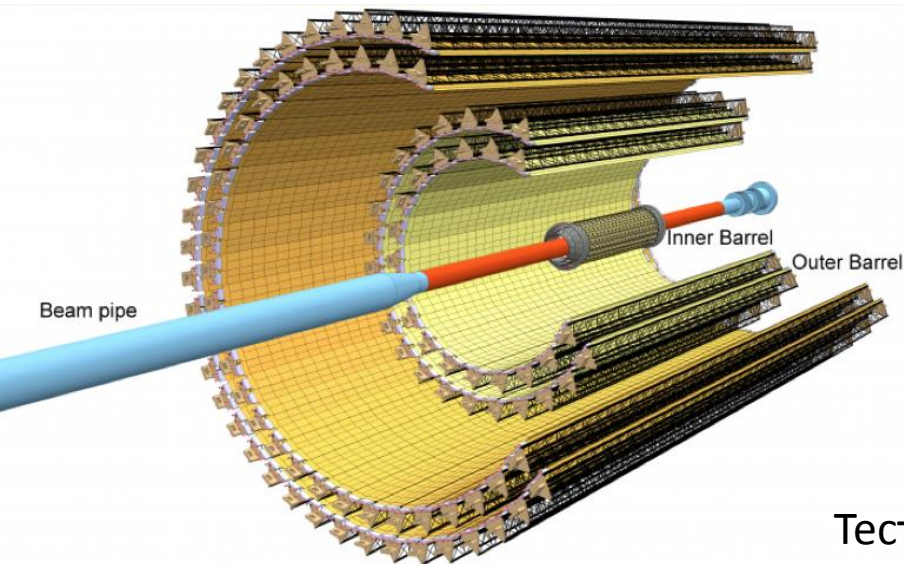
- в проекты физики высоких энергий вовлечены люди с разнообразными специализациями:
  - физики-теоретики, физики-экспериментаторы («детекторщики» и «анализаторы данных»), инженеры и техники
  - ... а также IT-специалисты (без сегодня них никуда!) и административные кадры
- Для работы с данными физики 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.



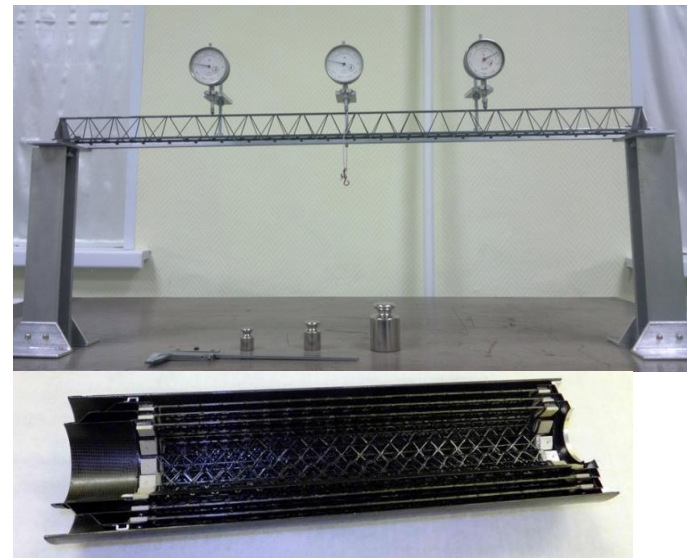
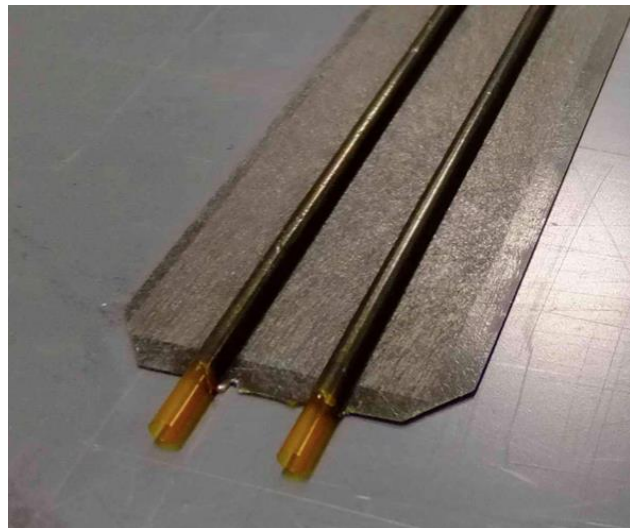
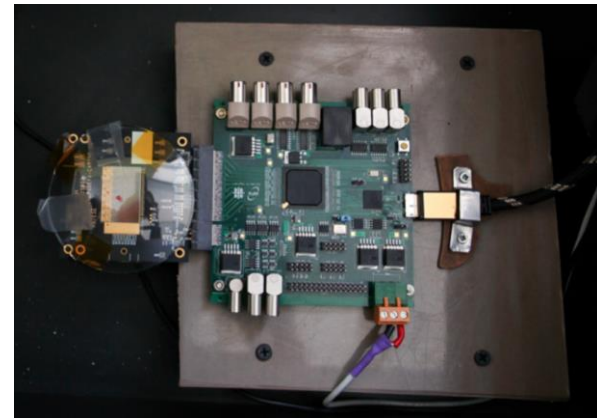
- 7 слоев вместо 6ти
  - новые чипы с пикселями
- высокоточная реконструкция распадов частиц с  $c$  и  $b$  кварками

## Разработки в СПбГУ:

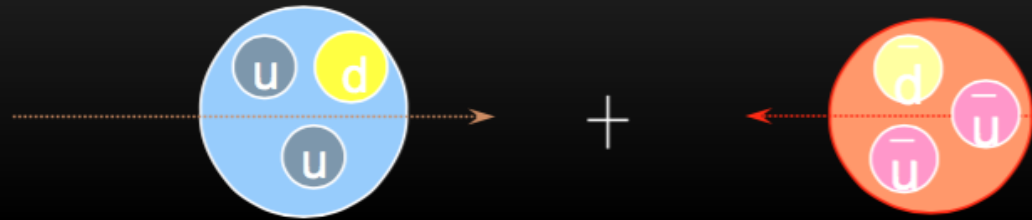
Система охлаждения:

Температурные и механические испытания ферм:

Тестирования матриц ALPIDE на стенде



# НЕИНТЕРЕСНЫЙ СНИМОК: ВЫБРАСЫВАЕМ

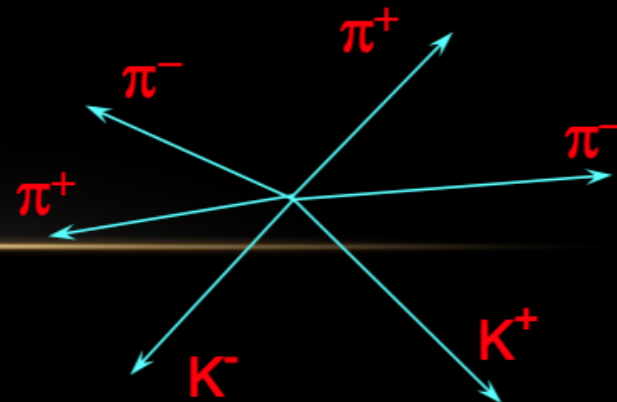
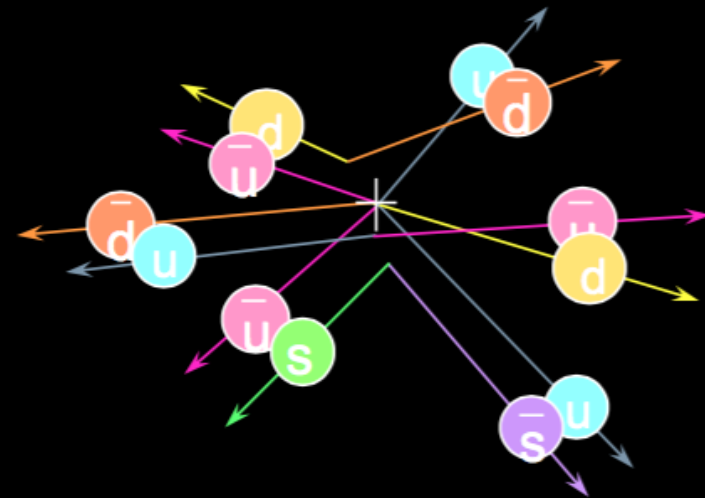


- Пример столкновения протона и антипротона:

- 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

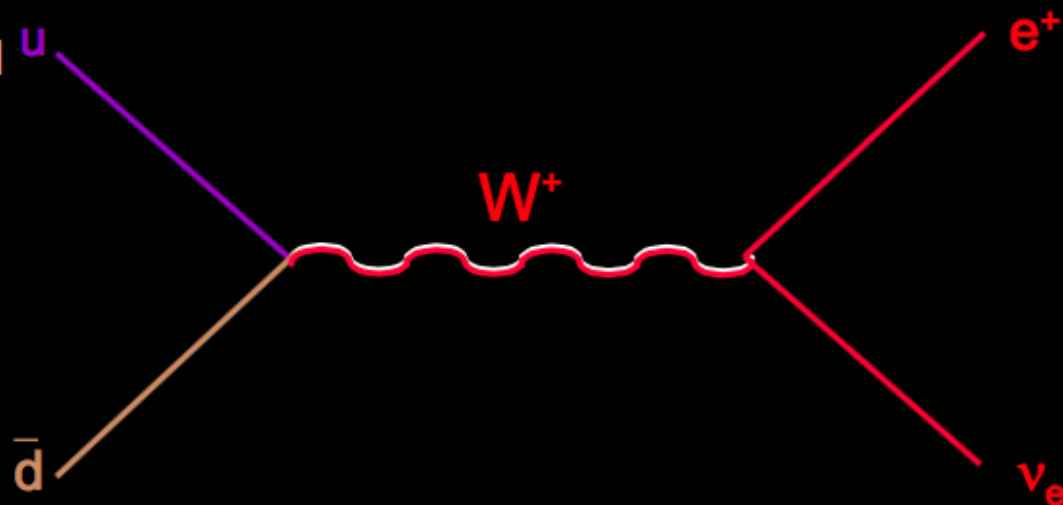


Аннигиляция кварка и антикварка

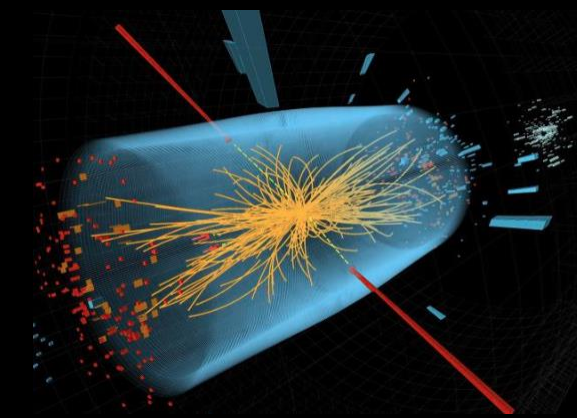
Пример: рождение  $W$ -бозона и его распад на позитрон и нейтрино

(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:

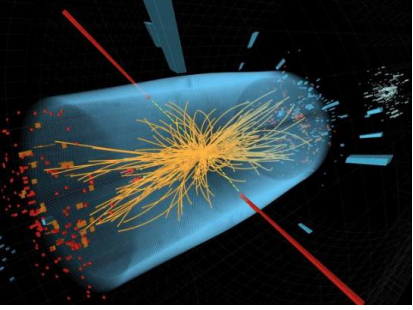
- отбор по грубым оценкам координат и энергии частиц

## Триггер высокого уровня:

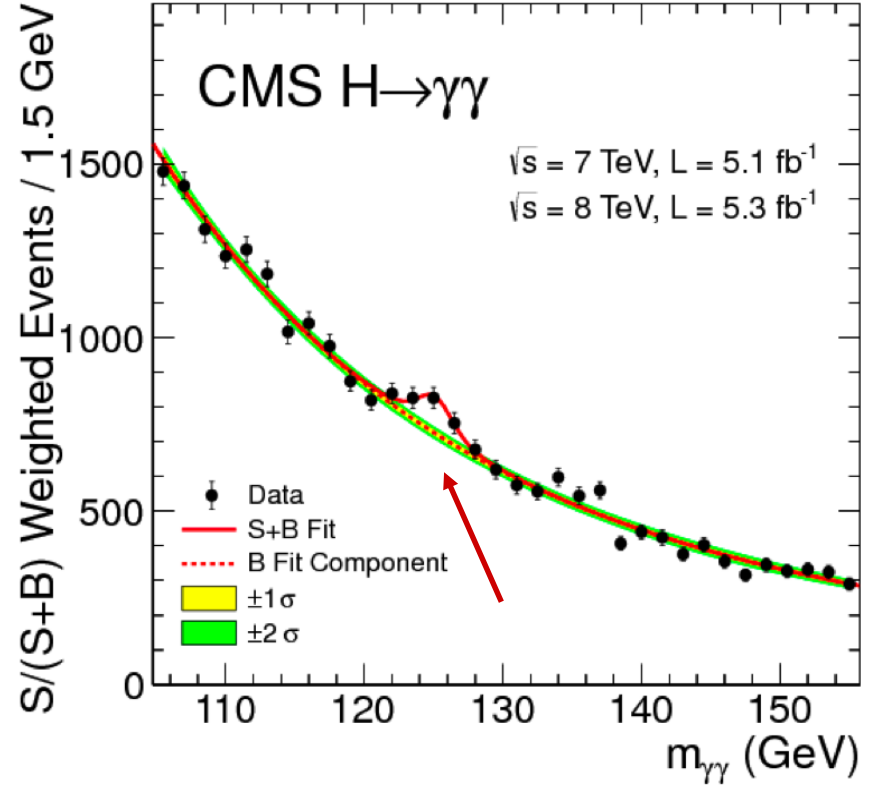
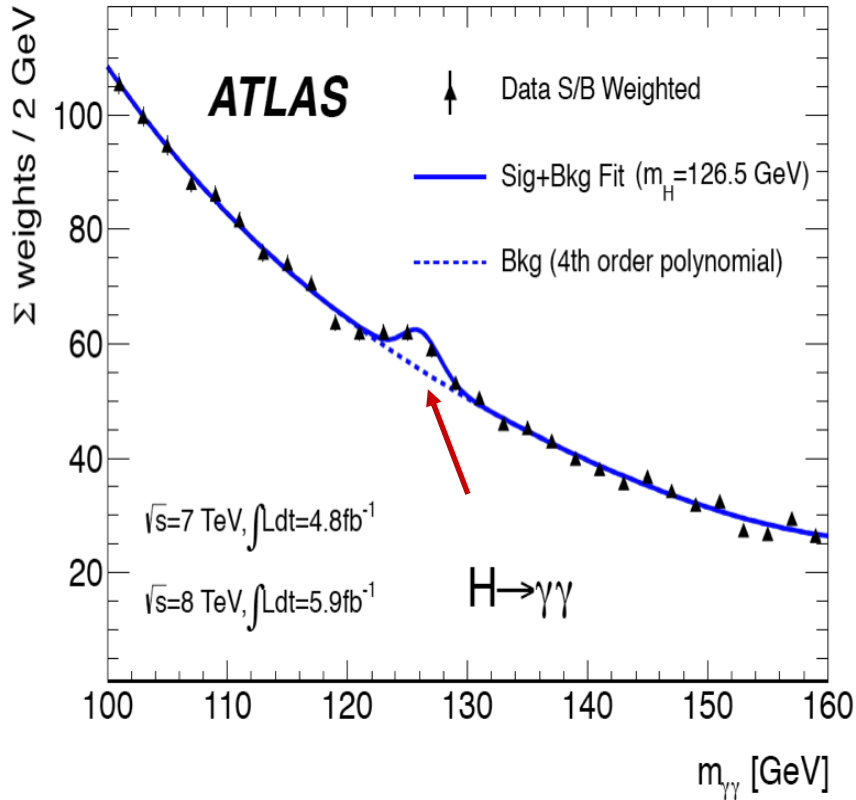
- вычислительные фермы для быстрой реконструкции и анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий

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

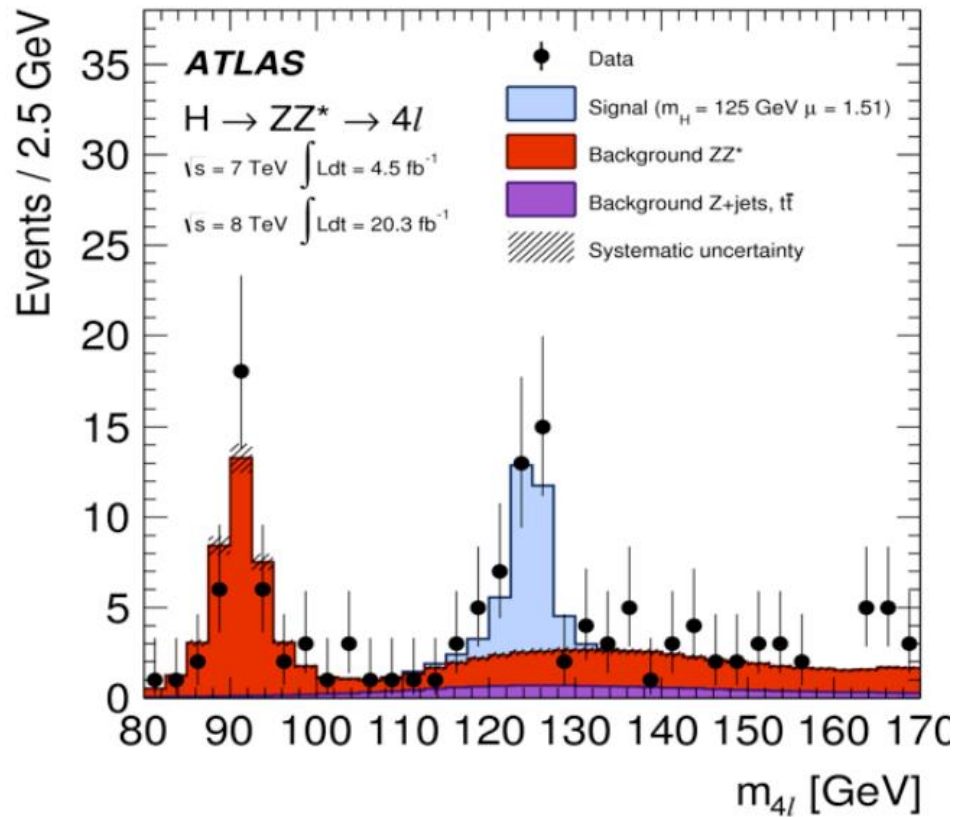




# Higgs decay to $\gamma\gamma$ , ATLAS and CMS, summer 2012 data



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

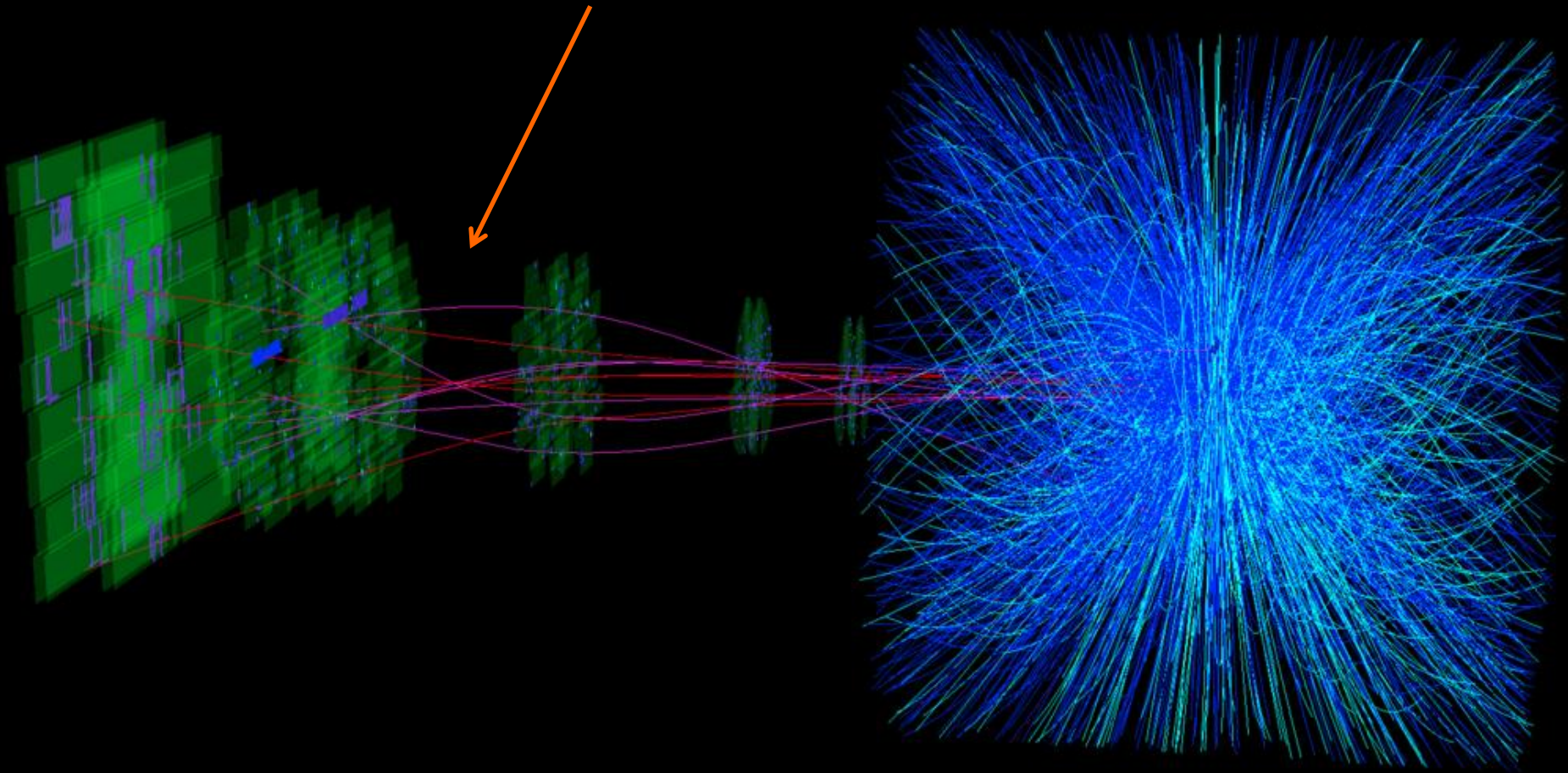


*сигнал, фон, данные эксперимента ATLAS*

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

