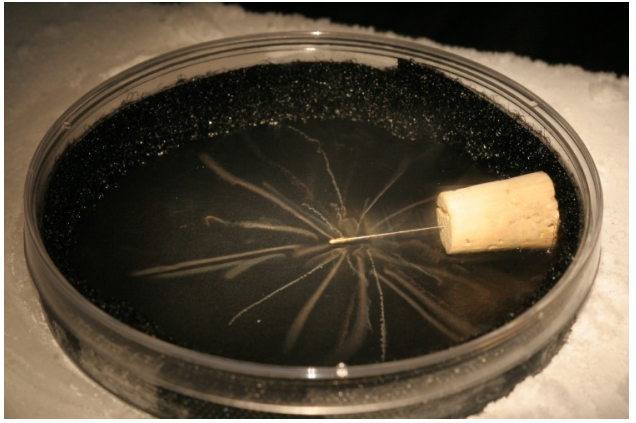
Компьютинг в физике высоких энергий

Жемчугов Алексей Сергеевич
ОИЯИ, г.Дубна

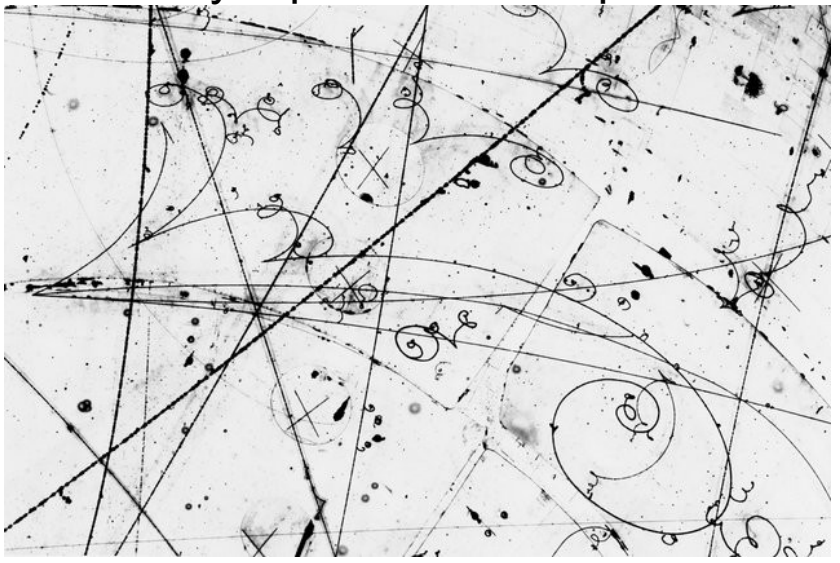
2026

Первые детекторы

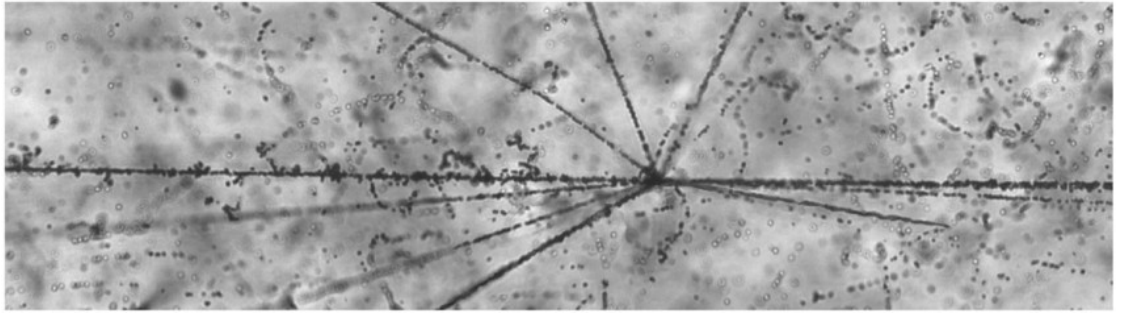
Камера Вильсона

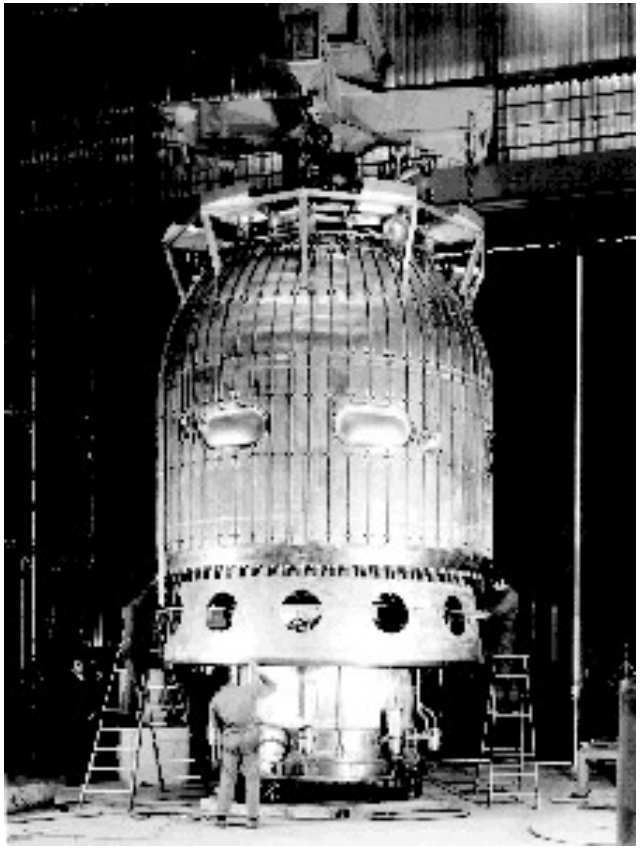


Пузырьковые камеры



Фотоэмульсии





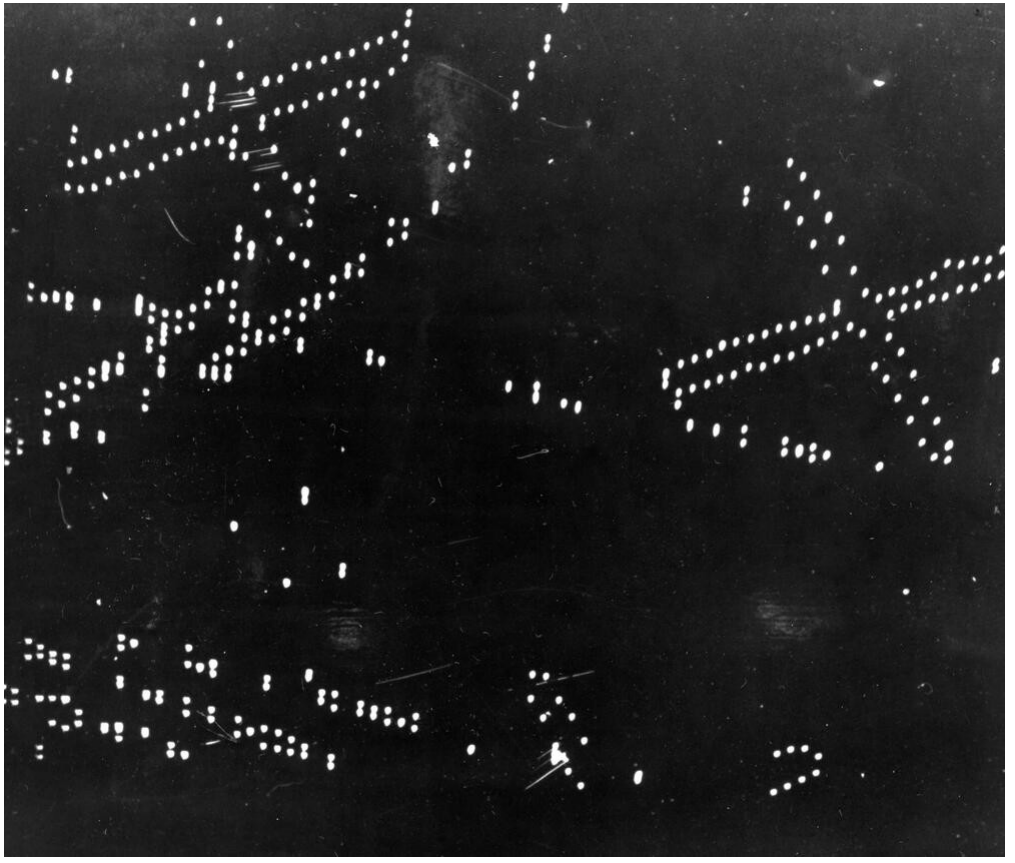
Пузырьковая камера ВЕВС (ЦЕРН)



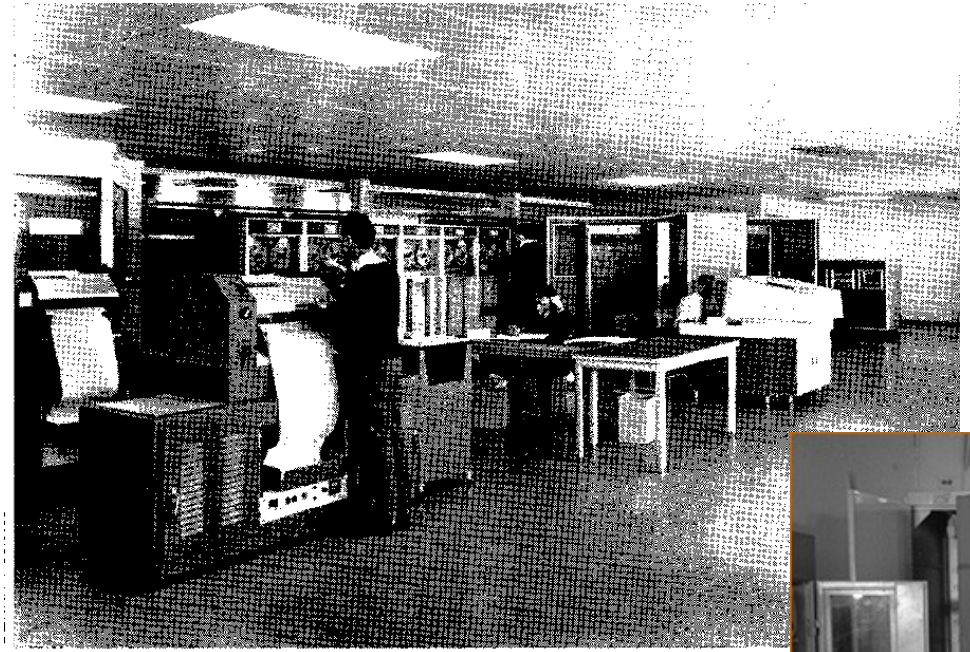
Просмотрщицы в ОИЯИ (1963 г).

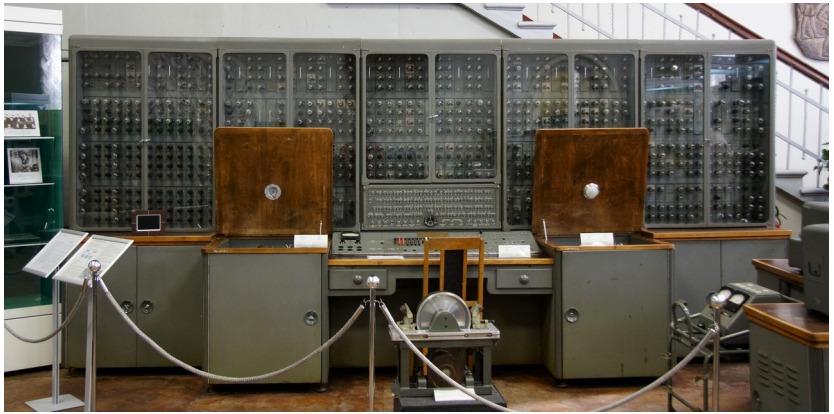
Сканирующие полуавтоматы

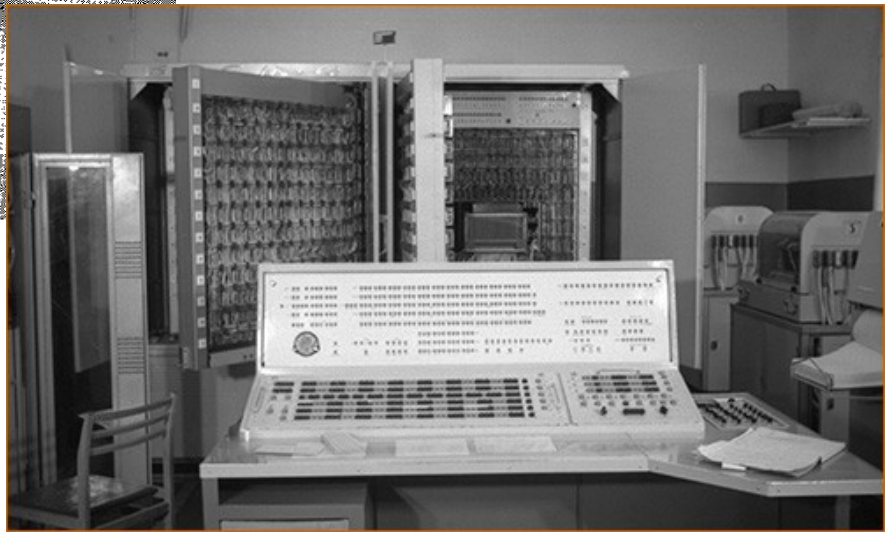




Первые компьютеры





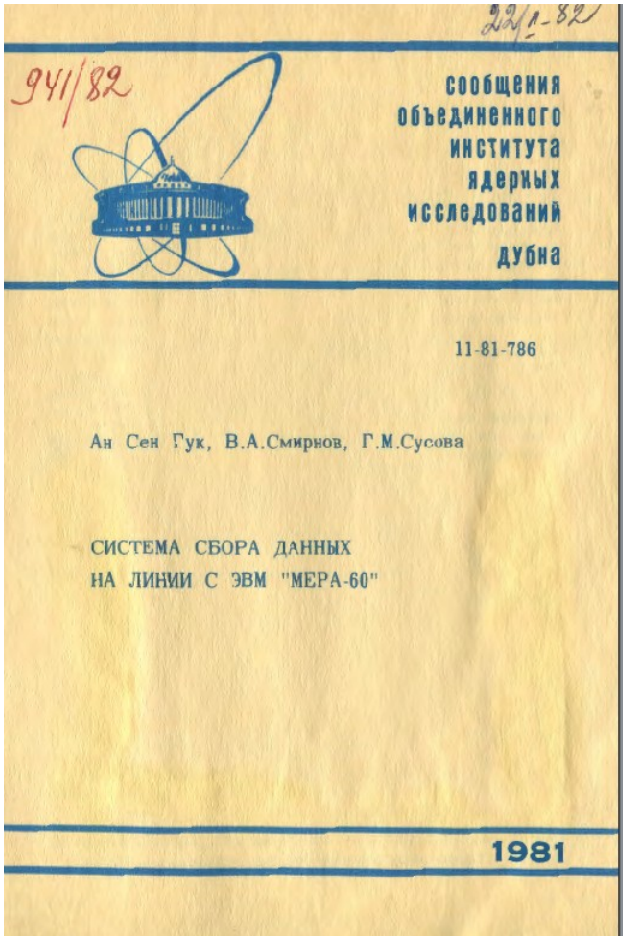


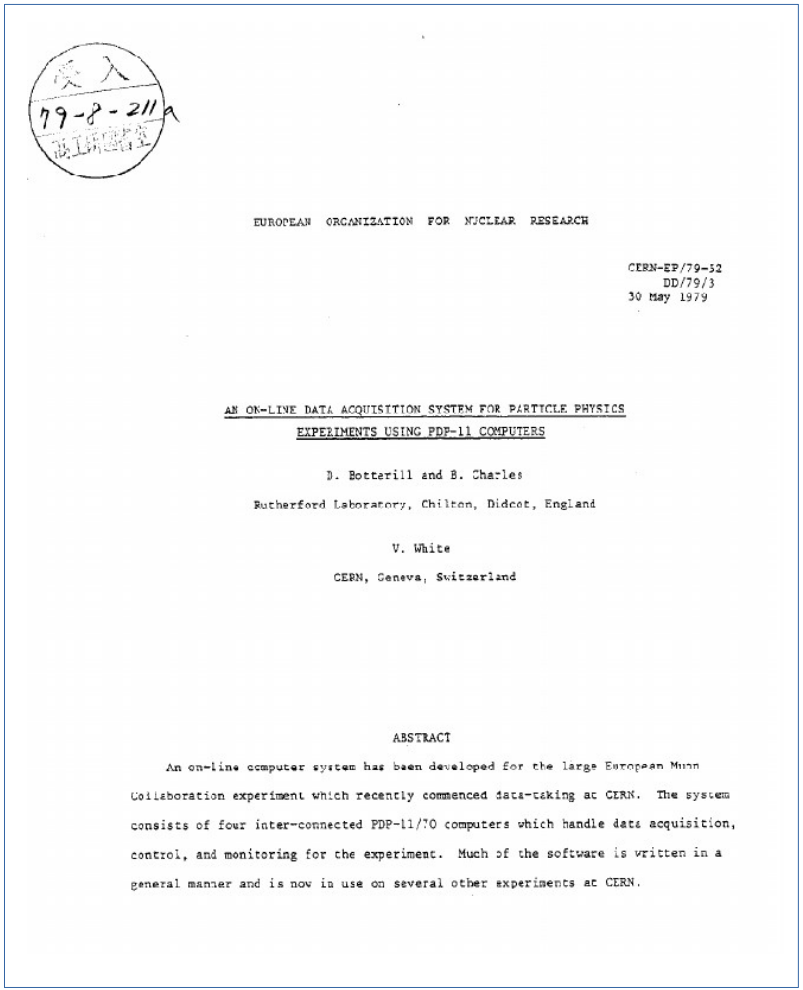
Первые суперкомпьютеры



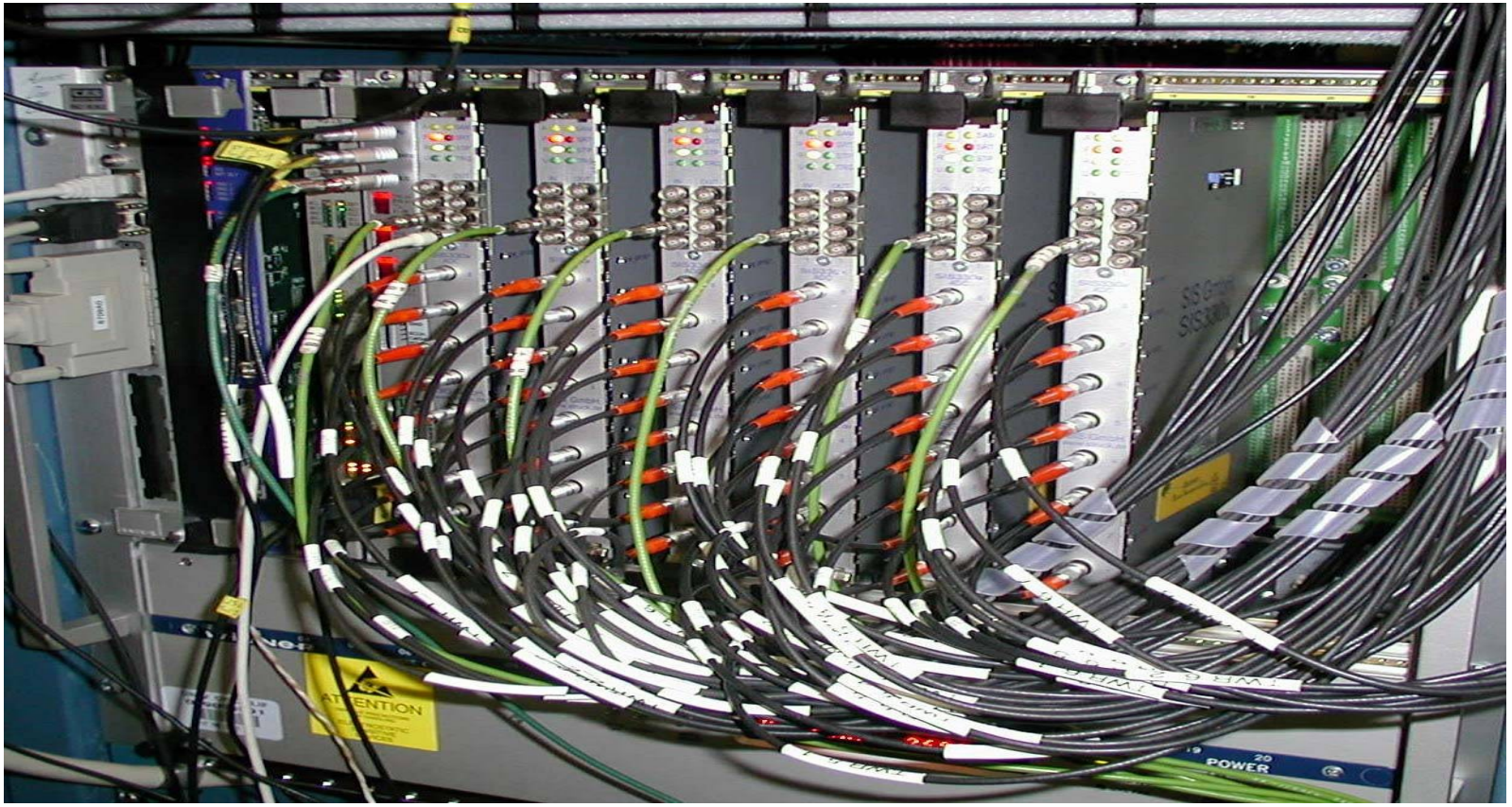





941/82
сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна
11-81-786
Ан Сен Гук, В.А.Смирнов, Г.М.Сусова
СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ
НА ЛИНИИ С ЭВМ "МЕРА-60"
1981

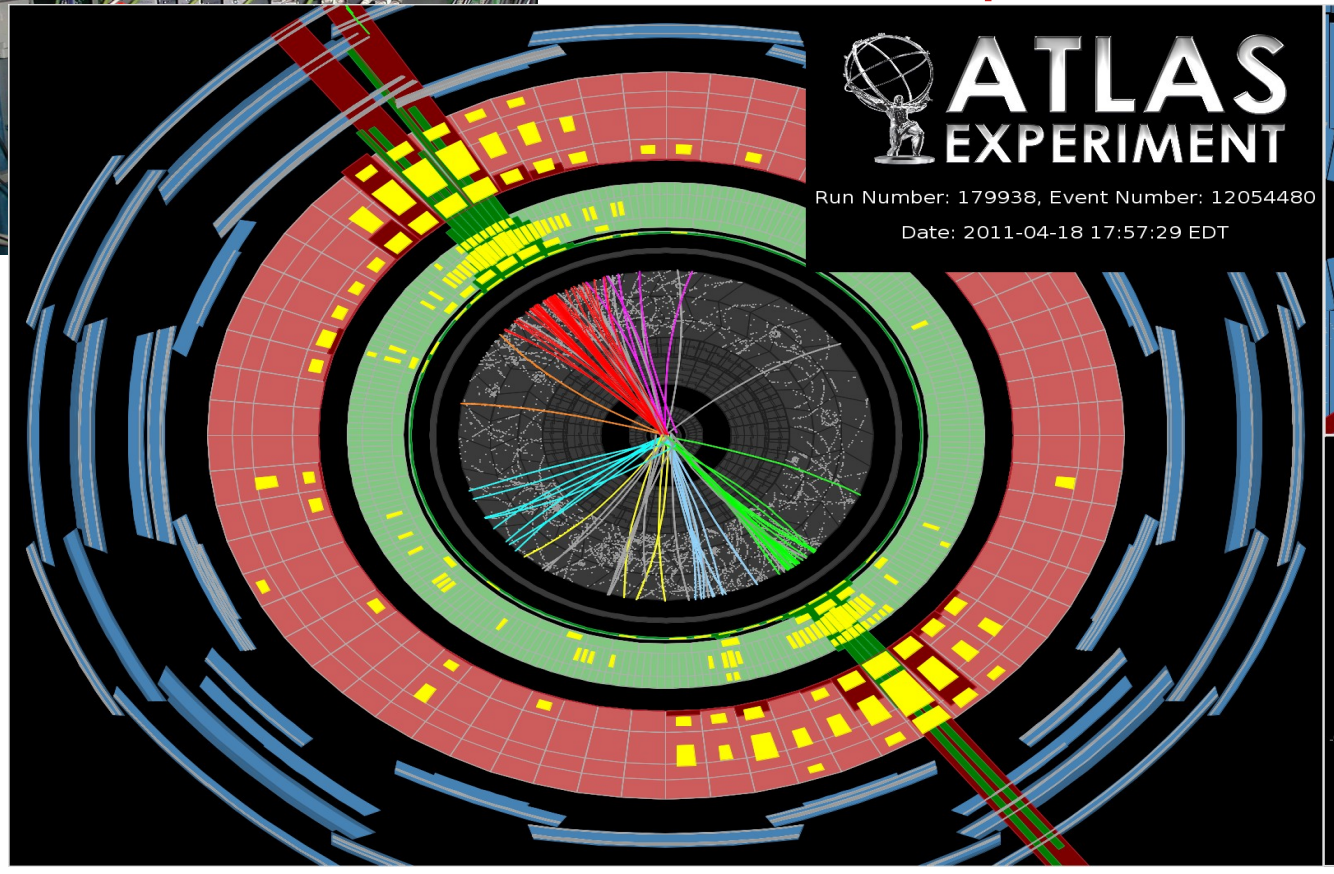

79-8-211
EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
CERN-EP/79-52
DD/79/3
30 May 1979
AN ON-LINE DATA ACQUISITION SYSTEM FOR PARTICLE PHYSICS EXPERIMENTS USING PDP-11 COMPUTERS
D. Botterill and B. Charles
Rutherford Laboratory, Chilton, Didcot, England
V. White
CERN, Geneva, Switzerland
ABSTRACT
An on-line computer system has been developed for the large European Muon Collaboration experiment which recently commenced data-taking at CERN. The system consists of four inter-connected PDP-11/70 computers which handle data acquisition, control, and monitoring for the experiment. Much of the software is written in a general manner and is now in use on several other experiments at CERN.

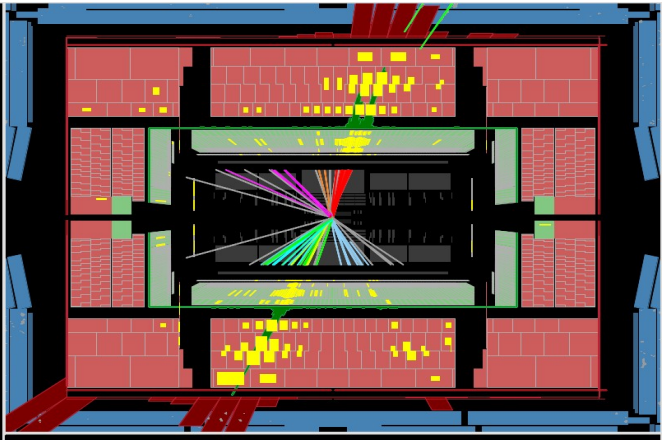
Сегодня: путь от ...

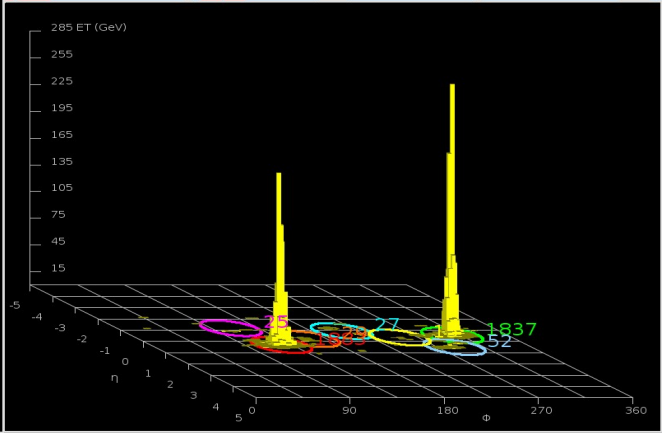


… через …

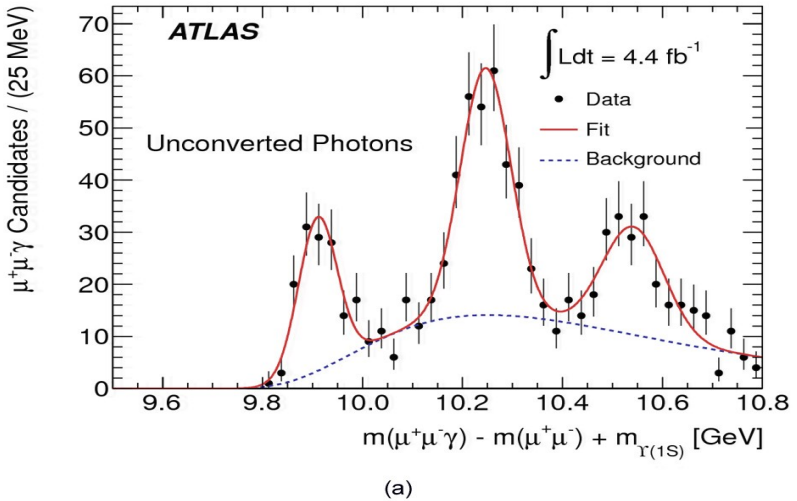


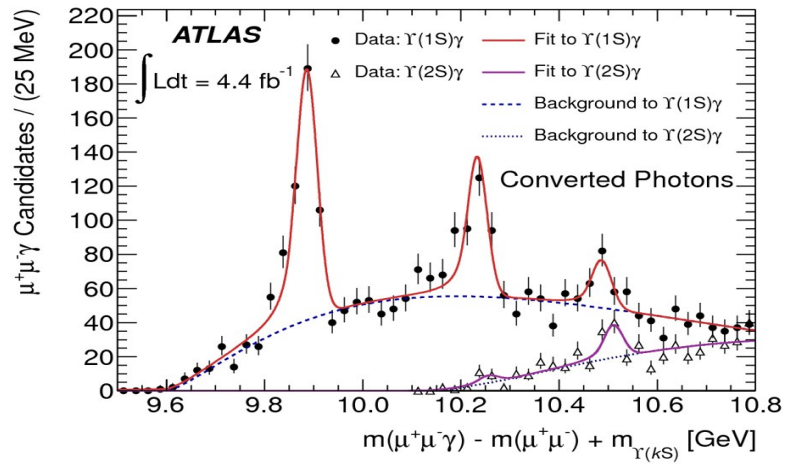

ATLAS
EXPERIMENT
Run Number: 179938, Event Number: 12054480
Date: 2011-04-18 17:57:29 EDT

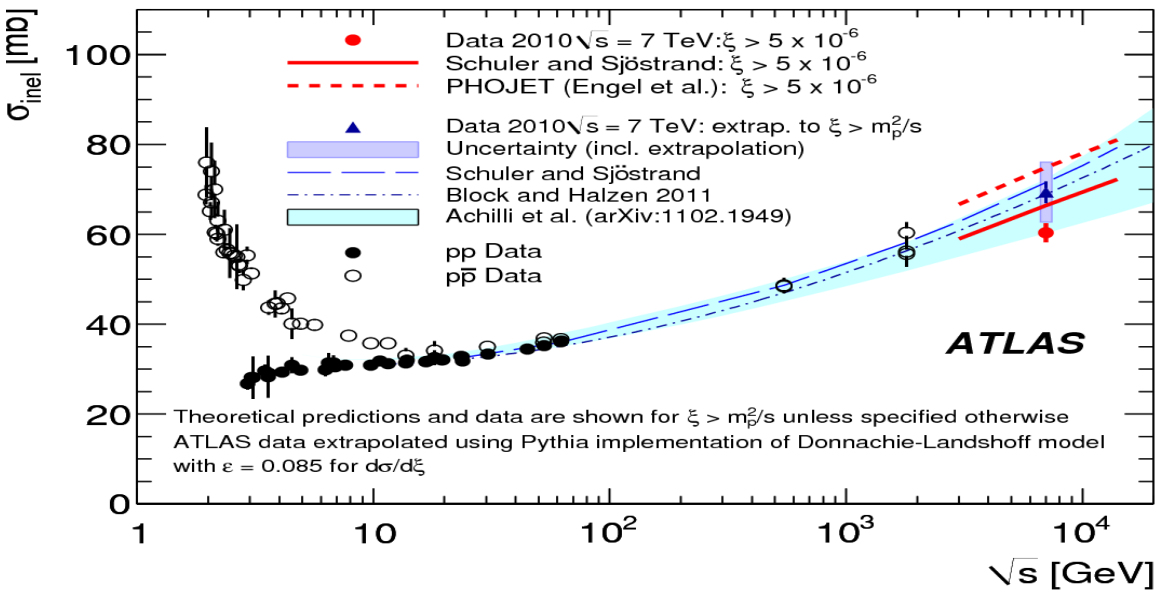


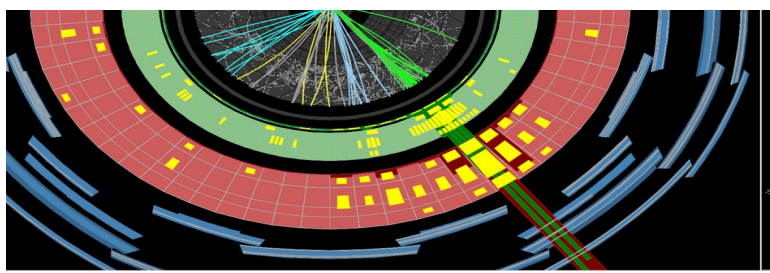

285 ET (GeV)
255
225
195
165
135
105
75
45
15
η
Φ
0
90
180
270
360
1837
52

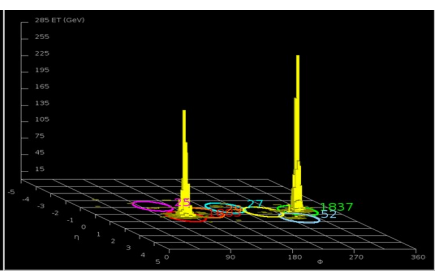
… κ …


ATLAS
∫Ldt = 4.4 fb-1
Data
Fit
Background
Unconverted Photons
μ+μ-γ Candidates / (25 MeV)
m(μ+μ-γ) - m(μ+μ-) + mΥ(1S) [GeV]
(a)


ATLAS
∫Ldt = 4.4 fb-1
Data: Υ(1S)γ
Data: Υ(2S)γ
Fit to Υ(1S)γ
Fit to Υ(2S)γ
Background to Υ(1S)γ
Background to Υ(2S)γ
Converted Photons
μ+μ-γ Candidates / (25 MeV)
m(μ+μ-γ) - m(μ+μ-) + mΥ(kS) [GeV]

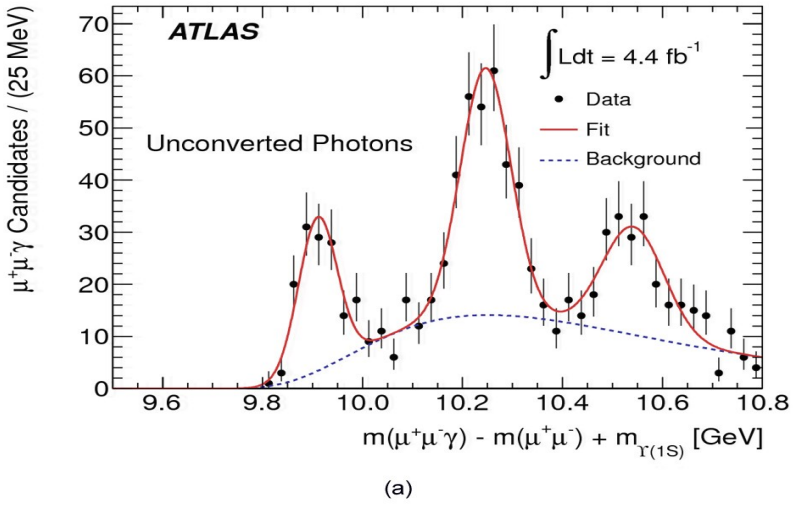

Data 2010 √s = 7 TeV: ξ > 5 x 10-6
Schuler and Sjöstrand: ξ > 5 x 10-6
PHOJET (Engel et al.): ξ > 5 x 10-6
Data 2010 √s = 7 TeV: extrap. to ξ > mp2/s
Uncertainty (incl. extrapolation)
Schuler and Sjöstrand
Block and Halzen 2011
Achilli et al. (arXiv:1102.1949)
pp Data
pp̄ Data
ATLAS
Theoretical predictions and data are shown for ξ > mp2/s unless specified otherwise
ATLAS data extrapolated using Pythia implementation of Donnachie-Landshoff model
with ε = 0.085 for dσ/dξ
σinel [mb]
√s [GeV]



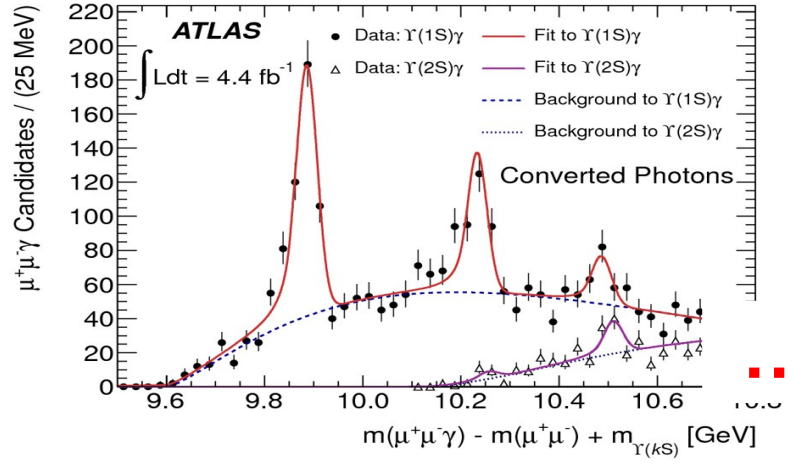


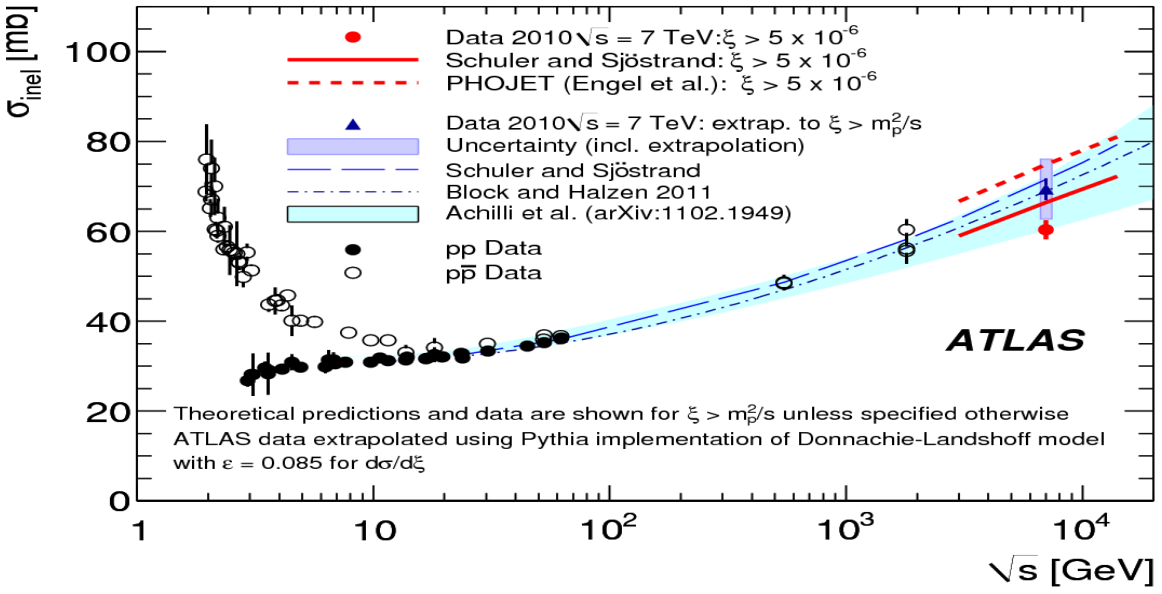


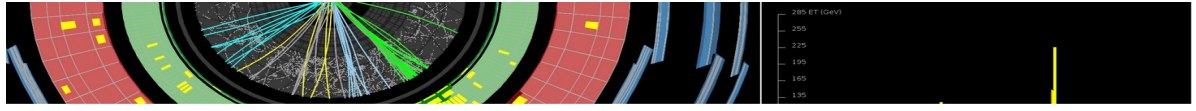
… к …



(a)







… без компьютеров невозможен!



ПО реального времени
Online software

Trigger and Event Filter

DAQ

Slow control and monitoring

ПО для автономной обработки
Offline software

Reconstruction and Calibration

Monte-Carlo simulation

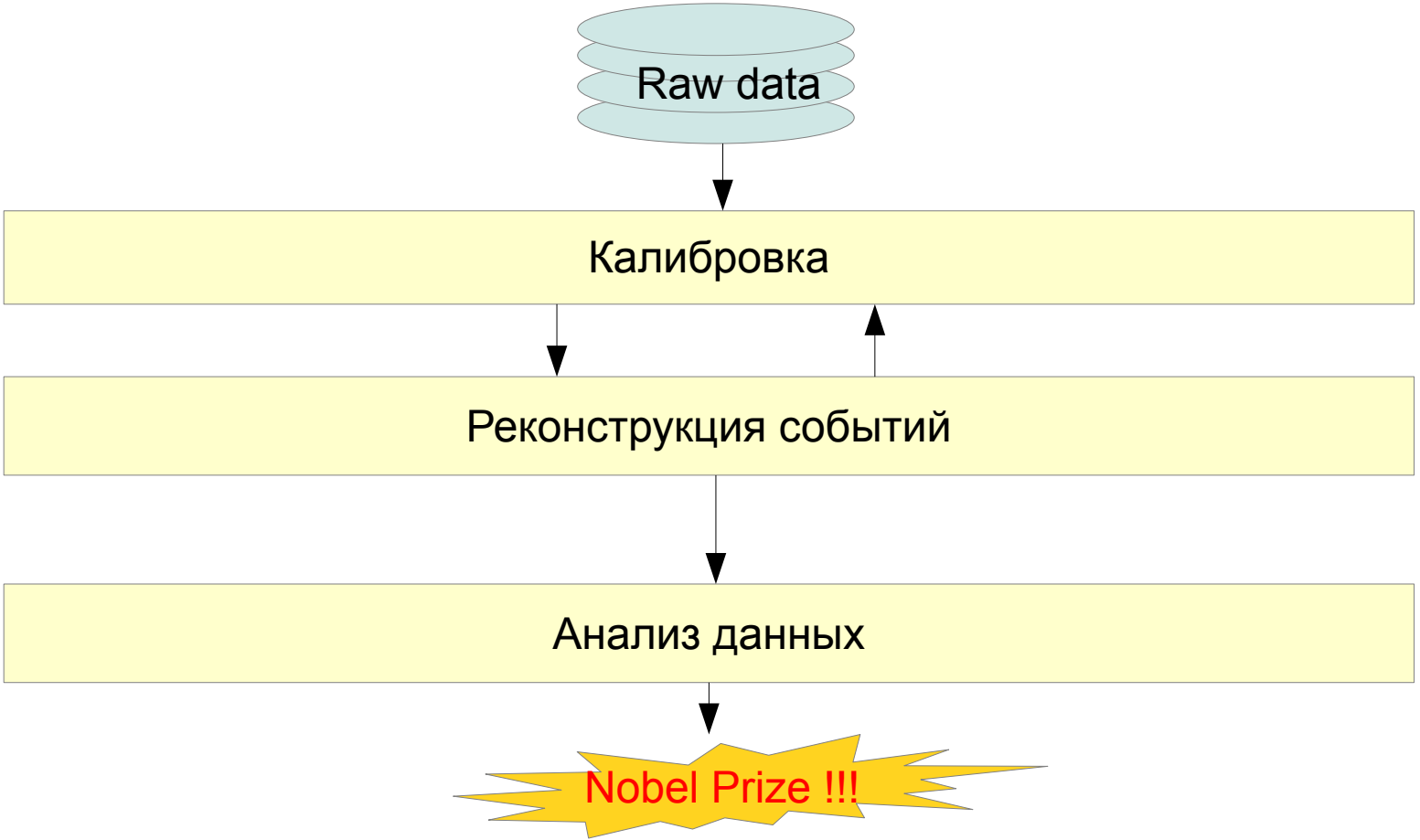
Analysis tools

«Сырые» данные

- Оцифованный отклик детектора
  - номер канала электроники
  - амплитуда (заряд, время)
  - форма сигнала (если применяются Flash ADC)
  - счетчики
  - …
- Структура несложная, но число каналов может быть очень велико (ATLAS на LHC ~ 10^8)
- Данные сохраняются в виде двоичных файлов
- Формат данных определяется электроникой и системой сбора данных (DAQ)
- Частота событий: до 100 kHz - ATLAS на LHC, 3 MHz - SPD/NICA
- Размер событий: до 1.5 MB в ATLAS
- 100 kHz x 1.5 MB = 150 GB/s (~ 1500 PB/год) - почти как Facebook!
- **ATLAS Run-III: 0.4 MHz → 0.6 PB/s MPD: 3.5 GB/s SPD: 20 GB/s**

```
0000000 aaaa 1234 0008 0000 0002 0000 0001 0000
0000010 f26b 01c9 7149 0003 0000 0000 0000 0000
0000020 aabb 1234 0005 0000 4653 2d4f 2032 2020
0000030 0009 0000 6152 646e 6d6f 7254 2067 2020
0000040 bbbb 1234 0009 0000 5543 0000 0000 0000
0000050 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000060 0000 0000 cccc 1234 0004 0000 0001 0000
0000070 31ac 0000 34aa aa12 0c6b 0000 0012 0000
0000080 0000 0300 5015 0079 0001 0000 0000 0000
0000090 000a 0000 7c0d 4d45 0014 0000 5543 0000
00000a0 0014 0000 0000 0000 0000 0000 0000 8000
00000b0 0000 0000 0000 0100 0000 0000 34bb bb12
00000c0 0693 0000 0009 0000 0000 0300 5015 00a1
00000d0 0001 0000 0000 0000 0001 0000 0000 8000
00000e0 34cc cc12 043f 0000 000b 0000 0000 0300
00000f0 0030 00a1 0001 0000 0000 0000 0003 0000
0000100 5543 0000 0014 0000 0000 0000 34dd dd12
0000110 0035 0000 0008 0000 0000 0300 0010 00a1
0000120 0001 0000 0000 0000 0000 0000 34ee ee12
0000130 0009 0000 0000 0300 0010 00a1 0000 0000
```

Обработка данных в физике высоких энергий



Калибровка

Установление соответствия между откликом детектора и физическими величинами, которые он измеряет

- *Юстировка*
- *Выравнивание коэффициентов усиления*
- *Измерение скорости дрейфа в дрейфовых камерах*
- *Синхронизация и калибровка T0*
- *Шкала энергии в калориметрах*
- *….*

Зависит от амплитуды сигнала, температуры, электрического и магнитного поля и многих других факторов.

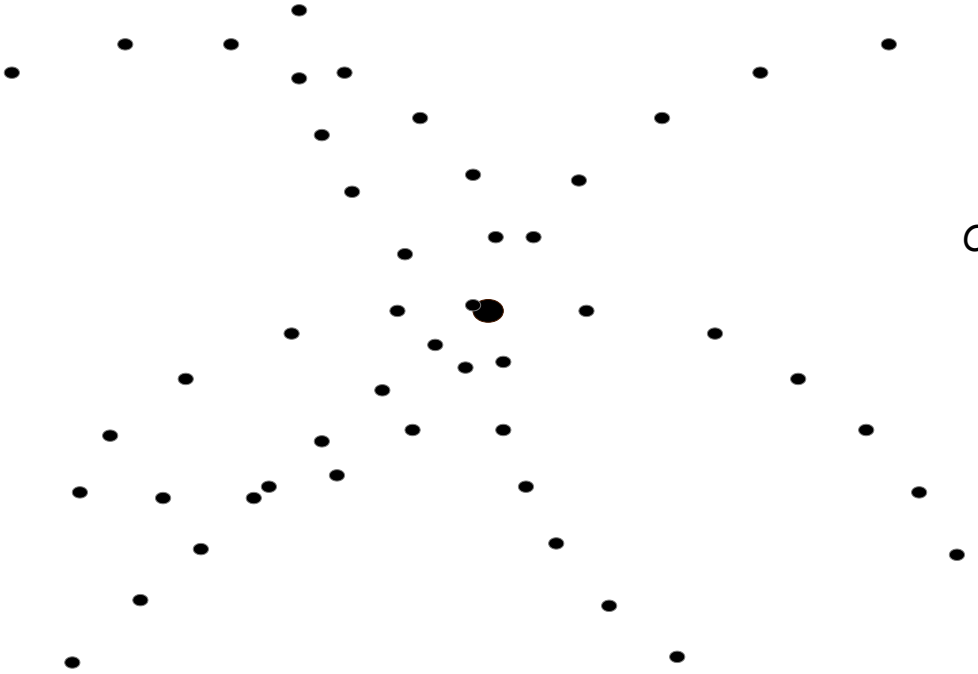
В течение эксперимента (5-10-15 лет!) калибровка проводится постоянно

Реконструкция

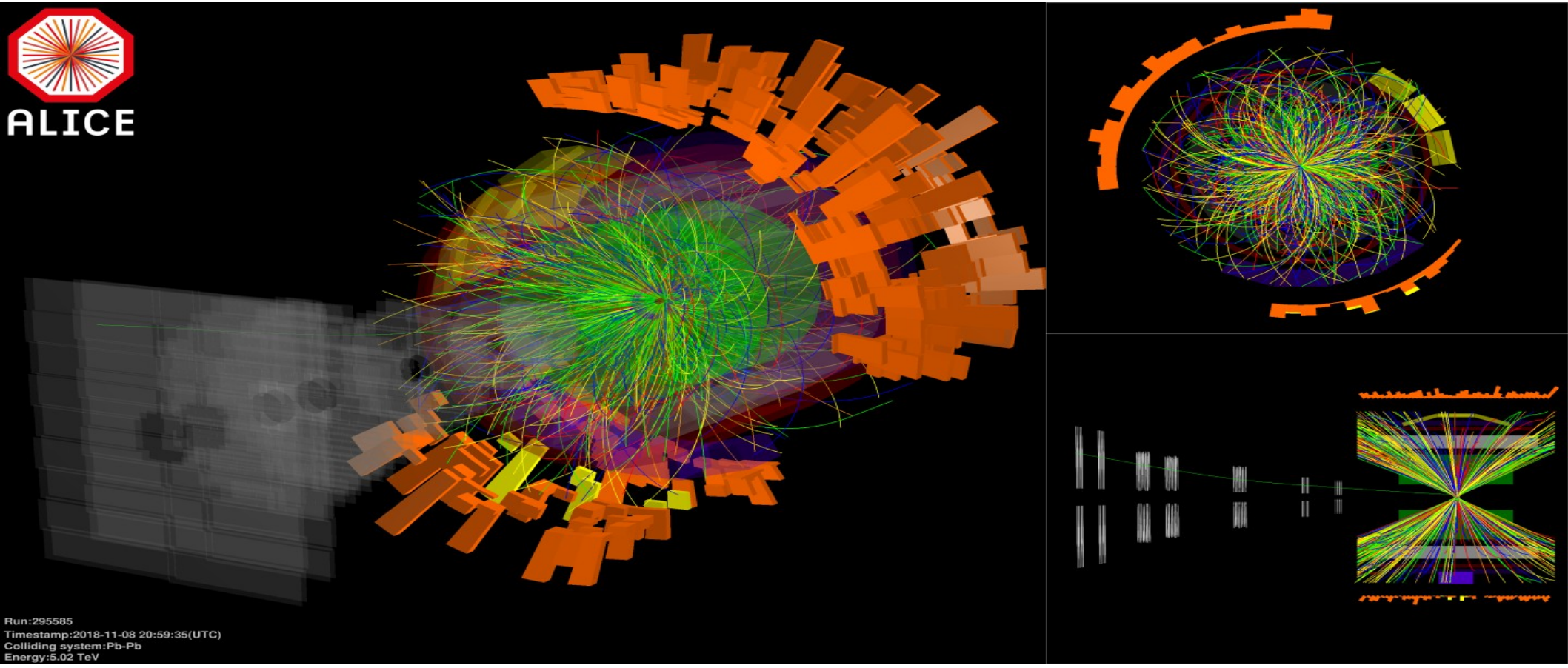
Переход от отклика детектора к элементарным частицам

- Распознавание образов треков
- Фитирование треков и вершин
- Восстановление струй
- Восстановление ливней в калориметрах
- Измерение энергии, импульса, времени пролета
- Идентификация частиц

Попробуйте распознать треки?



Ответ: 8 треков


ALICE
Run:295585
Timestamp:2018-11-08 20:59:35(UTC)
Colliding system:Pb-Pb
Energy:5.02 TeV

Анализ данных

- Отбор событий, подавление фоновых вкладов
- Внесение поправок на потери энергии, аксептанс и эффективность детектора, многократное рассеяние, вторичные взаимодействия и т.д.
- *Получение физического результата*
- Оценка систематических погрешностей
- Теоретическая интерпретация

Зачем нужно моделирование?

Имитация физических процессов и отклика детекторов в проводимом или планируемом эксперименте

- Вопрос:

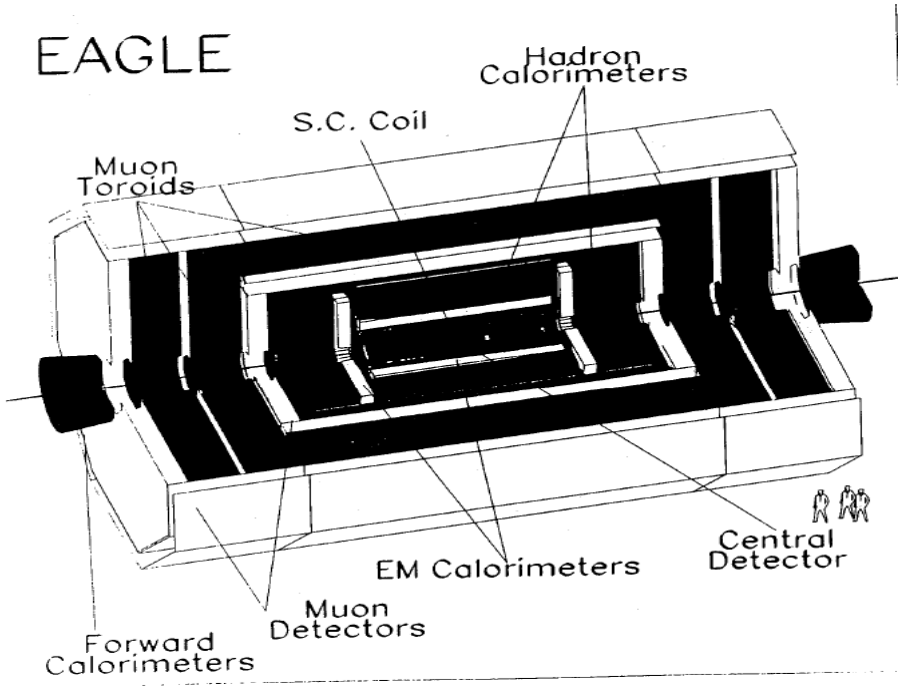
Если мы умеем моделировать на компьютере все физические процессы в установке, можем ли мы совсем обойтись без проведения физического эксперимента?

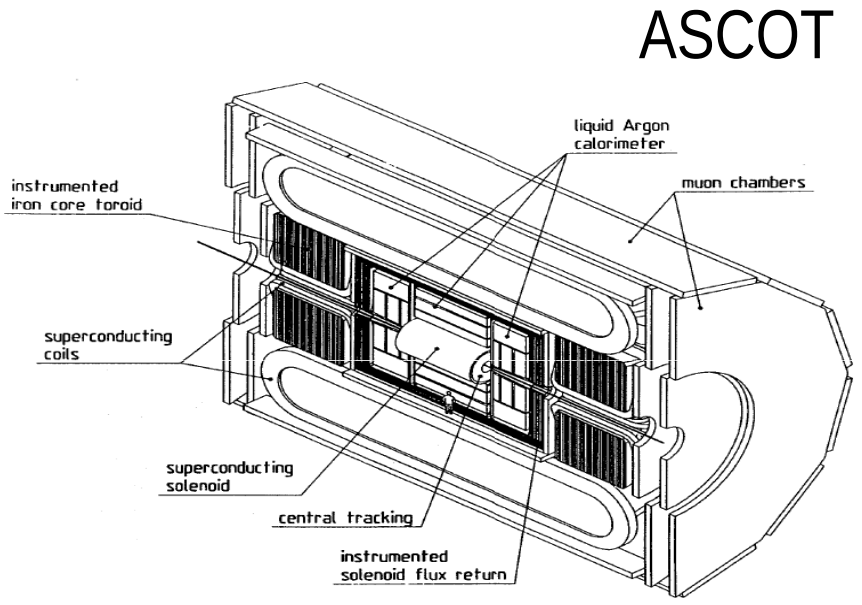
- Еще вопрос:

Если у нас уже есть результаты реальных измерений, зачем их моделировать?

Планирование эксперимента

Какой детектор лучше подходит для поиска бозона Хиггса?





Зачем нужно моделирование?

Имитация физических процессов и отклика детекторов в проводимом или планируемом эксперименте

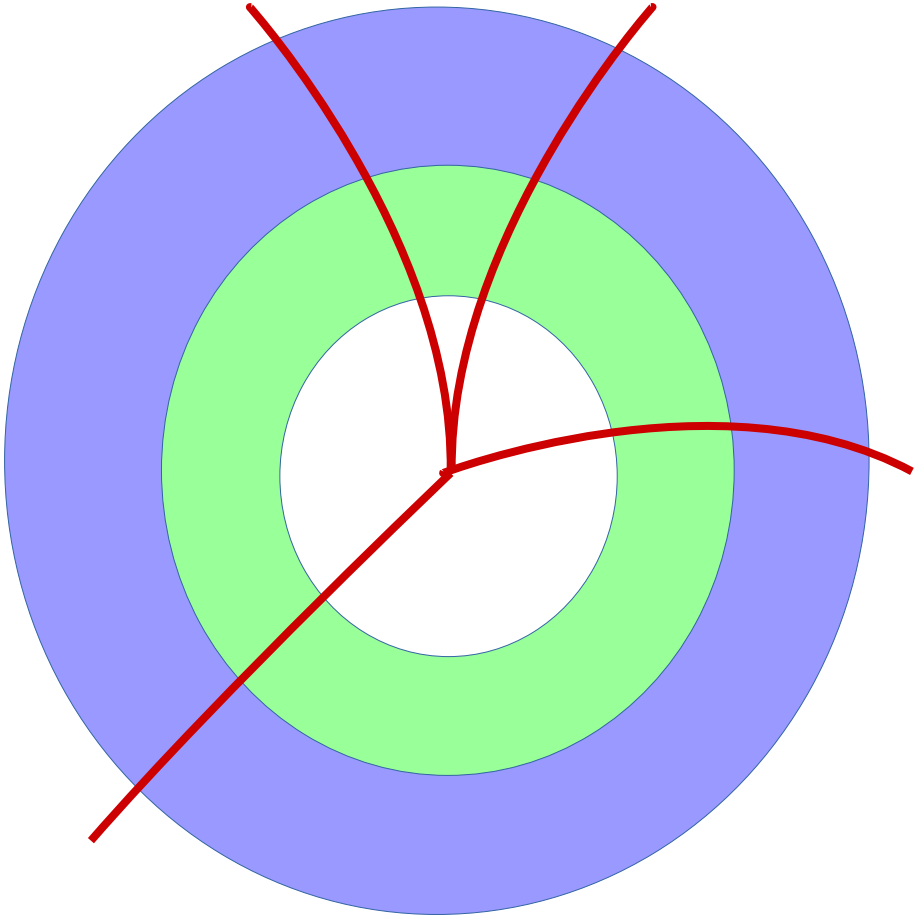
- Вопрос:

Если мы умеем моделировать на компьютере все физические процессы в установке, можем ли мы совсем обойтись без проведения физического эксперимента?

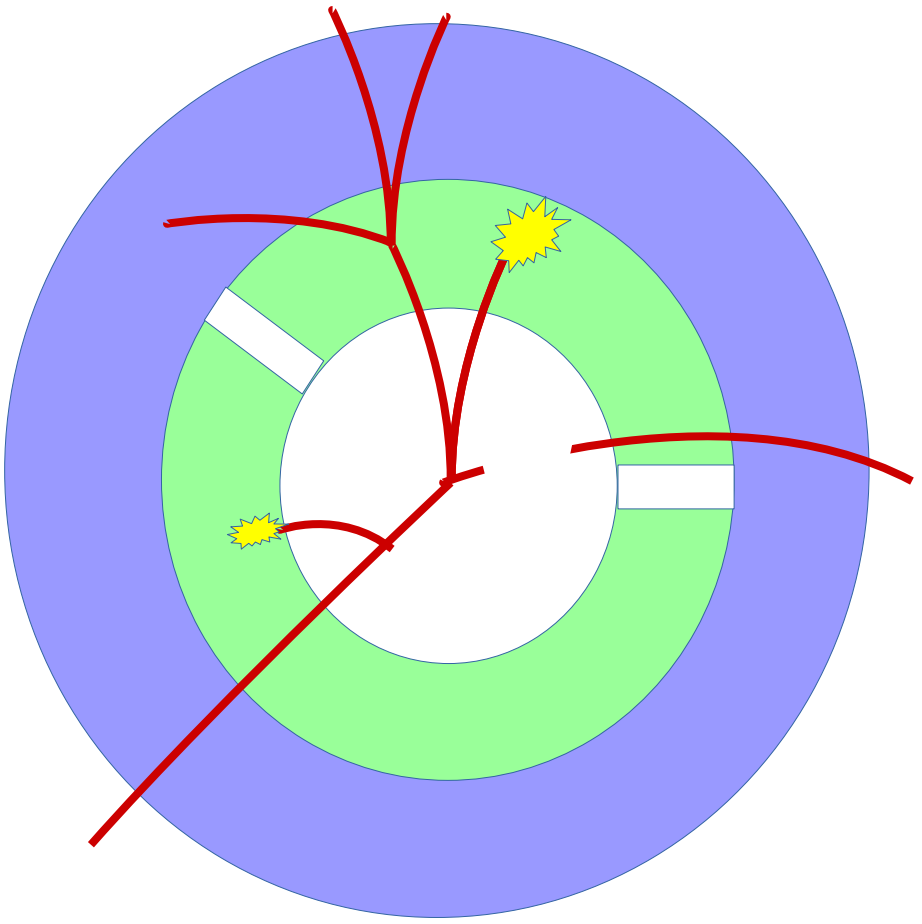
- Еще вопрос:

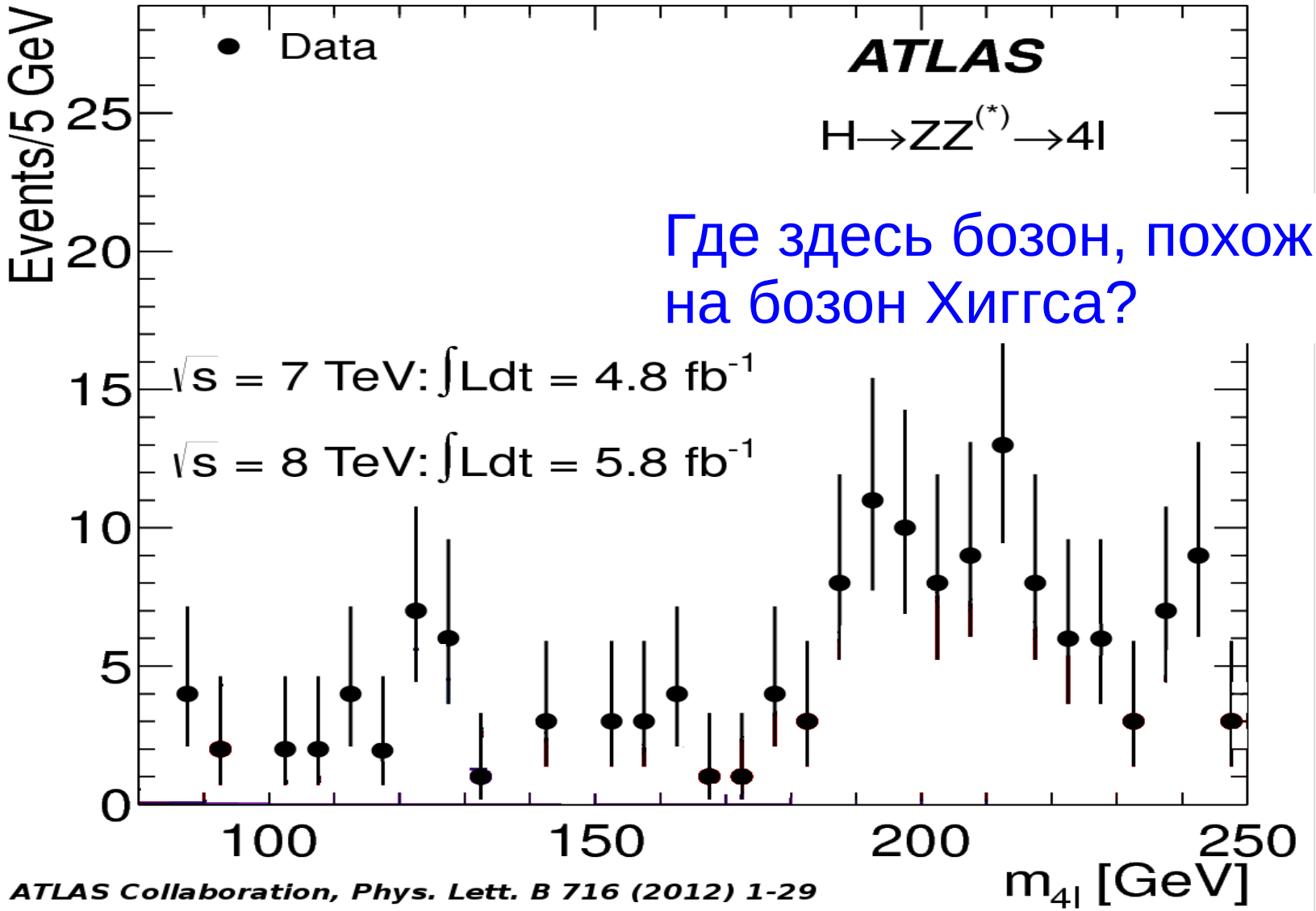
Если у нас уже есть результаты реальных измерений, зачем их моделировать?

В идеальном мире

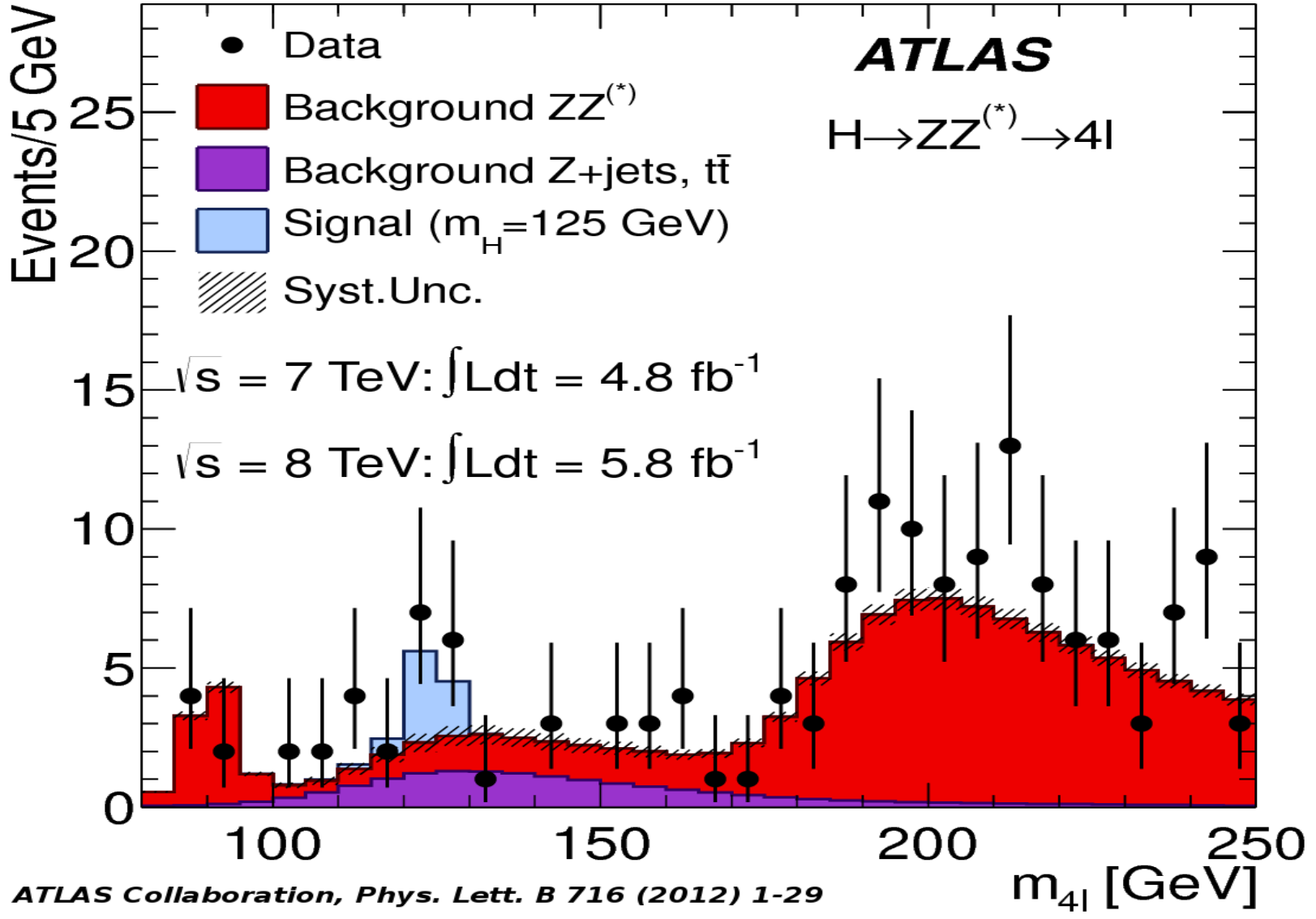


В реальном мире



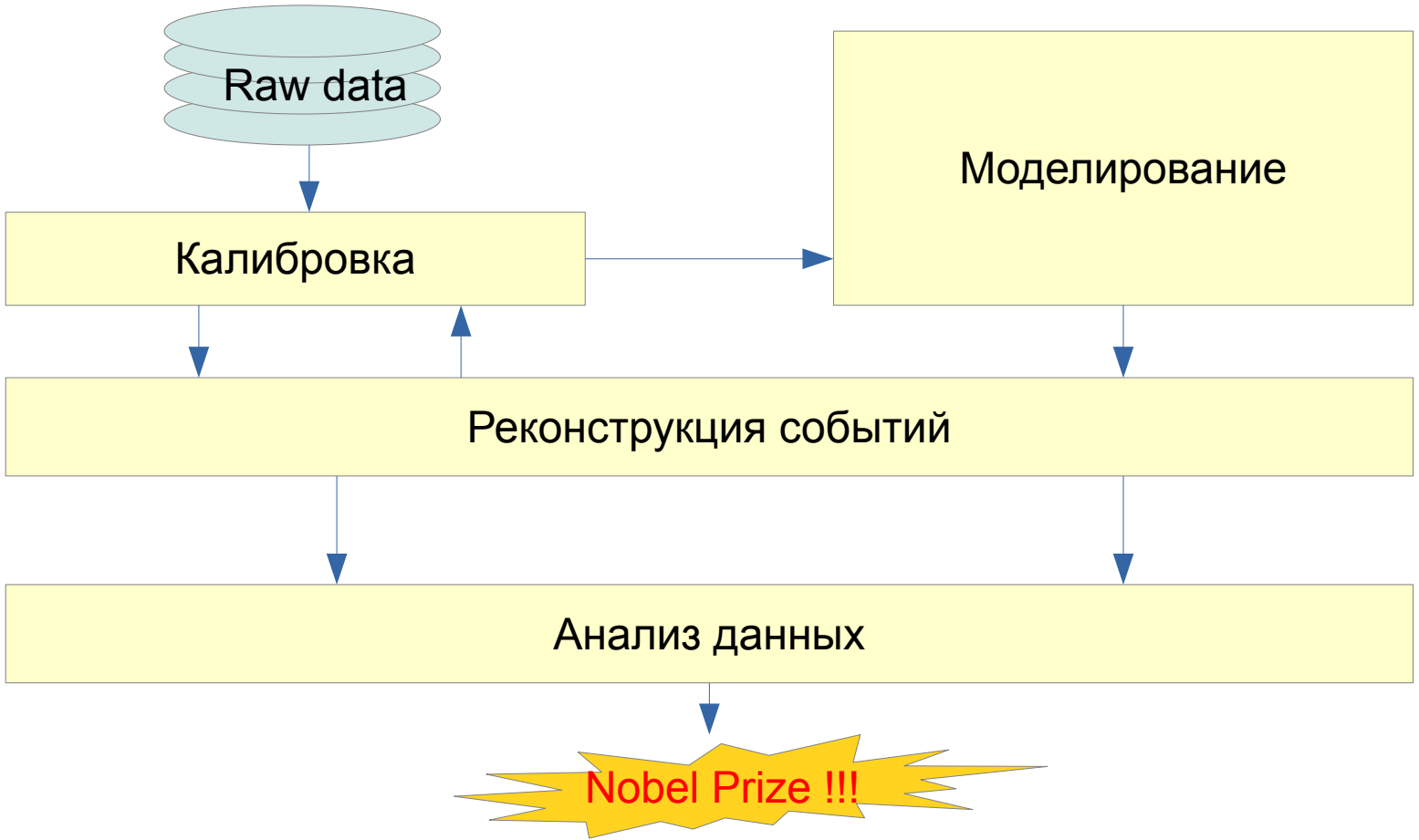


Где здесь бозон, похожий на бозон Хиггса?



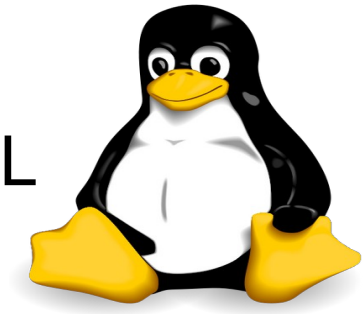
ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29

Обработка данных в физике высоких энергий



Платформа

- **Linux —** основная платформа в физике высоких энергий
- Особенно **CentOS/AlmaLinux** основанный на RHEL (фактически стандарт для WLCG грид-сайтов)
- Почему?
  - хорош для программ реального времени (быстрый, надежный и стабильный)
  - хорош для автономной обработки (удобный для пользователя, стабильный, хорош для пакетной обработки)
  - есть много готового ПО для физики частиц со времен UNIX
  - он свободный!



ПО: стандартные инструменты и самоделки

- **Калибровка** и **реконструкция** очень сильно зависят от конструкции детектора – ПО обычно разрабатывается для каждого эксперимента с нуля.
- **Моделирование** основано на известных физических законах и моделях, в сочетании с индивидуальными особенностями геометрии и материалов детектора. В настоящее время для моделирования практически все используют пакет GEANT4.
- Методы **анализа данных** более-менее одинаковы во всех экспериментах. Сегодня фактически стандартным инструментом является пакет ROOT.
- **Фреймворки** широко распространены для организации ПО эксперимента и общих операций (работа с БД, хранение данных, организация цикла событий и т. д.) Фактически, есть несколько семейств фреймворков (Gaudi/Athena, Art, AliRoot/FairRoot)

Размеры ПО

Table 6. SLOCCount measured lines of source code for ATLAS and CMS.

Experiment Type	Source Lines of code (SLOC)	Development effort (person-years)	Total estimated cost to develop
ATLAS	5.5M	1630	220 M$
CMS	4.8M	1490	200 M$

Фреймворки:

ATLAS/Gaudi: 115k SLOC, 29 FTEy, 4M$

CMSSW/FWCore and friends: 325k SLOC, 87 FTEy, 12M$

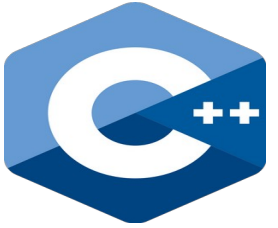
Для сравнения:

Linux Kernel is: 15M sloc, 4800 FTEy, 650M$ (3x CMS)

Geant4 is: 1.2M sloc, 330 FTEy, 45 M$ (1/4x CMS)

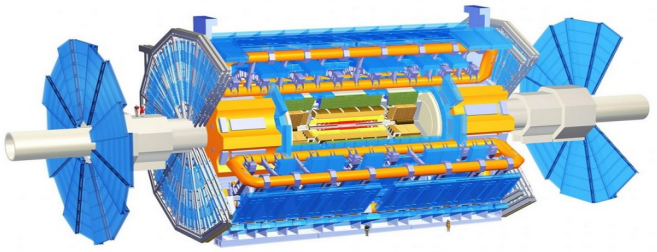
Языки программирования





- Два основных языка: C++ и Python
- Иногда применяются и другие, но крайне редко
- C++
  - если правильно пользоваться, можно написать очень эффективный код
  - очень богатые возможности языка
- Python
  - можно быстро написать сложную программу
  - можно “склеивать” имеющиеся высокопроизводительные модули
  - существует набор пакетов и библиотек для численных математических методов, машинного обучения и анализа данных

Компьютинг в современном эксперименте



События после отбора
в реальном времени
~ 1-10 GB/s

Калибровка, реконструкция ...



Передача данных в Грид
~ GB/s



2х-3х кратный объем
реальных данных



Около 500 человек
в неделю с задачами
анализа данных



users

Группы Монте-Карло моделирования

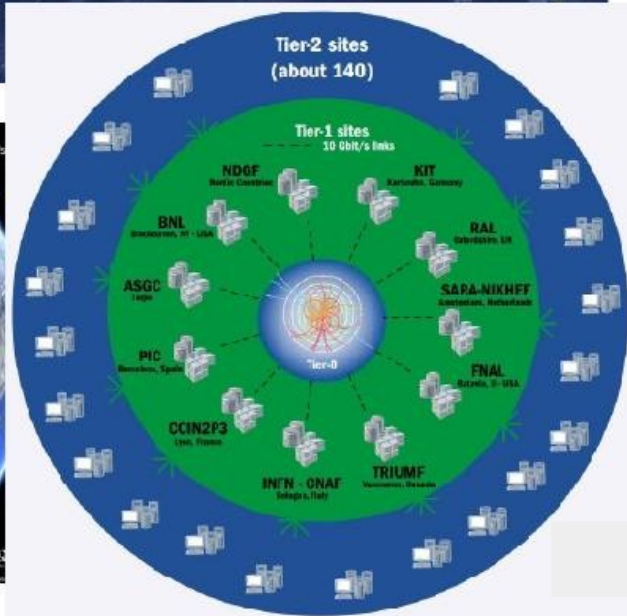
Worldwide LHC Computing Grid

Distributed high-throughput computing infrastructure to store, process & analyze data produced by LHC experiments

- 167 sites, 42 countries, 63 MoU's
- >1 million CPU cores
- ~1.4 EB disk storage
- ~2.9 EB tape storage
- Optical private network (LHCOPN) and overlay over NRENs (LHCONE) with 100 Gbps links
- ~Tbps LAN bandwidth between compute and storage nodes at sites







Другие эксперименты

- Хорошо, LHC очень большие. Что происходит в других экспериментах?

BELLEII *arXiv:1308.0672*

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Tape [PB]	2.8	2.8	2.8	2.8	19.24	54.43	103.55	153.89	204.64	255.39
Disk [PB]	4.00	4.00	5.00	8.00	27.98	79.17	115.68	153.10	190.82	228.55
CPU [kHepSPEC]	45.00	45.00	50.00	55.00	328.31	568.98	567.54	609.45	643.14	672.60

Table 1: Total required Belle II computing resources

GlueX

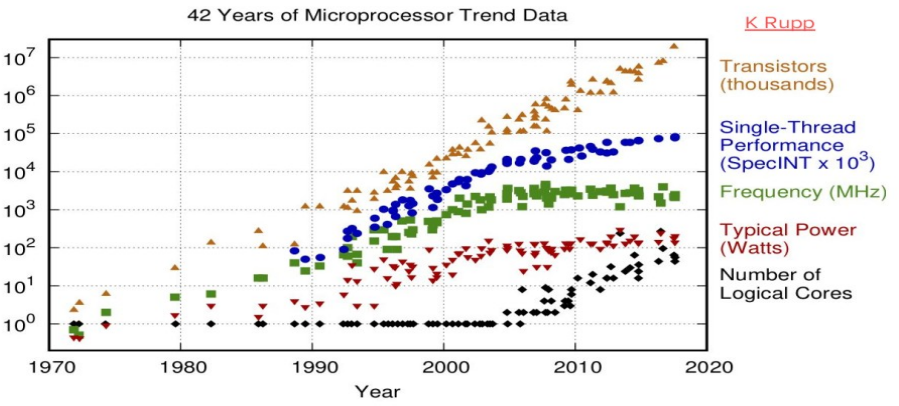
	2017 (low intensity GlueX)	2018 (low intensity GlueX)	2019 (PrimEx)	2019 (high intensity GlueX)
Real Data	1.2PB	6.3PB	1.3PB	3.1PB
MC Data	0.1PB	0.38PB	0.16PB	0.3PB
Total Data	**1.3PB**	**6.6PB**	**1.4PB**	**3.4PB**
Real Data CPU	21.3Mhr	67.2Mhr	6.4Mhr	39.6Mhr
MC CPU	3.0Mhr	11.3MHr	1.2Mhr	8.0Mhr
Total CPU	**24.3PB**	**78.4Mhr**	**7.6Mhr**	**47.5Mhr**

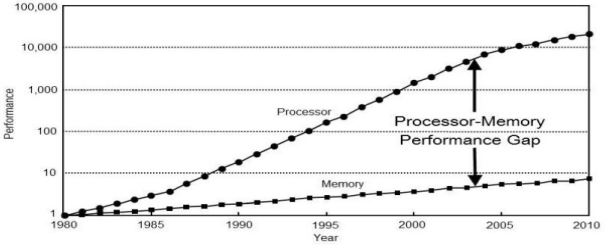
В современных экспериментах **средних** размеров поток данных **~10-50 ПБ/год** – обычное дело!

Сколько стоит хранение и обработка данных?

Технологическая эволюция в мире ИТ

- Плотность транзисторов на микросхемах увеличивается согласно закону Мура, как и прежде
  - но время удвоения выросло
- Тактовая частота процессоров не растет с 2006 года
- 3 ГГц максимум, из-за ограничений мощности на единицу площади кристалла
- Доступ к памяти сейчас занимает ~100 тактов
  - производительность зависит от структуры данных
- Значение новых архитектур (напрмер, GPU) растет и будет расти







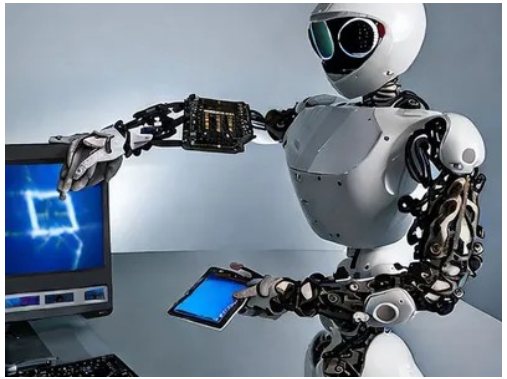
Спасут ли физику элементарных частиц параллельные вычисления?

- События в ФЭЧ происходят (и обрабатываются) независимо друг от друга
  - параллелизм на уровне событий это так естественно!
- Параллельная обработка внутри событий и/или работа с большим числом ядер (например, >1000 ядер GPU) требует специальных алгоритмов
  - иначе мы будем неэффективно использовать либо ядра, либо память
- Проблема: хороший физик не всегда хороший программист (и наоборот) !
- Знание физики нужно для правильной работы алгоритмов и программ, умение программировать – для создания эффективного кода для параллельных/гетерогенных вычислительных ресурсов.

Машинное обучение

- **Подбор математической модели для описания данных с помощью обучения на случайной выборке**
- Методы машинного обучения получили бурное развитие за последние 10-15 лет
  - Существуют стандартные инструменты: *tensorflow*, *pytorch*, *theano* и т.д.
  - Присутствуют всюду, в каждом доме и в каждом смартфоне
  - Хорошо распараллеливаются на современных компьютерах
- Пока еще ограниченно применяются в физике частиц:
  - требуют очень подробного и точного моделирования
  - сложно оценивать систематическую погрешность
  - применение в анализе данных неизменно заканчивается большим разочарованием: получить результат очень легко, доказать его правильность намного труднее
- Алгоритмы реконструкции?
  - поиск треков, восстановление ливней в калориметре
  - контроль работы во время анализа данных, как для любых алгоритмов реконструкции
- Потенциал методов машинного обучения в физике высоких энергий огромен (если, конечно, их правильно применять!)

Можем ли мы доверять ИИ-реконструкции?



- Контроль систематической погрешности имеет решающее значение для любого измерения
- Нужны методы контроля качества работы ИИ
- Применение ИИ на стадии триггера высокого уровня делает вопрос о доверии к результатам еще более важным!

- В истории физики частиц есть период, когда реконструкцией событий занимались люди. Можем ли мы использовать этот опыт?
- Можно запустить параллельно ИИ и классическую реконструкцию и сравнить.
- Состав набора данных: обучающие данные должны содержать включенные события, смоделированный сигнал, измеренные данные, которые не могут быть смоделированы (например, шум или фон от ускорителя)
- Можно изучить стабильность работы ИИ при изменении условий эксперимента (энергия пучка и положение вершин, шум, множественность треков и т. д.)
- Можно ли научить сеть саму оценивать качество своей работы?



Иллюстрация: эксперимент SPD на коллайдере NICA

Проект NICA



График

2009 – начало проектирования

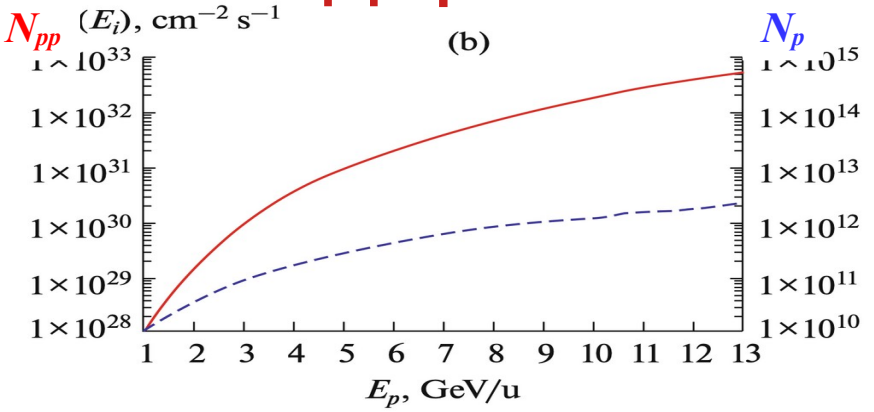
2016 — начало строительства

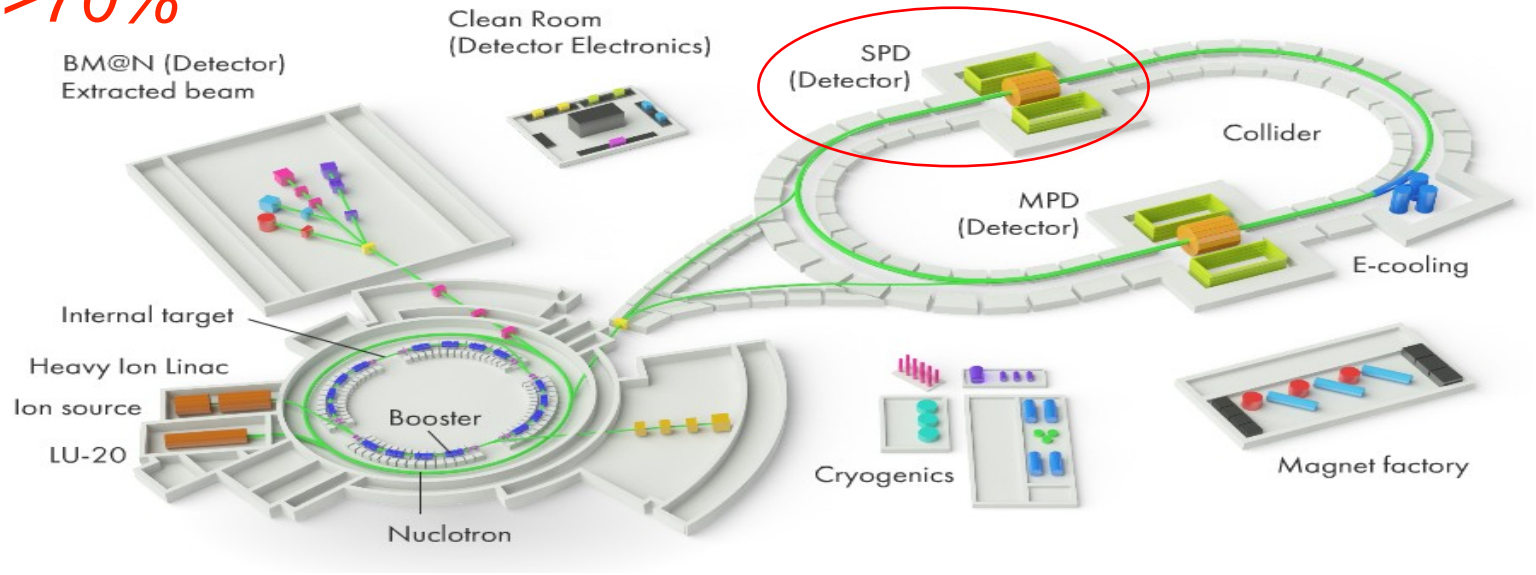
2025 — циркуляция пучка и первые столкновения

Эксперимент SPD на коллайдере NICA

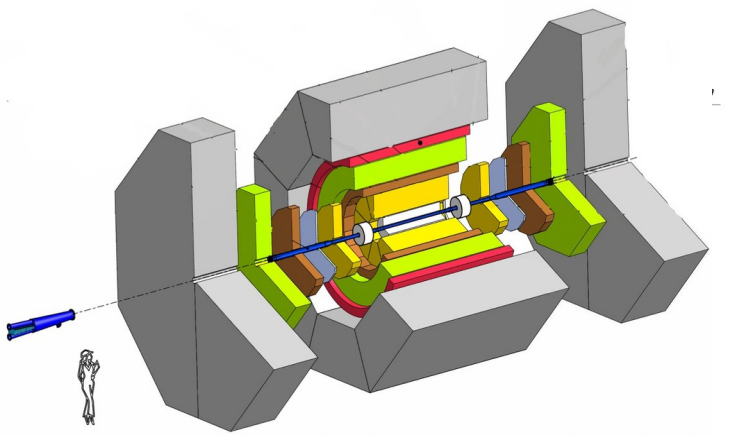
p ↑ p ↑ : $\sqrt{s} \leq 27$ GeV
d ↑d ↑ : $\sqrt{s} \leq 13.5$ GeV
d ↑p ↑ : $\sqrt{s} \leq 19$ GeV

U, L, T
|P|>70%





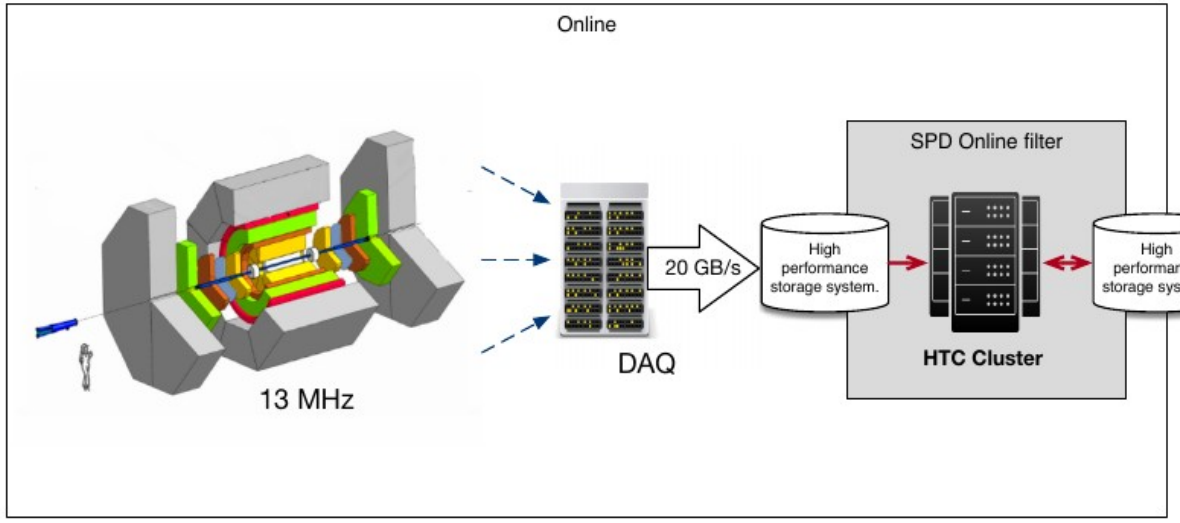
Установка SPD как источник данных

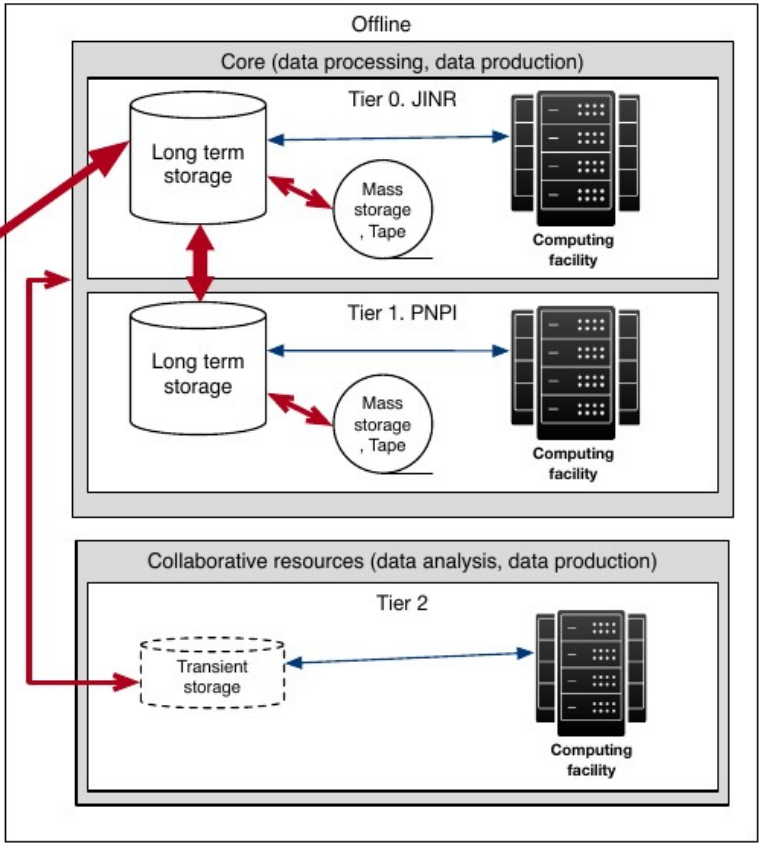


- Пересечение сгустков каждые 76.3 нс = 13 MHz
- Частота событий ~ 3 MHz (при проектной светимости 10^{32} $cm^{-2}s^{-1}$)
- 20 GB/s (или 200 PB/год (сырые данные), $3*10^{13}$ событий/год)
- Отбор полезных событий требует восстановления импульса и вершины → простой триггер невозможен

Установка SPD, имея средние размеры, оказывается источником больших данных!

Конвейер обработки данных





Постоянное уменьшение количества данных:

- DAQ: подавление шума
- Онлайн-фильтр: частичная реконструкция и отбор полезных событий
- Оффлайн: полная реконструкция, моделирование, долговременное хранение и анализ данных

Онлайн-фильтр данных

Высокопроизводительный гетерогенный кластер

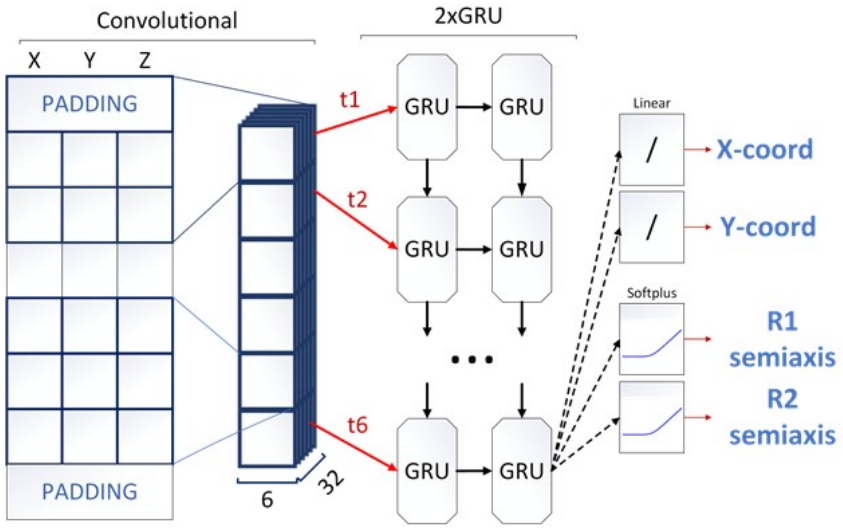
- Частичная реконструкция
  - Восстановление треков и вершин
  - Поиск кластеров в калориметр
  - Идентификация ?
- Восстановление событий
- Отбор
  - несколько потоков
- Мониторинг установки и контроль качества данных
- Измерение поляризации пучка

Машинное обучение — ключевой подход

Как быть с систематической погрешностью?

Пример: TrackNETv3 для поиска треков

https://arxiv.org/abs/2210.00599

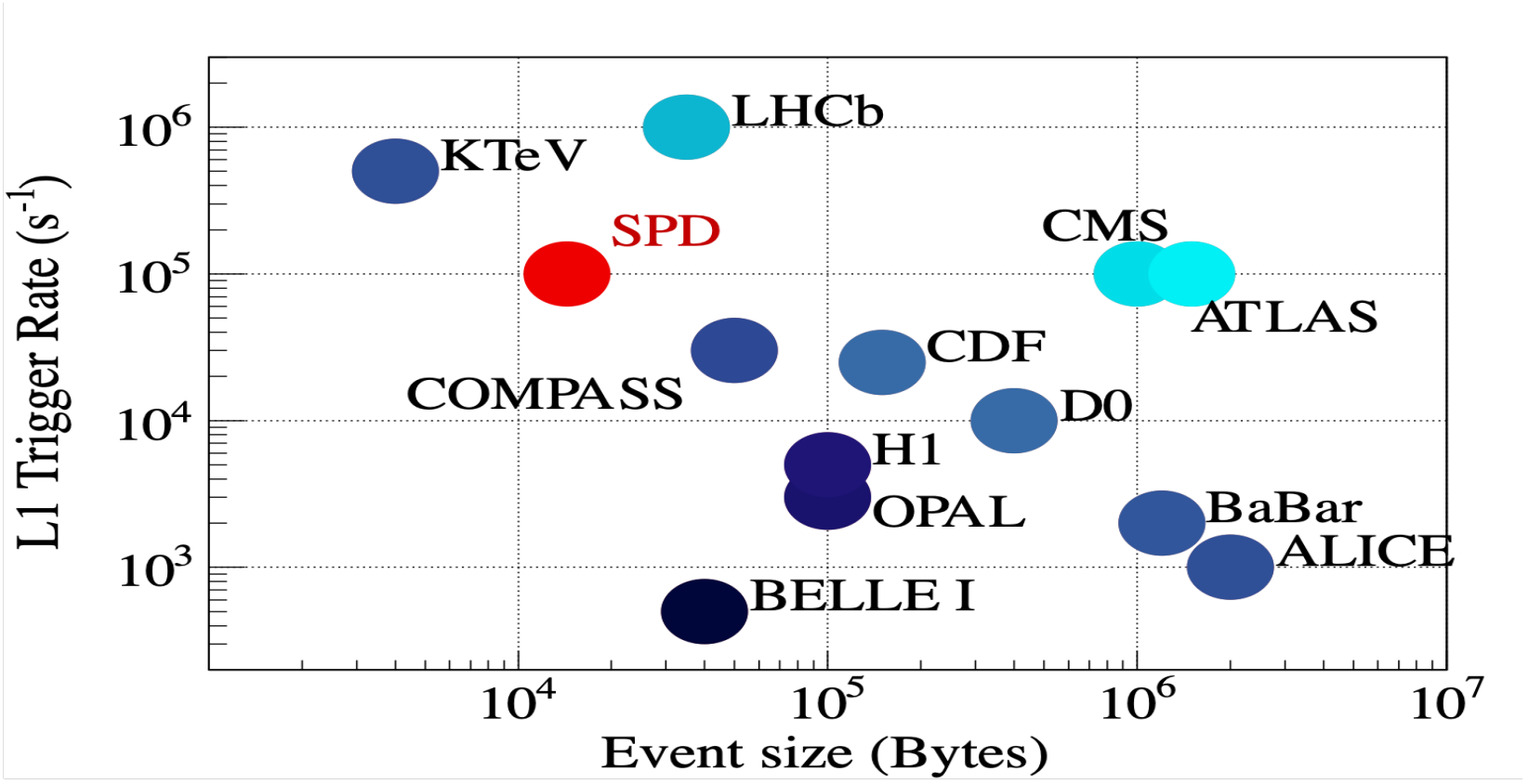


- Сеть предсказывает область, в которой следует искать продолжение трека
- Если точка найдена, она добавляется в трек-кандидат и процедура повторяется
- Фактически воспроизводится фильтр Калмана: параметры трека предсказываются сетью после соотв. обучения
- Обобщение? Устойчивость? Неэффективность детектора?

	Временные кадры по 40 событий
Эффективность (recall) (%)	96,54
Чистота (precision) (%)	94.75
Производительность соб/с	63.74 (*40 = 2549.6)

Предварительный результат

После фильтрации данных

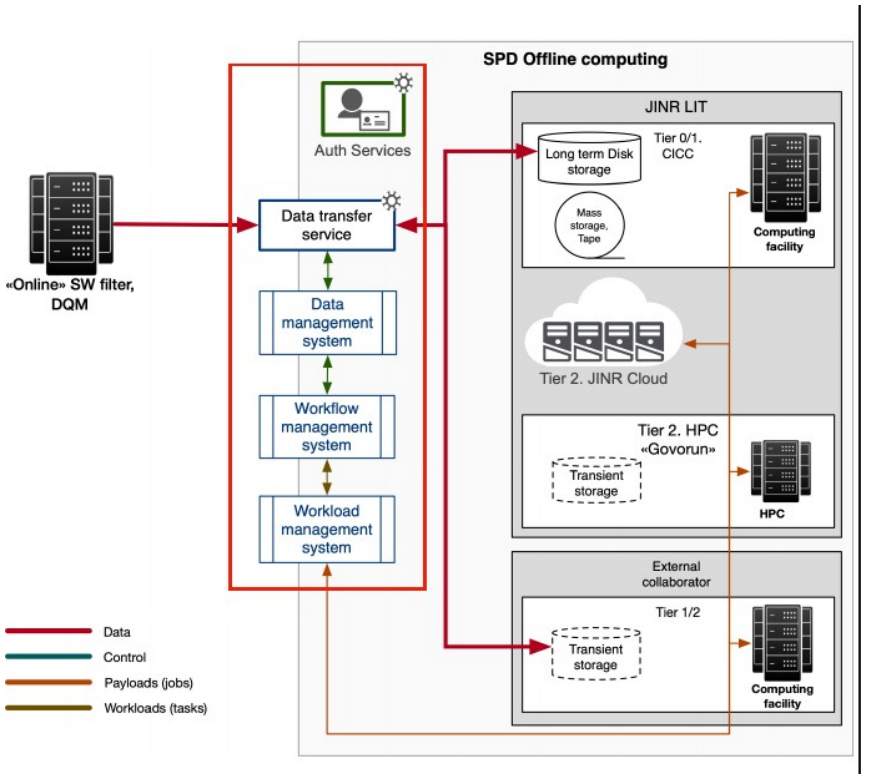


Распределенные вычисления

К 2030 году:
- до 30 PB хранилища
- до 1.5 Pflops вычислительной мощности

Все основные компоненты уже созданы в рамках компьютинга LHC:

- *Авторизация: IAM*
- *Управление задачами: PANDA*
- *Управление данными: RUCIO и FTS*
- *Распространение ПО: CVMFS*



Итог

- Компьютинг и программное обеспечение являются крайне важным компонентом, без которого невозможен современный физический эксперимент
- Большие потоки (и объемы) данных требуют широкого применения параллельных вычислений
  - многоядерные CPU, GPU, FPGA ...
  - Ключевая проблема: физикам трудно писать эффективный код для гетерогенных платформ
- Программное обеспечение постепенно унифицируется
- Интерес к применению машинного обучения в ФВЭ неуклонно растет