Школа по кварк-глюонной материи

КГМ-2025

Эксперимент в физике частиц

Гуськов Алексей Вячеславович

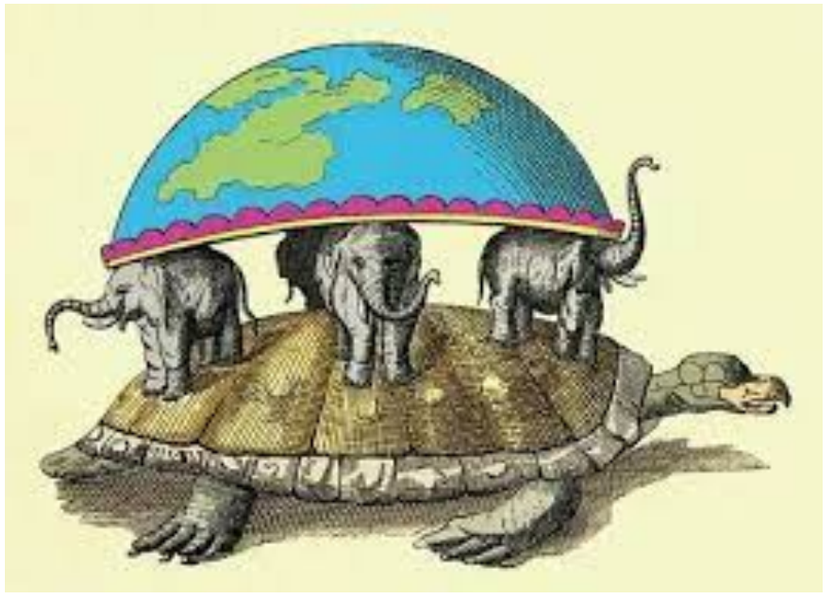
avg@jinr.ru

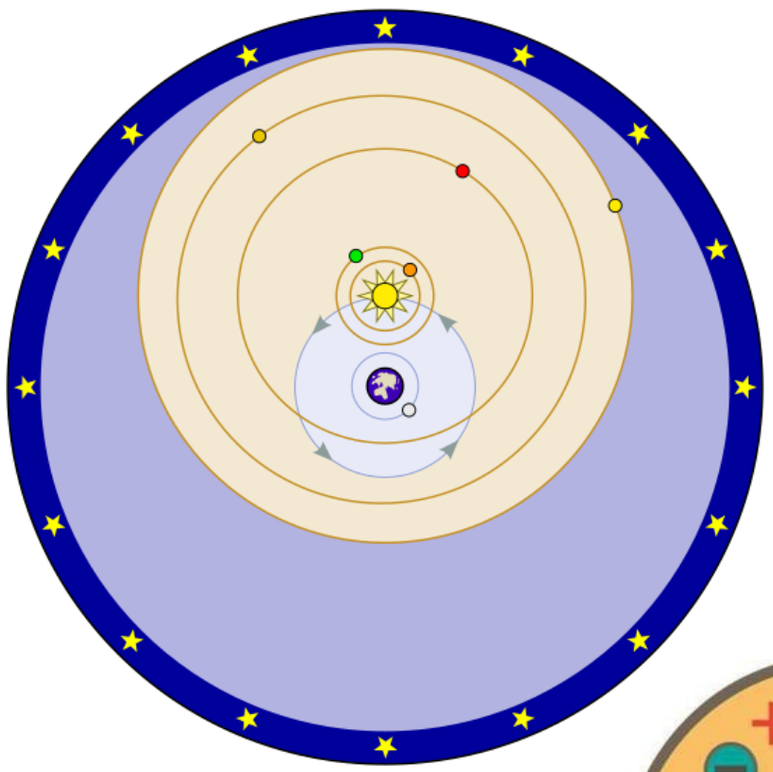
Фундаментальная наука – это очень дорого!

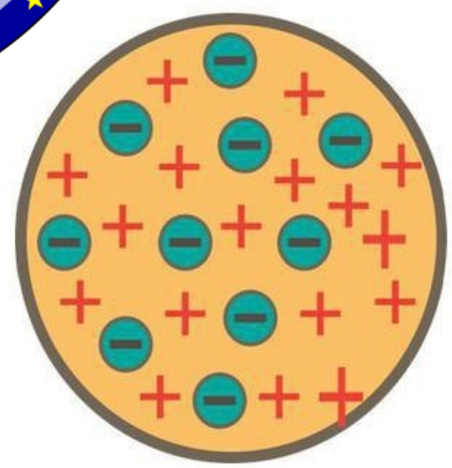
каждый россиянин тратит на финансирование работы ОИЯИ ~100 рублей в год!

А зачем нам вообще нужна фундаментальная наука?

1) Фундаментальная наука формирует мировоззрение общества



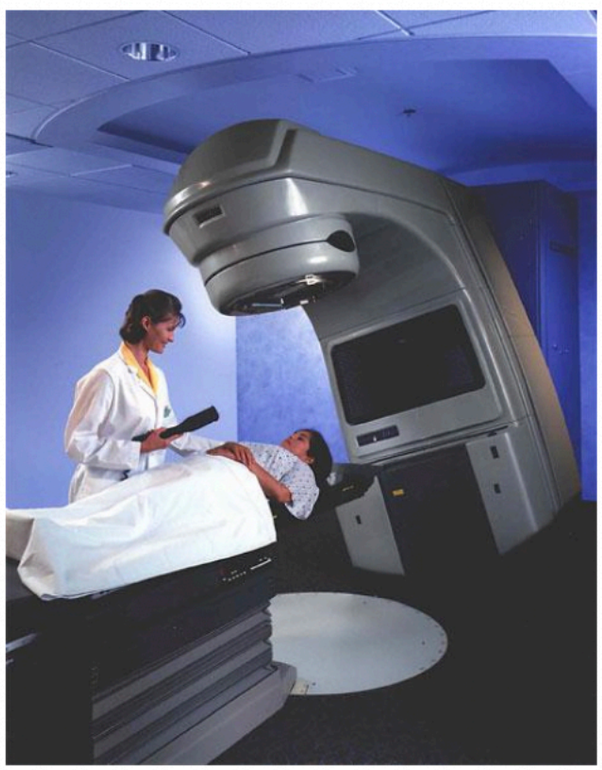






2) Фундаментальная наука развивает технологии





Avg Price:
$ 390,000

Average Price Based On 2 Offers

SUBSCRIBE GRAPH

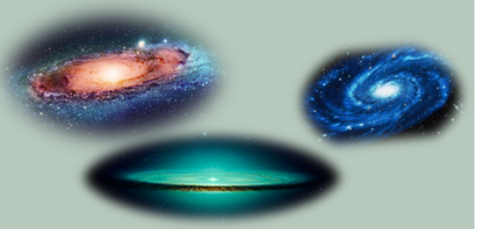
Медицинский ускоритель электронов

3) Фундаментальная наука готовит кадры

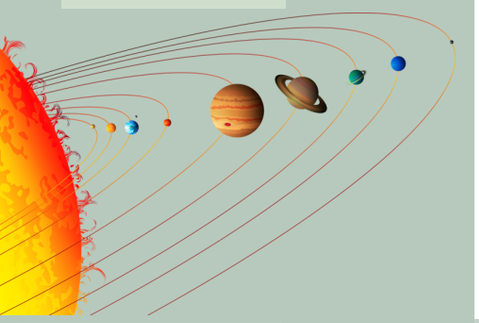


Фундаментальные взаимодействия

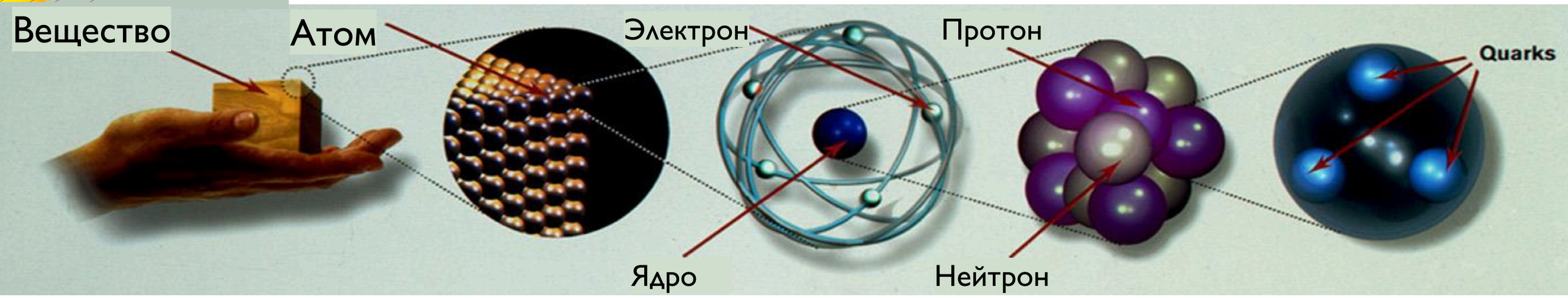
Звёздные системы



Планеты, планетные системы



Тип взаимодействия	Источник	Переносчик	Константа взаимодействия	Радиус действия, м
Гравитационное	Масса	Гравитон(?)	10^{-38}	∞
Электромагнитное	Электрический заряд	Фотон	0.01	∞
Сильное	Цветовой заряд	Глюоны	1	10^{-15}
Слабое	Слабый изоспин, слабый гиперзаряд	$W^{\pm}$, Z^0 бозоны	10^{-5}	10^{-18}



Физика частиц: а что мы вообще изучаем?

Мы изучаем свойства фундаментальных взаимодействий: сильного, электромагнитного и слабого, которые проявляются в свойствах элементарных частиц.

То есть суть эксперимента в физике частиц - заставить частицы взаимодействовать, рождая новые частицы.

Современный эксперимент в физике частиц

Тоже теоретик



Постановка физической задачи



Теоретик

Интерпретация результатов

Планирование эксперимента

Получение физических результатов

Моделирование эксперимента

Анализ физических данных

Создание установки

Подготовка физических данных





Набор данных

Методист

Обработчик

А вы теоретики или экспериментаторы?

Что должен знать уметь экспериментатор-обработчик?

Обладать достаточными общими знаниями в соответствующей области физики частиц

Обладать хорошими знаниями в области физики взаимодействия частиц с веществом и релятивистской кинематики

Иметь общее представление о принципах работы основных типов используемых детекторов

Свободно владеть методами матстатистики, теории вероятностей и численного моделирования

Быть программистом (C++, Linux…)

Уметь работать с большими объёмами данных

Владеть английским



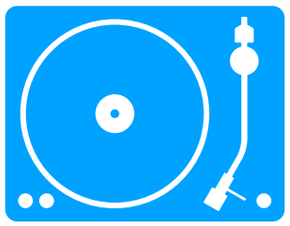
Что должен знать уметь экспериментатор-методист?



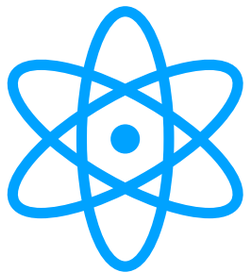
Обладать отличными знаниями в области физики взаимодействия частиц с веществом и релятивистской кинематики



Знать в деталях принцип работы всех типов детекторов. Уметь работать с детекторами “своего” типа



Разбираться в принципах работы используемой аналоговой и цифровой электроники



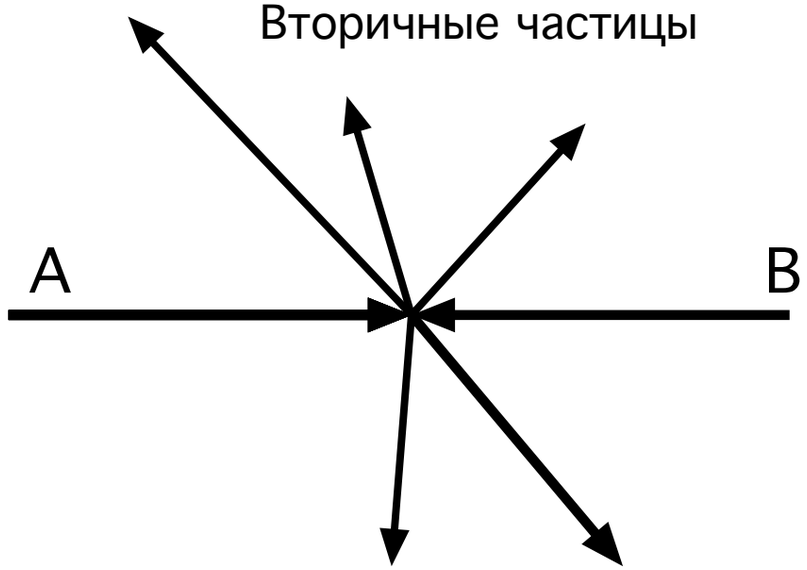
Иметь представление о технических деталях работы ускорителей



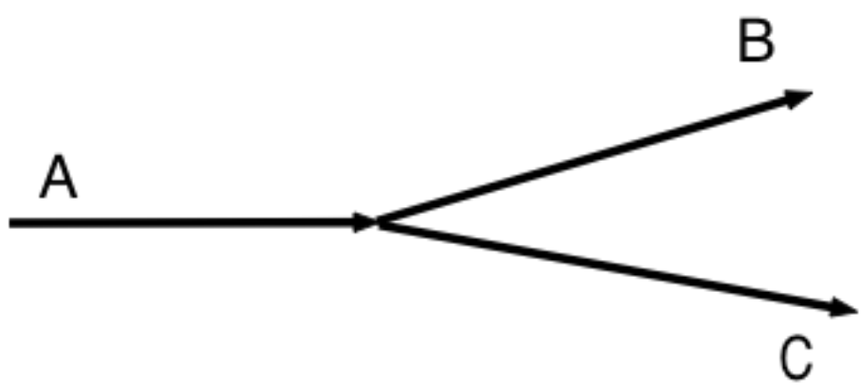
Владеть английским

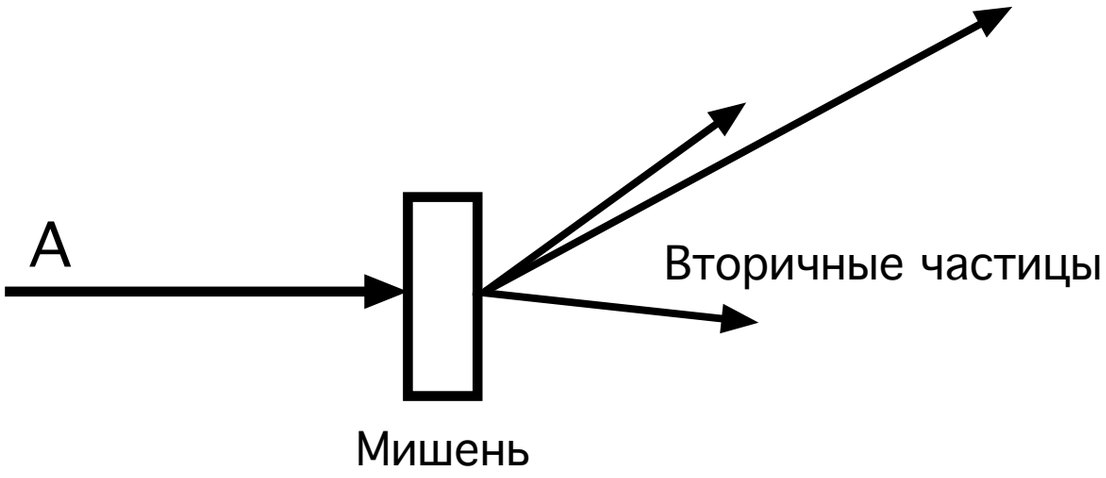
Элементарное физическое событие - акт взаимодействия двух частиц

Встречные пучки



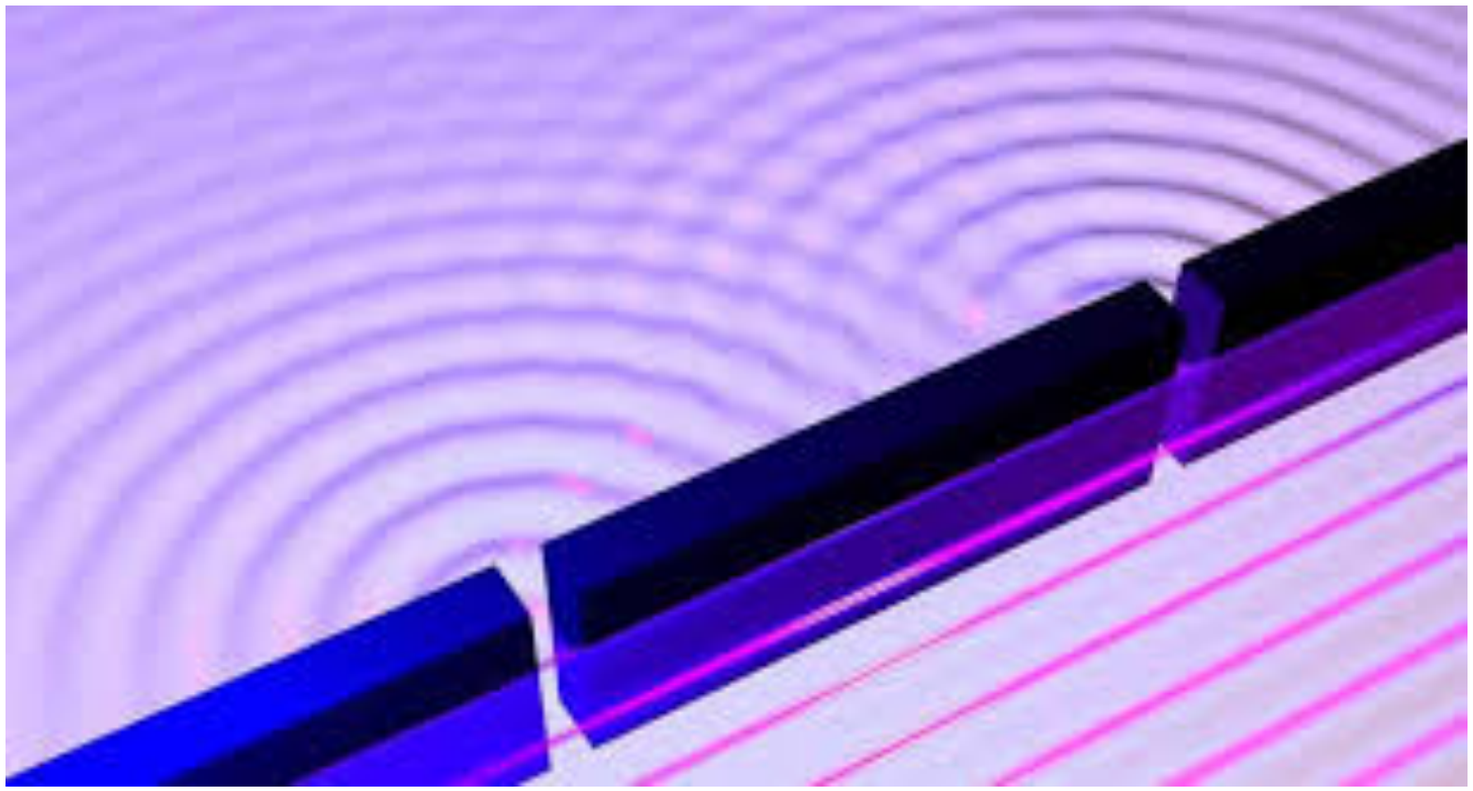
Распад частицы





Неподвижная мишень

Элементарная частица - классический или квантовый объект?



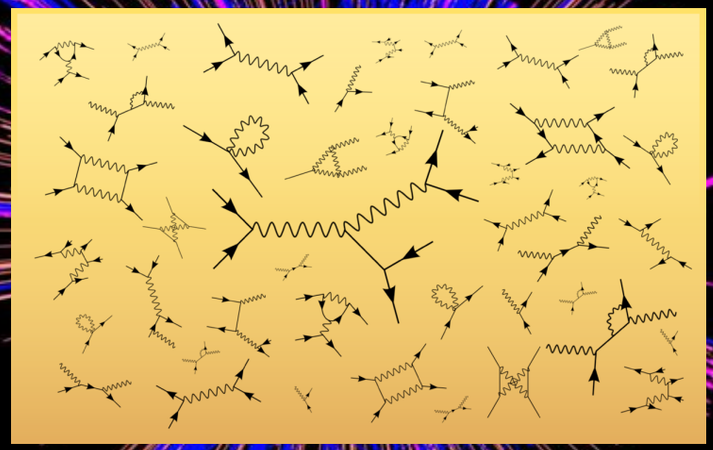
Де-Бройлевская длина волны:

$$\lambda = h/p$$

Характерный масштаб $L \gg \lambda$ — классическая механика

$L \sim \lambda$ — квантовая механика

Для 7 ТэВного протона на LHC $\lambda_p = 2 \times 10^{-19}$ м



Для экспериментаторов частицы - классические объекты!

При этом частицы для экспериментаторов являются релятивистскими

	Наименование частицы	Символ: Частица	Символ: Анти-частица	Масса МэВ	Электрический заряд	Время жизни, (секунды)
	Фотон	γ	γ	0	0	Стабилен
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно
Лептоны	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно
Лептоны	Нейтрино тау-лептонное	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	-1	Стабильно
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	0.511	-1	Стабилен
Лептоны	Мюон	μ^-	μ^+	105.66	0	$2{,}2*10^{-6}$
Лептоны	Тау-лептон	T^-	T^+	1782	0	$3{,}4*10^{-13}$
Адроны / Мезоны	Пи-мезоны (пионы)	π^0 π^+	π^0 π^-	134,96 139,57	0 1	$8*10^{-17}$ $2{,}6*10^{-8}$
Адроны / Мезоны	Ка-мезоны (каоны)	K^+ K^0	K^{-1} $\bar{K}^0$	493,67 497,7	1 0	$1{,}24*10^{-8}$ K^0_S-$8.9*10^{-8}$
Адроны / Мезоны	Эта-нуль мезон	η^0	η^0	548,8	0	K^0_L-$5.18*10^{-8}$ 10^{-18}
Адроны / Барионы / Нуклоны	Протон	p	$\bar{p}$	938,28	1	Стабилен
Адроны / Барионы / Нуклоны	Нейтрон	n	$\bar{n}$	939,57	0	918
Адроны / Барионы / Гипероны	Лямбда-гиперон	λ^0	$\bar{\lambda}^0$	1115,6	0	$2{,}6*10^{-10}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1189,37	1	$8*10^{-11}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Сигма-гипероны	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1192,48	0	$5.8*10^{-20}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Сигма-гипероны	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1197,35	-1	$1.48*10^{-10}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1314,9	0	$2.90*10^{-10}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Кси-гипероны	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1321,3	-1	$1.64*10^{-10}$
Адроны / Барионы / Гипероны	Омега-минус-частица	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1672,2	-1	$8.2*10^{-11}$

Лоренц-фактор:

$$\gamma = E/m$$

Для электронов и позитронов коллайдера LEP

$$\gamma \leq 200\ 000$$

Время жизни частицы:

$$t = \gamma c \tau$$

Для мюона с энергией 1 ТэВ

$$t = 0.02\ c$$

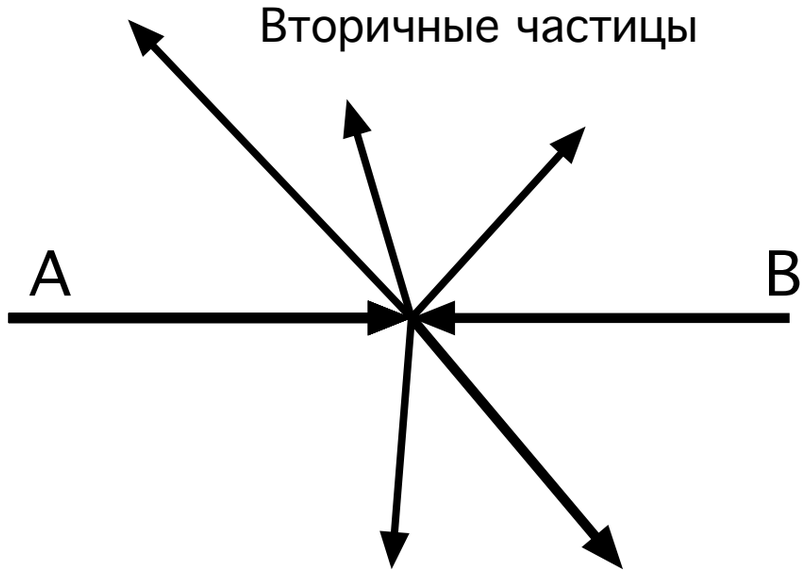
Элементарное физическое событие - акт взаимодействия двух частиц

E_0 **- энергия начальной частицы**

При $E_0 \gg m$ **в энергию рождения новых частиц может перейти энергия:**

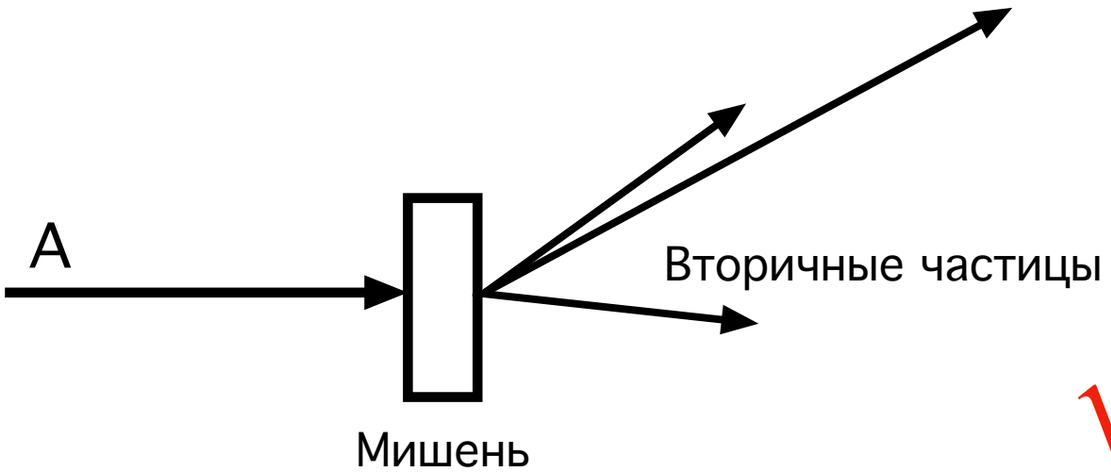
Для протона на LHC ($E_0 = 7\ TeV$**):**

Встречные пучки



$2E_0$

14 ТэВ

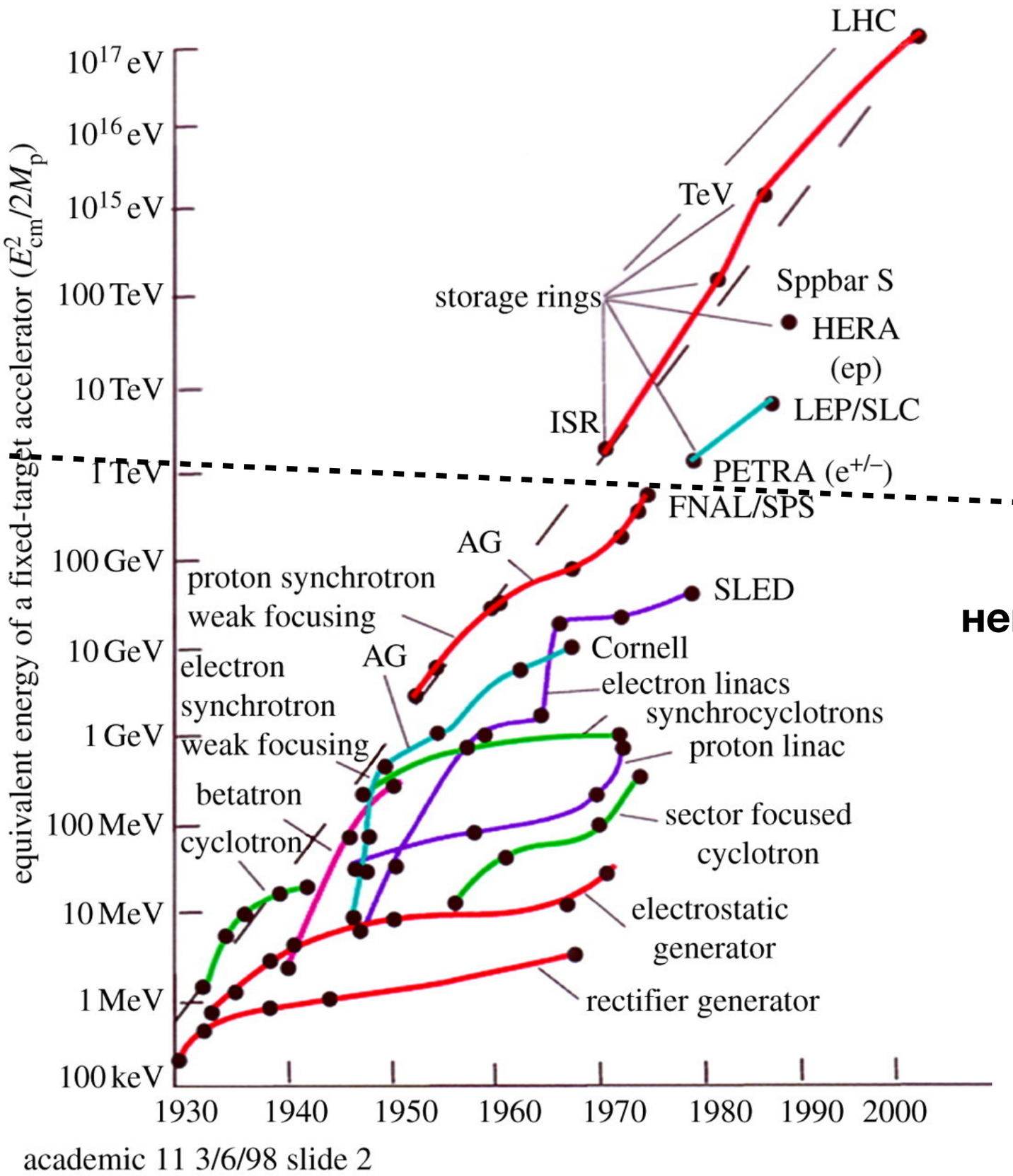


$\sqrt{2E_0 m}$

0.115 ТэВ

Неподвижная мишень

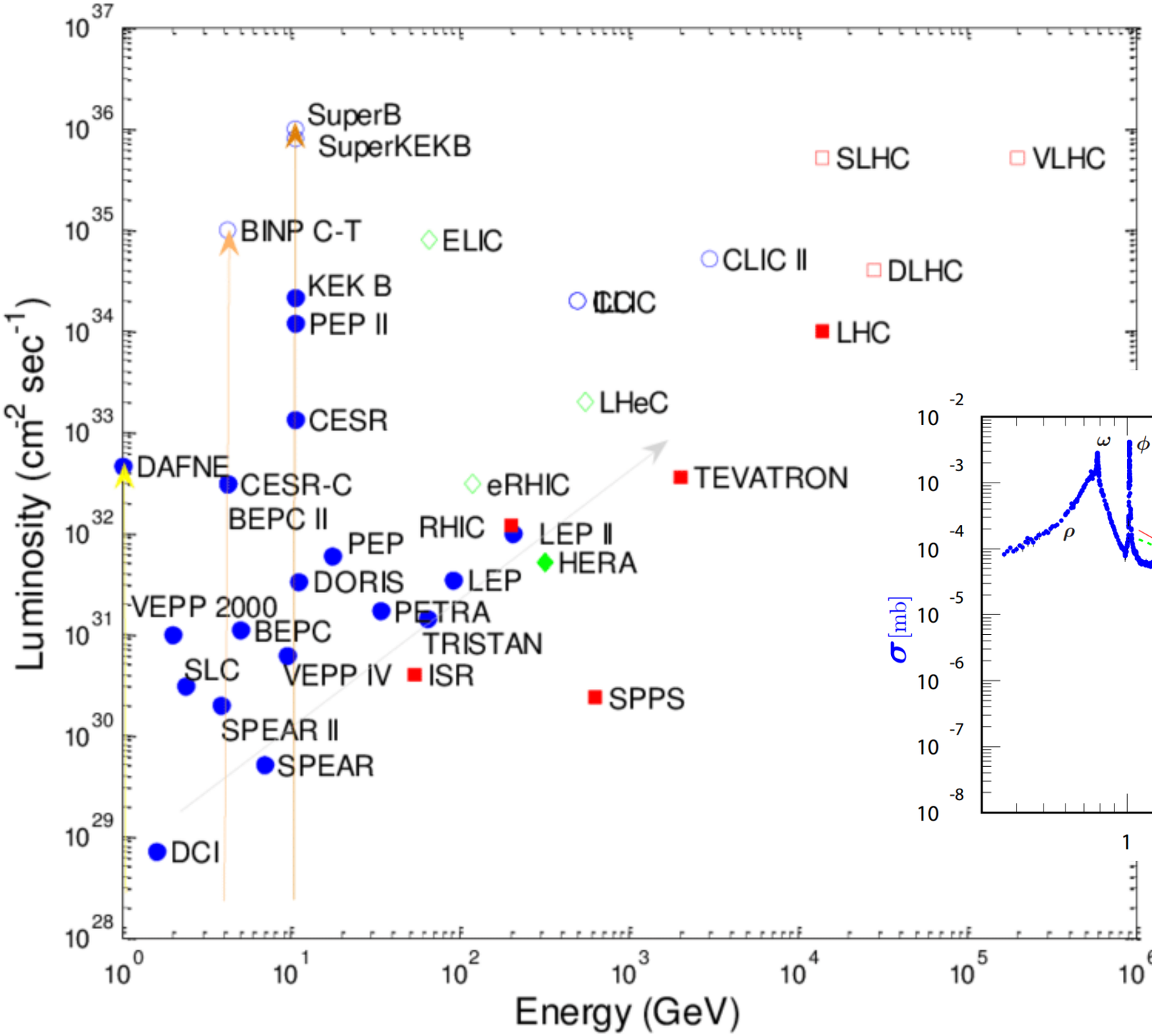
А коллайдер точно лучше лучше?



Коллайдеры

Ускорители с неподвижными мишенями

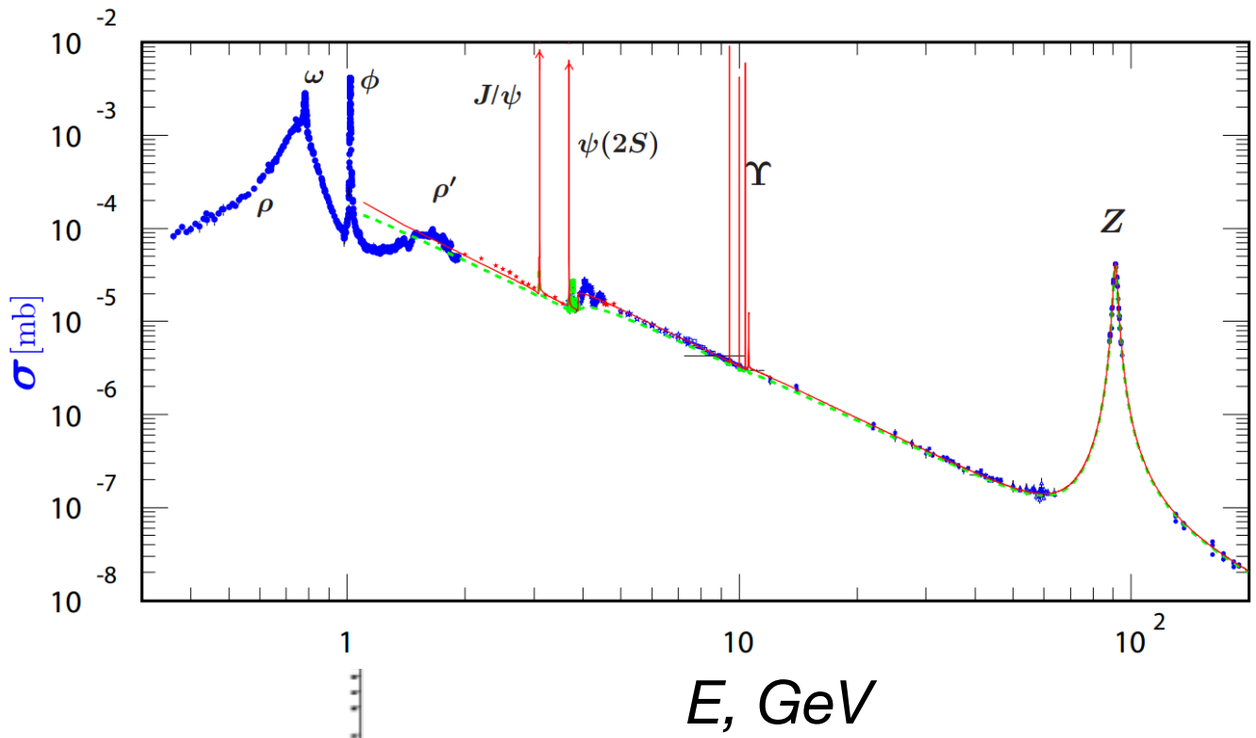
Важна не только энергия!



$$R = L\sigma$$

L - светимость

[L] = $cm^{-2}\,s^{-1}$



Есть вещи, которые на коллайдере сделать трудно или невозможно.

Тип взаимдействующих частиц

частиц: $pp, p\bar{p}, e^+e^-, e^-p$**, ион-ион**

доступны на коллайдерах

Вторичные пучки нестабильных

частиц: μ, π, K**, ...**

В некоторых случаях кинематика коллайдеров неудобна.

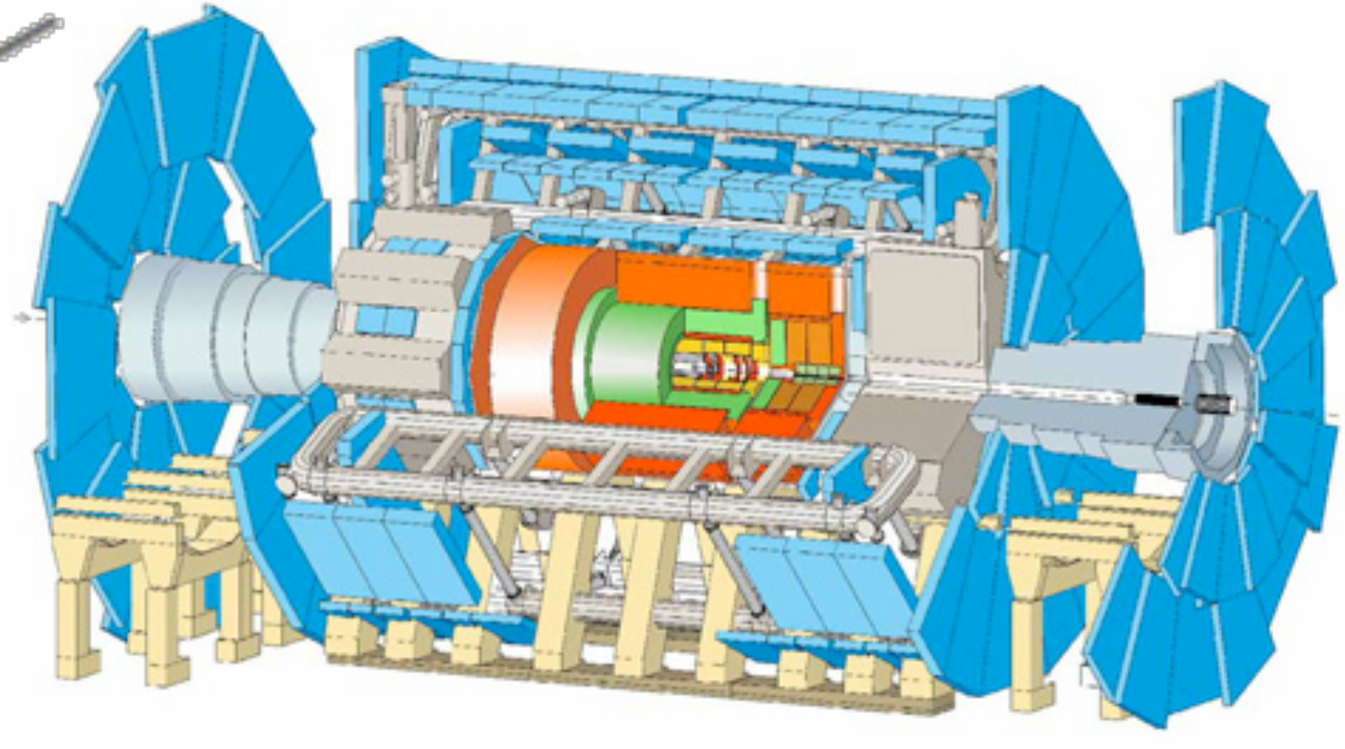
Экспериментальные установки

Детектор вытянут в направлении пучка на десятки метров

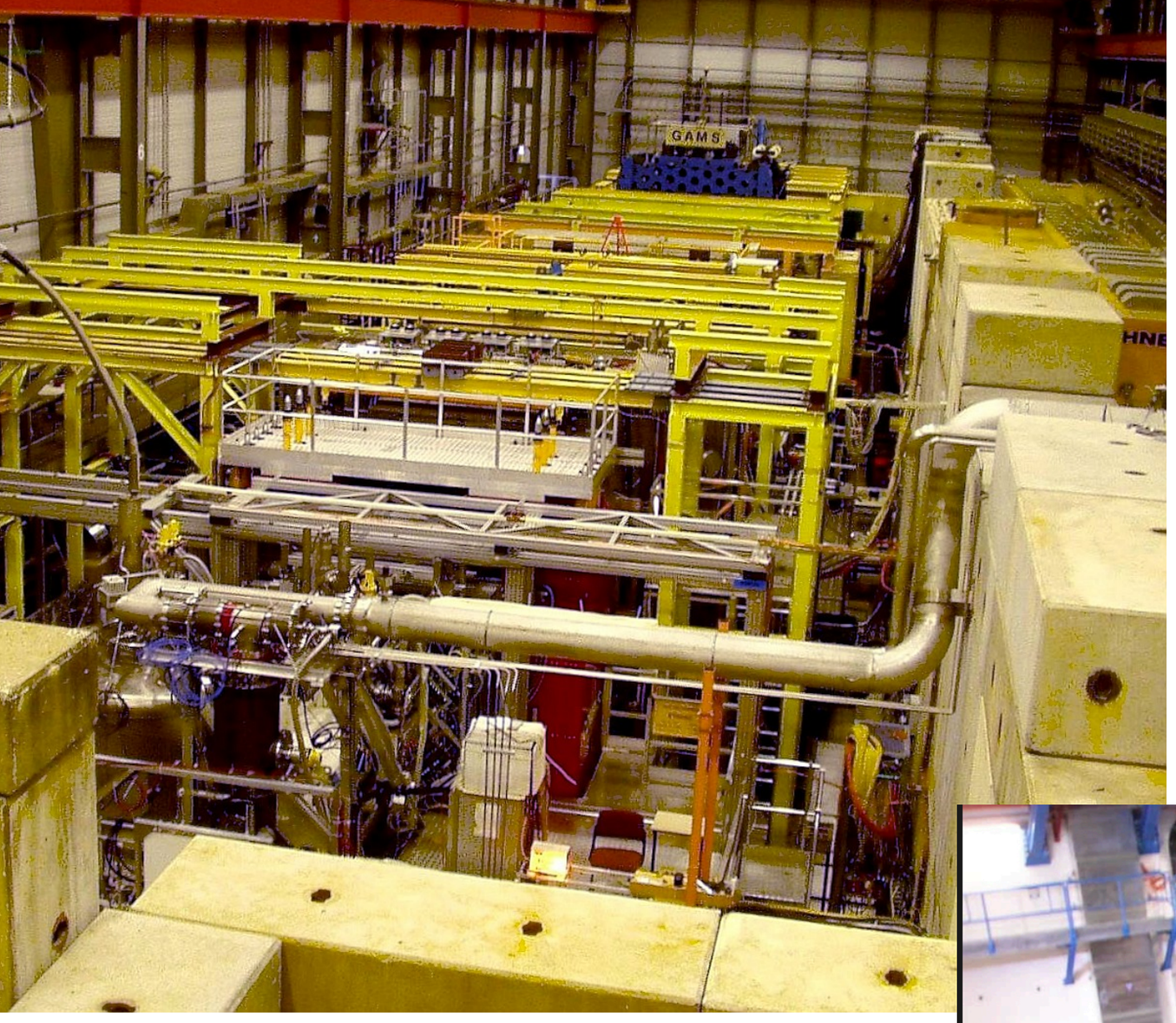
COMPASS



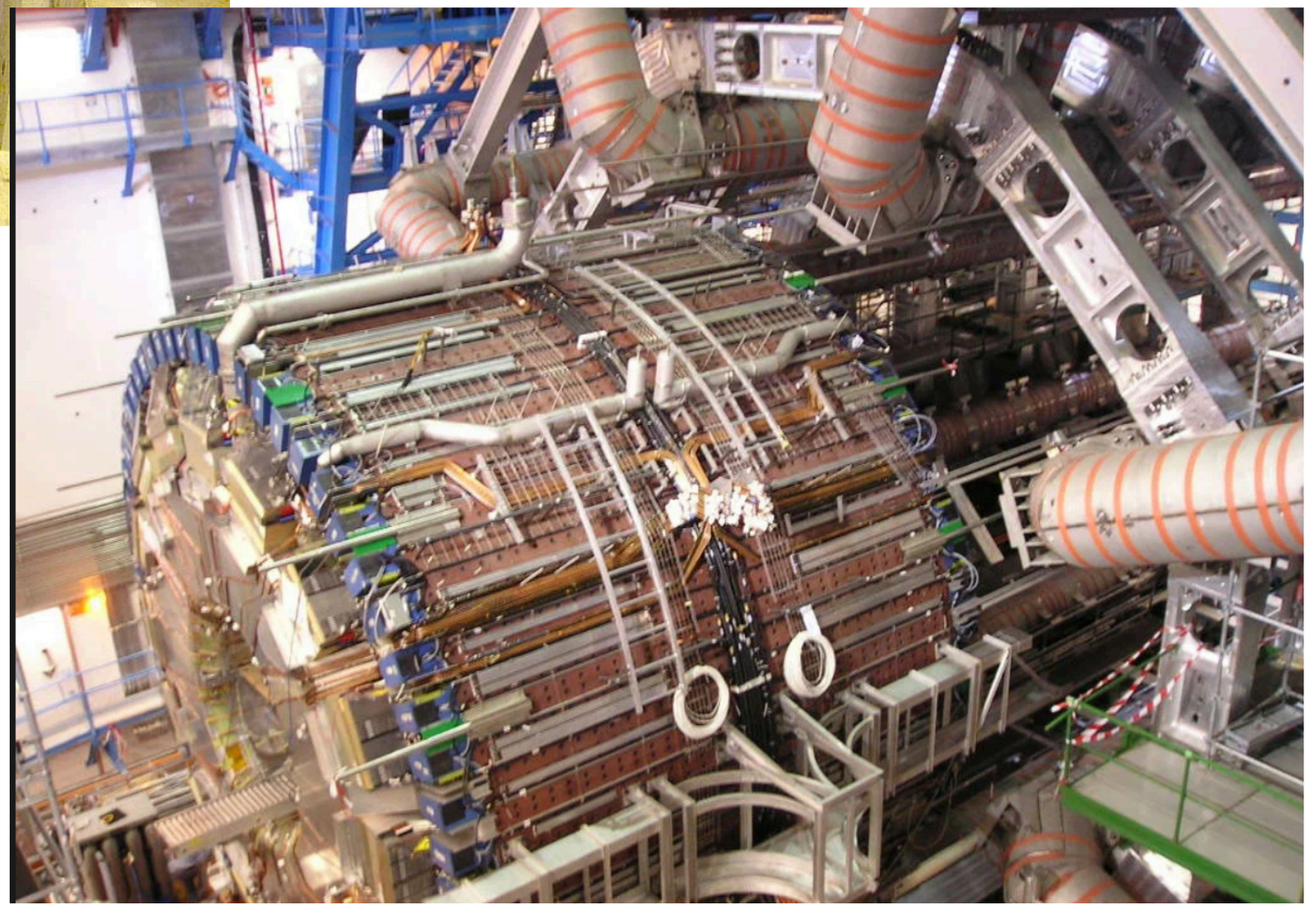
4π геометрия



ATLAS

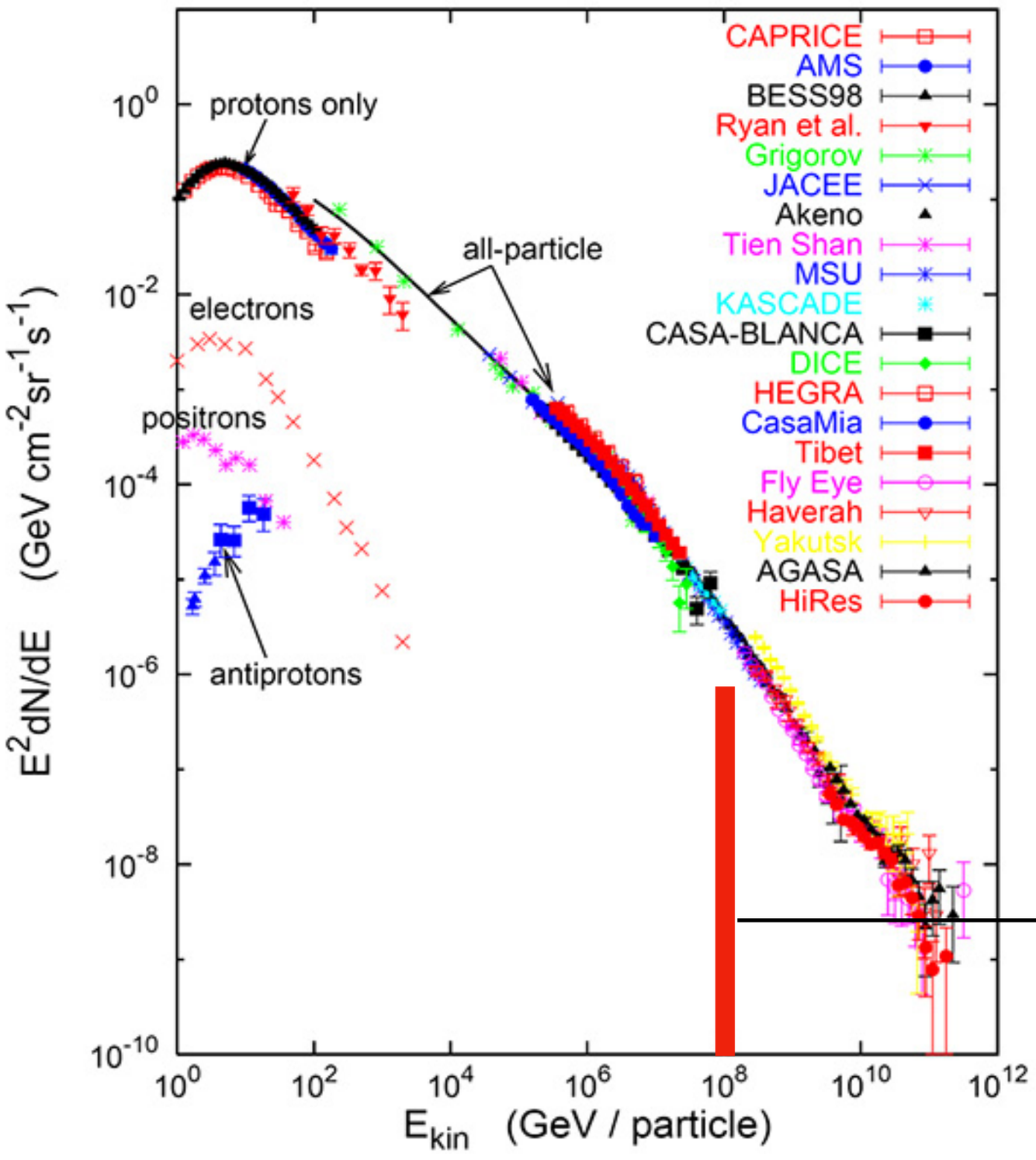


COMPASS



ATLAS

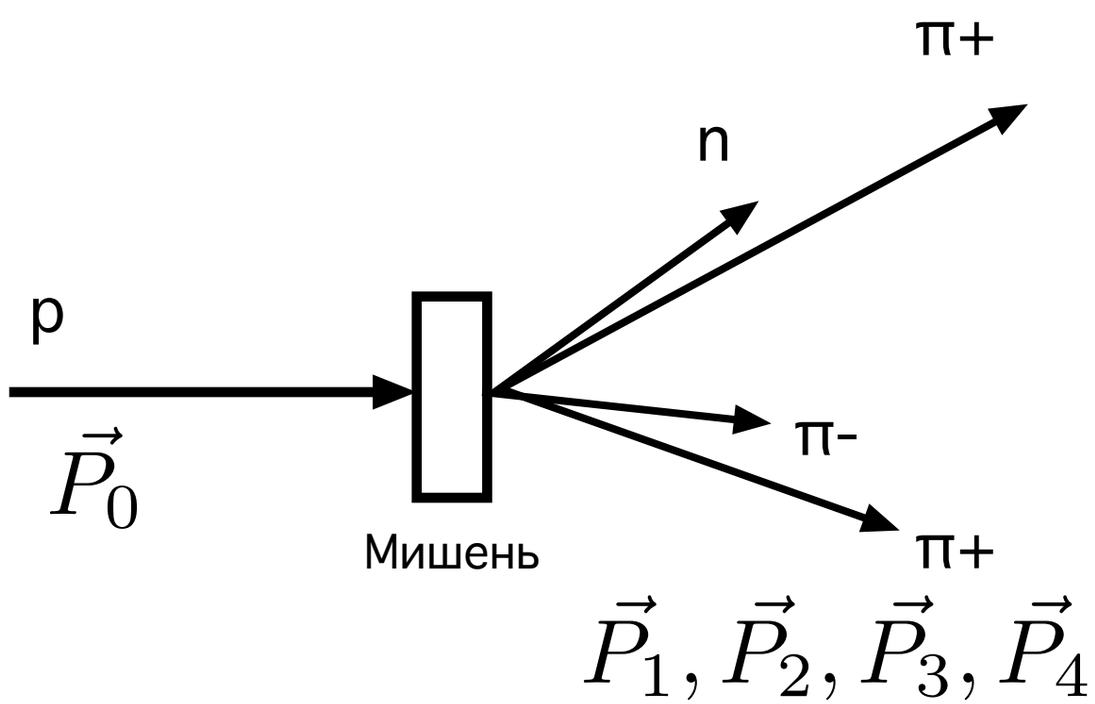
Космические лучи



LHC collision energy in the CM system

Какая информация о частицах в начальном и конечном состоянии может быть доступна для анализа в каждом событии?

Импульс (направление и модуль) частицы
Энергия частицы
Информация о сорте частицы
Скорость частицы и т. д.



Пример
“идеального”
события

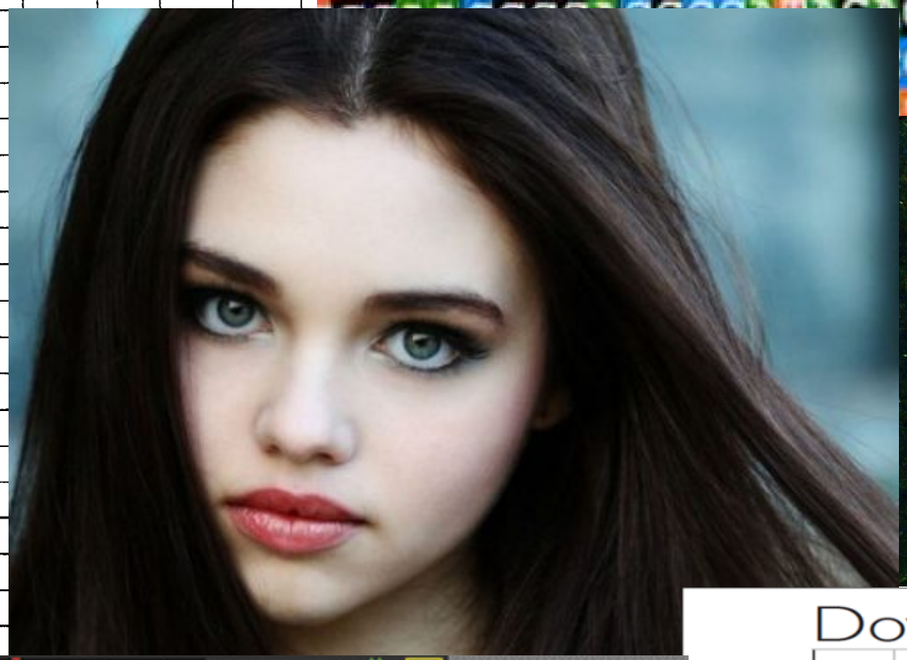
Данные

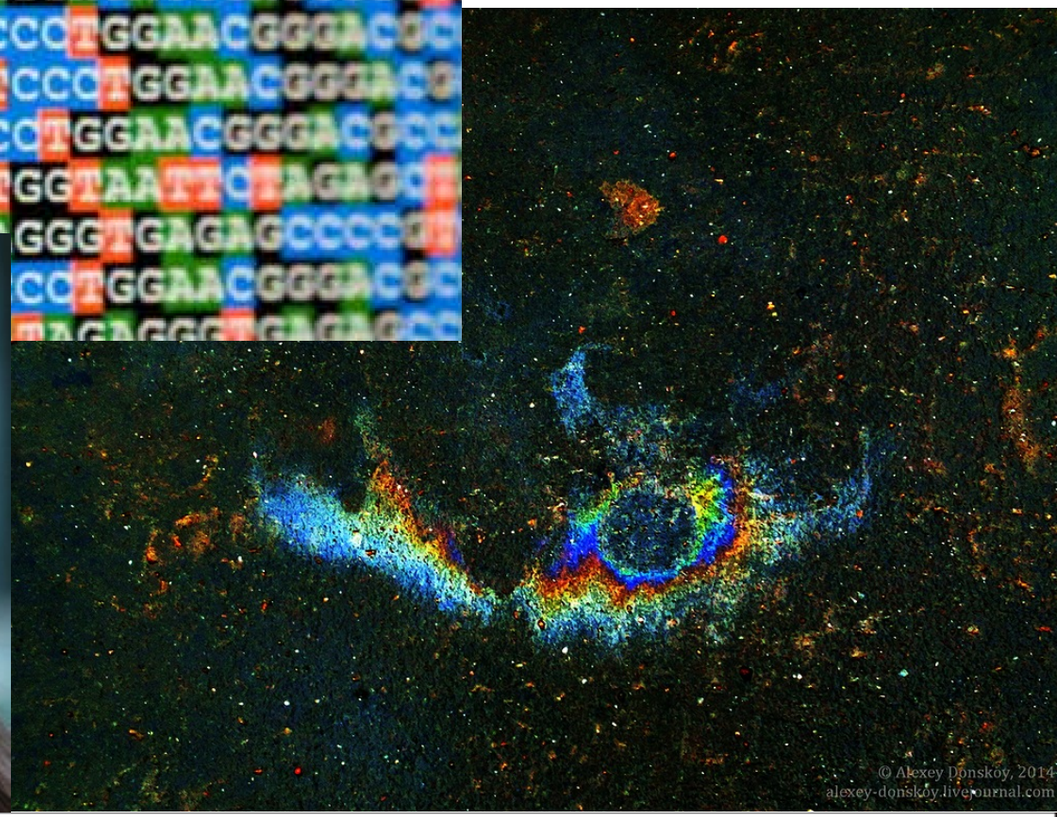
Согласно Уставу КПСС, Политбюро ЦК КПСС избирало
руководства работой партии в период между пленумам
ые впоследствии утверждал
итбюро (до 1990, также канд
ПСС входило от 8 (в нач. 192

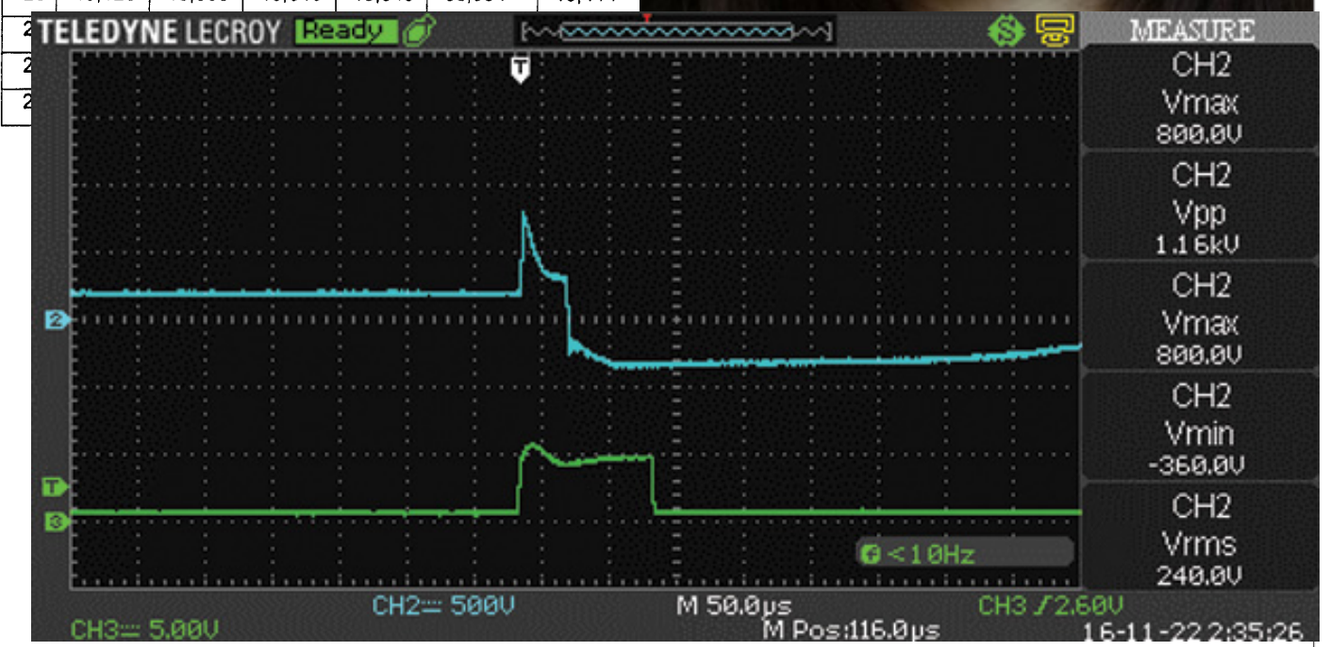
Таблица 1

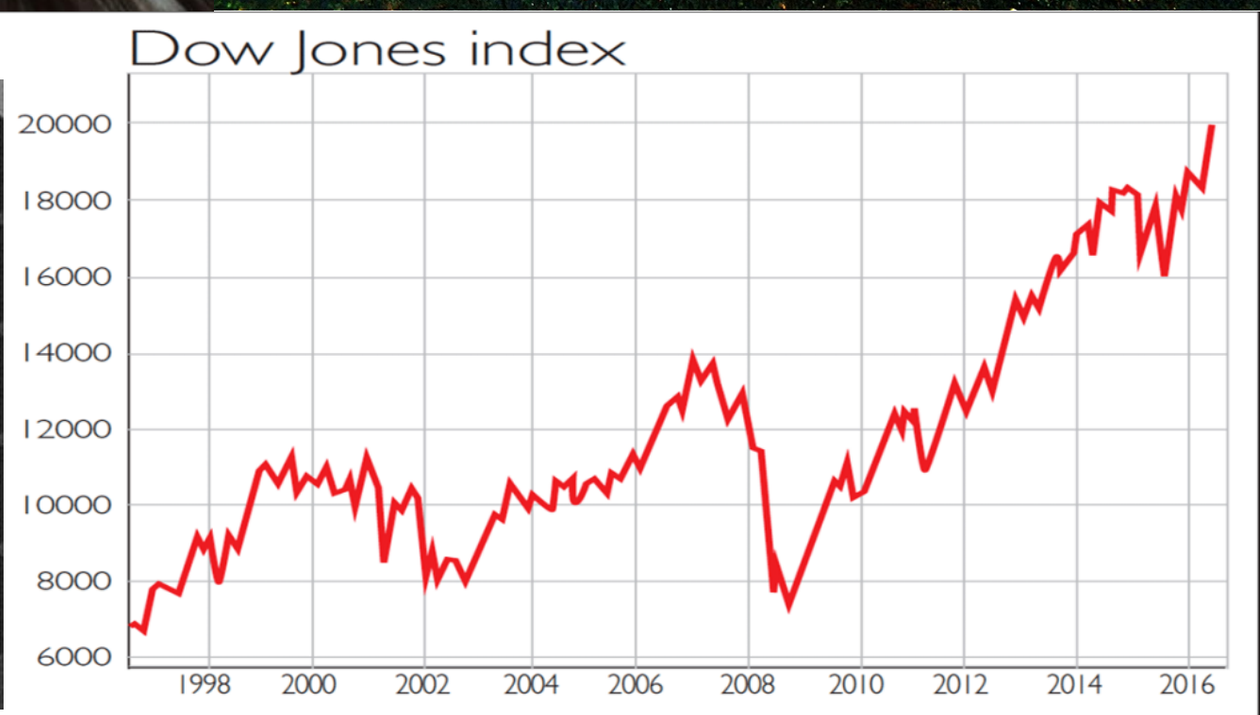
№	Напряжение на n-ом аккумуляторе (Ua_n)				Напря-жение на АБ	Среднее напря-жение	Коэффициент состояния n-го аккумулятора $Q_{t,n}$			
i	Ua_1	Ua_2	Ua_3	Ua_4	U	Us	$Q_{t,1}$	$Q_{t,2}$	$Q_{t,3}$	$Q_{t,4}$
1	13,257	13,355	13,390	13,574	53,576	13,394				
2	13,257	13,359	13,390	13,574	53,580	13,395	0,00	4,00	0,00	0,00
3	12,847	11,609	13,101	13,253	50,810	12,703				
4	12,011	9,832	12,421	12,503	46,767	11,692				
5	11,285	9,941	12,402	12,480	46,108	11,527				
6	10,429	10,031	12,398	12,468	45,326	11,332				
7	9,960	10,085	12,406	12,476	44,927	11,232				
8	10,066	10,125	12,410	12,484	45,085	11,271				
9	10,125	10,175	12,417	12,492	45,209	11,302				
10	10,156	10,207	12,425	12,500	45,288	11,322				
11	10,171	10,234	12,429	12,503	45,337	11,334				
12	10,179	10,238	12,429	12,500	45,346	11,337				
13	10,183	10,277	12,433	12,511	45,404	11,351				
14	10,183	10,269	12,433	12,503	45,388	11,347				
15	13,246	12,355	13,347	13,367	52,315	13,079				
16	13,226	13,457	13,457	13,542	53,682	13,421				
17	13,160	13,394	13,488	13,605	53,647	13,412				
18	13,136	13,378	13,507	13,632	53,653	13,413				
19	13,128	13,367	13,515	13,648	53,658	13,415				
20	13,128	13,359	13,519	13,648	53,654	13,414				



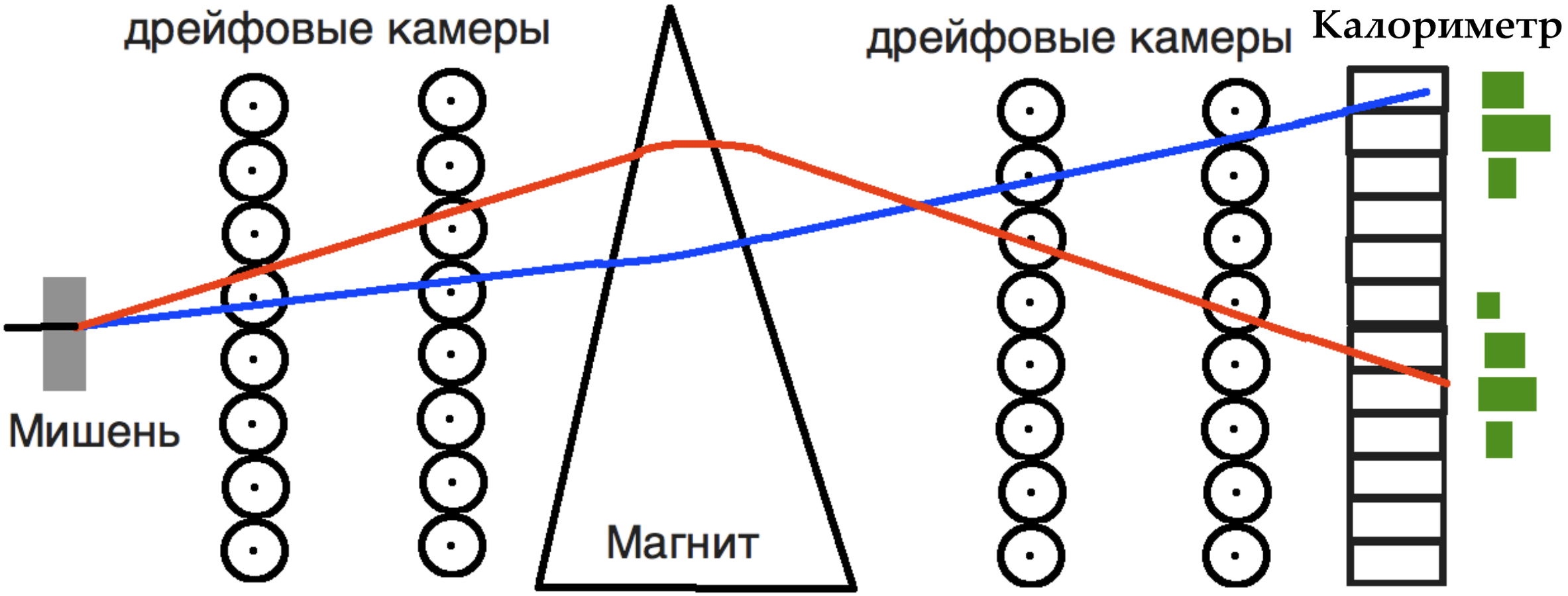








Что содержится в данных, записываемых экспериментальной установкой?



Номера сработаших каналов, амплитудно-временная информация с этих каналов.
И ВСЁ!

Но вам для физического анализа нужны треки, вершины взаимодействий и распадов, координаты и величина энерговыделения в калориметрах, импульсы частиц, идентификация частиц и т. д.

“Сырые” данные

Номера каналов, амплитуды, времена

“Физические“ данные

Треки частиц, вершины, кластеры энерговыделения, идентификация и т. д.

Наблюдаемые

Сечения, спектры инвариантных масс, асимметрии, множественность, параметры частиц и т. д.

Сырые данные (Raw data)
номера каналов, амплитуды, времена

Данные “медленного контроля”

Данные Монте-Карло

калибровки

Программа первичной реконструкции

Физические данные
треки, кластеры, вершины, идентификация частиц и т. д.

Программа для физического анализа

Данные, отобранные пользователем

Эвентуальный подход

Любой анализ данных сводится к следующим шагам:

Цикл по всем событиям

- **Отбор событий**
- **Вычисление необходимых величин**
- **Заполнение гистограмм**

- Получение результата
- Представление результата
- Интерпретация результата

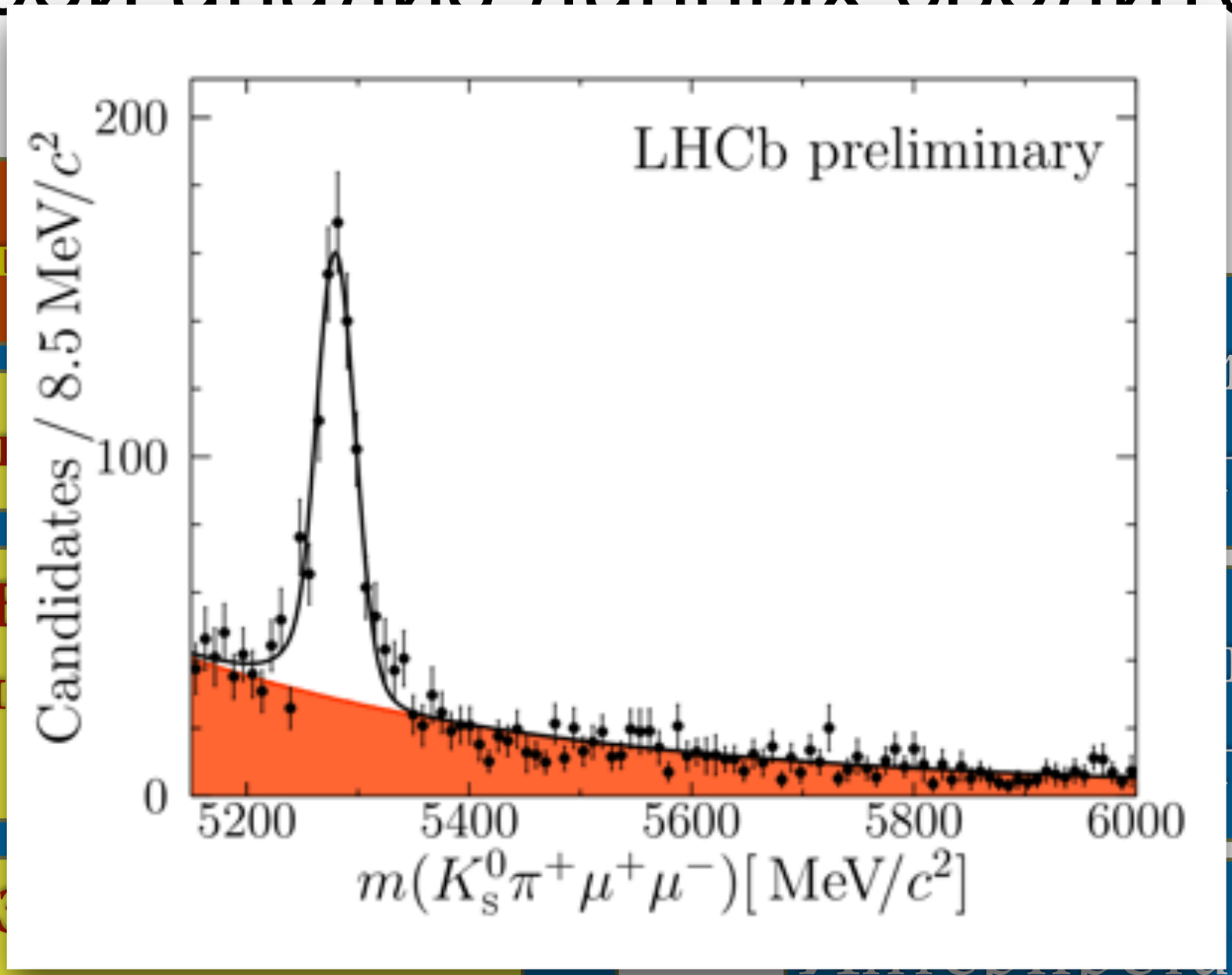
Эвентуальный подход

Любой анализ данных сводится к

Цикл

От

гистограмм



ие

та

ние

та

ция

результата

Сырые данные

Физические данные

Независимый анализ данных

Группа 1

Группа 2

РЕЛИЗ результатов

Комитет по публикациям

От имени коллаборации

Доклады на конференциях

Научные публикации

На примере коллаборации COMPASS

ИДИ в КОЛХОЗ


ВРЕДИТ РАБОЧИМ И КРЕСТЬЯНАМ ТОТ,
КТО РАСПРОДАЕТ И РЕЖЕТ СКОТ
ДАДИМ КУЛАКУ ДРУЖНЫЙ ОТПОР
ОРГАНИЗУЕМ КОЛЛЕКТИВНЫЙ СКОТНЫЙ ДВОР

Международная коллаборация / государство

Совет коллаборации	Парламент
Споксман	Президент
Исполнительный комитет, координаторы	Правительство
Технический совет, комитет по публикациям, рабочие группы по анализу, …	-
Конституция	Конституция
Институты-участники	-
Членство в коллаборации	Гражданство
Общий фонд	Бюджет
Права и обязанности члена коллаборации	Права и обязанности гражданина

Что есть результат измерения?

$K^{\pm}$

Mass $m = 493.677 \pm 0.016$ MeV
Mean life $\tau = (1.2380 \pm 0.0021) \times 10^{-8}$ s

Charge Radius

$\langle r \rangle = 0.560 \pm 0.031$ fm

$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^+} = 11.6 \pm 1.5_{stat} \pm 3.0_{syst}$

$B.R.(f_2(1270) \to \pi\pi) = (84.7^{+2.4}_{-1.3})\%.$

$K^+ \to \pi^+\pi^- e^+ \nu_e$	(4.09	$\pm$0.10)	$\times 10^{-5}$	
$K^+ \to \pi^+\pi^- \mu^+ \nu_\mu$	(1.4	$\pm$0.9)	$\times 10^{-5}$	
$K^+ \to \pi^0\pi^0\pi^0 e^+ \nu_e$	< 3.5		$\times 10^{-6}$	CL=90%

Результат измерения - либо оценка значения величины с указанием оценки ошибки, либо оценка предельного значения величины с указанием вероятности нахождения величины в указанном интервале

Статистическая и систематическая ошибки измерения

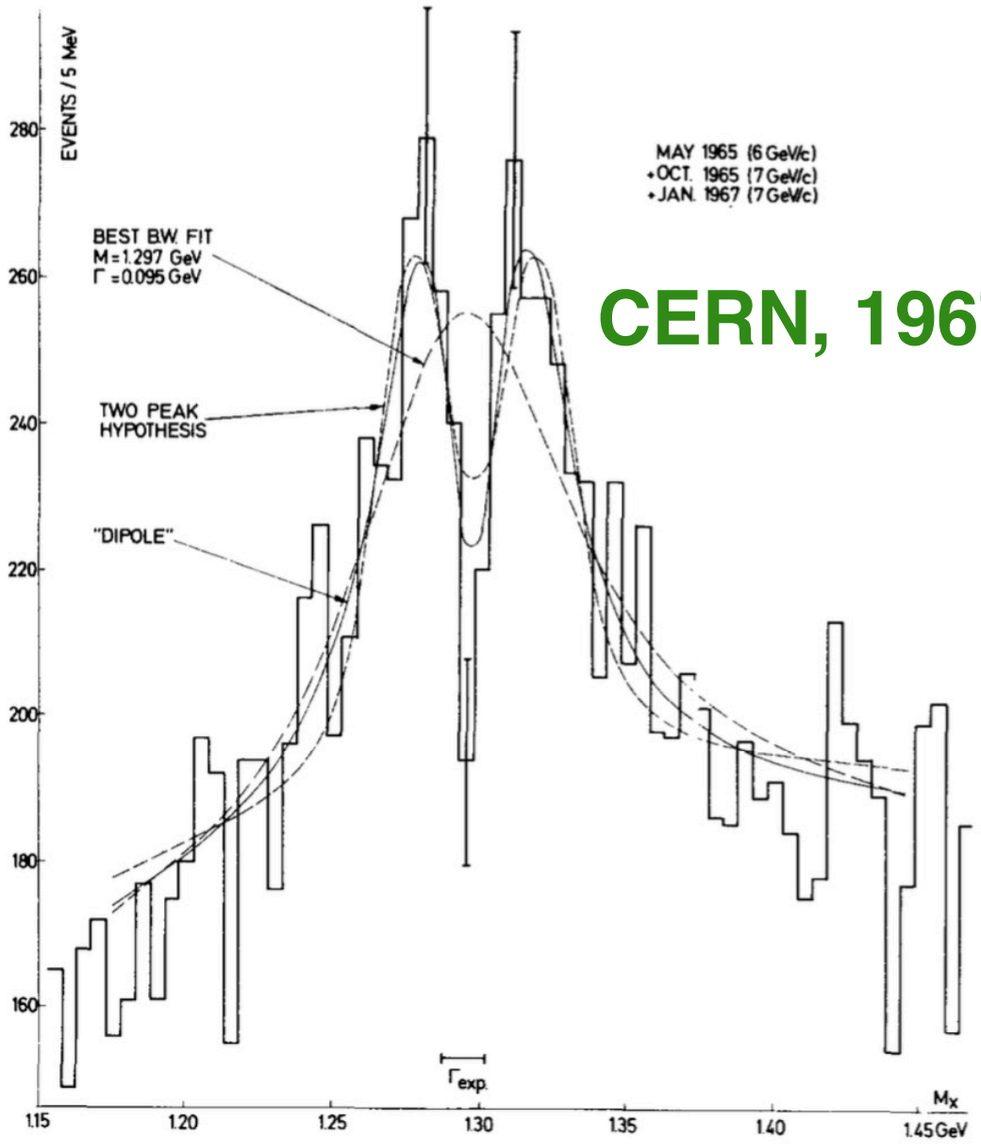
$$\bar{x} \pm \sigma_{stat} \pm \sigma_{syst}$$

$$\sigma_{stat} \sim 1/\sqrt{N}$$

Чем физик отличается от инженера?

В физическом эксперименте нет места человеческому фактору?

Расщепление $a_2(1320)$ мезона



CERN, 1967

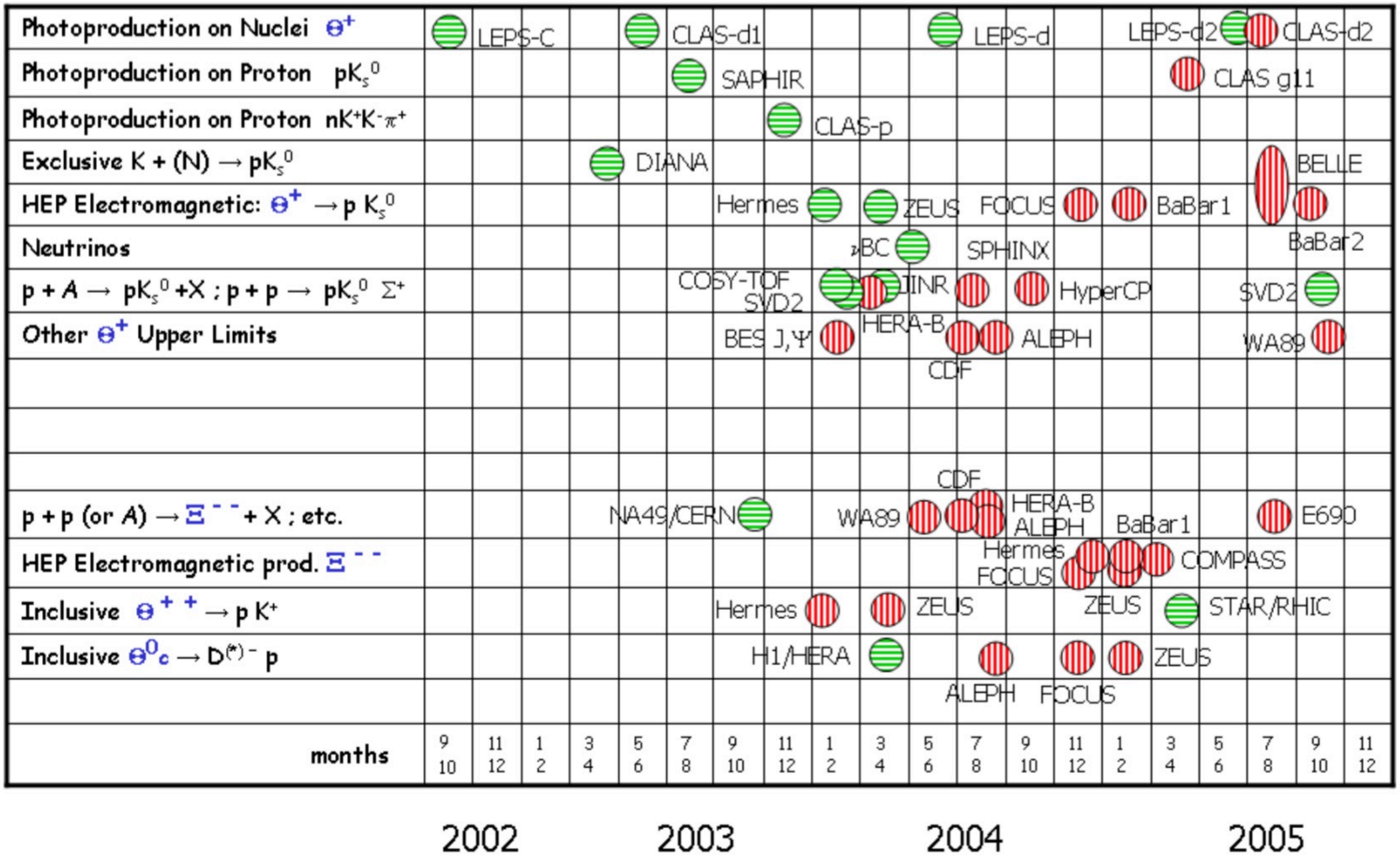
**Не одна частица
а две разных?!**

**Несколько других
экспериментальных групп
подтвердили наблюдение**

**Однако, при дальнейшем
наборе статистики
эффект исчез.**

Bandwagon effect - эффект присоединения к большинству

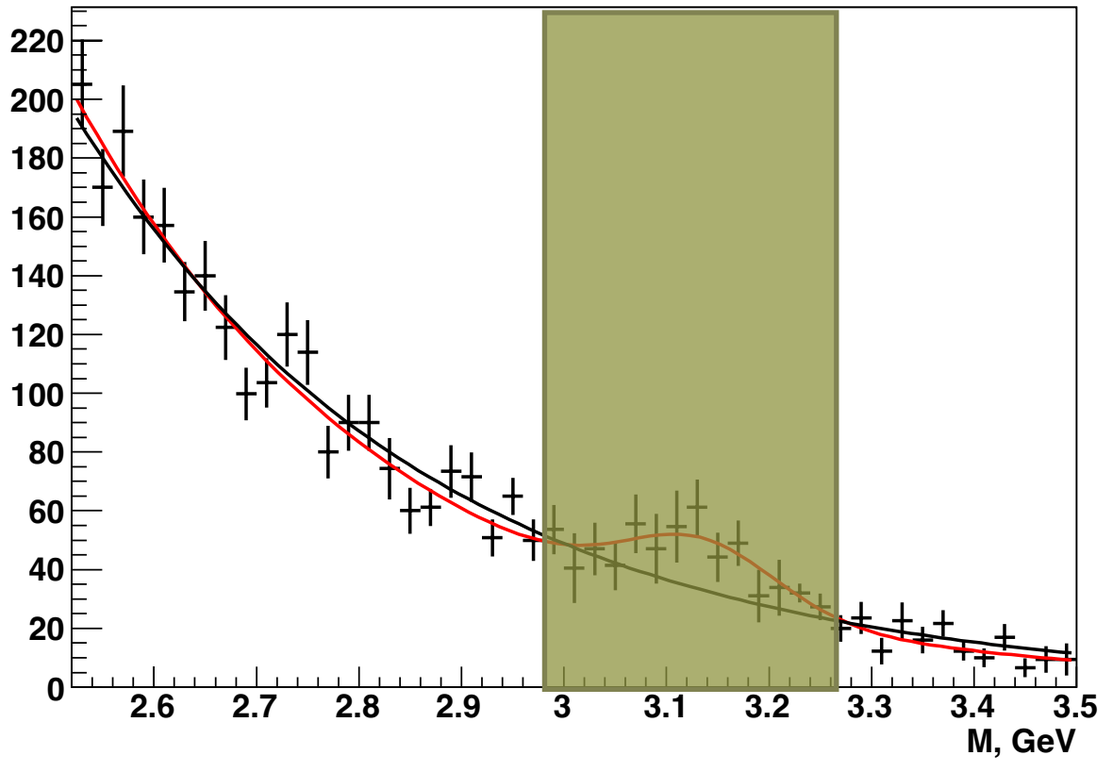
“Открытие” пентакварков в начале 2000х



Bandwagon effect

- эффект присоединения к большинству

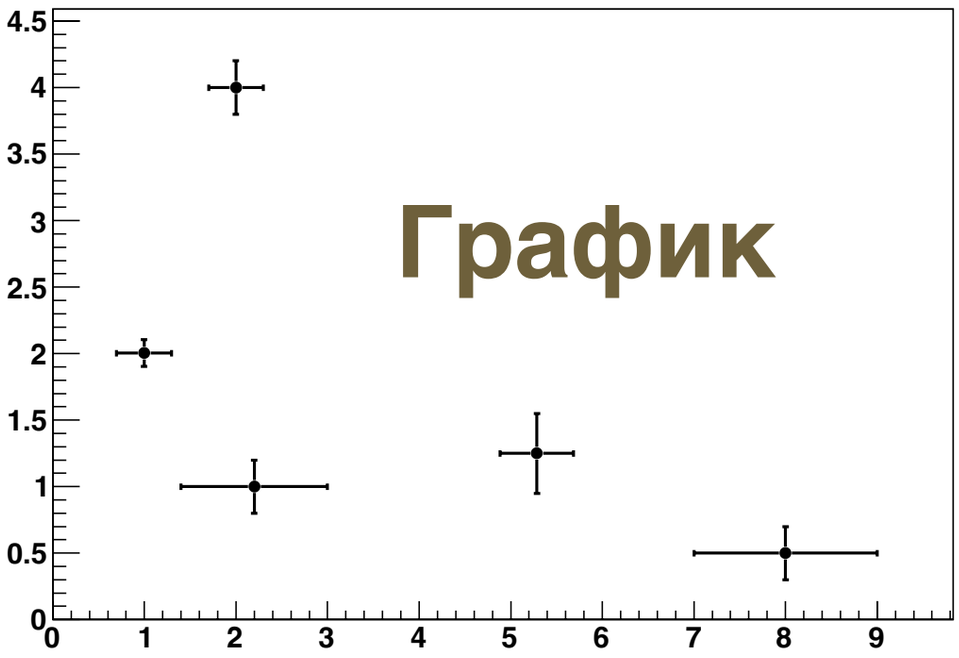
“Слепой” анализ

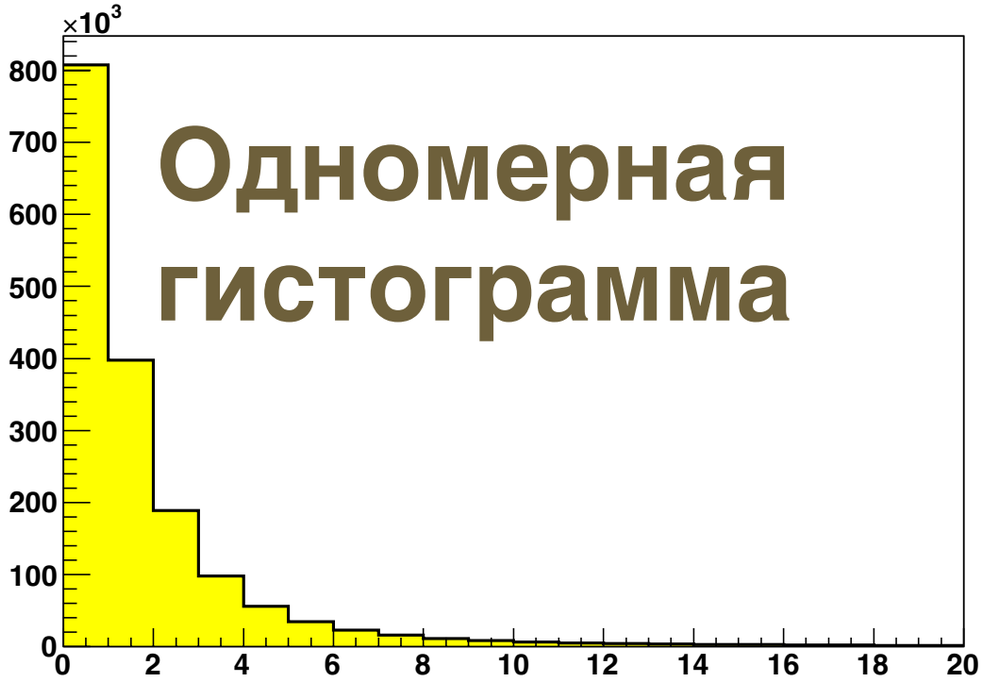


В случае поиска редких событий или слабого сигнала для устранения “психологических” эффектов иногда используют следующий подход:

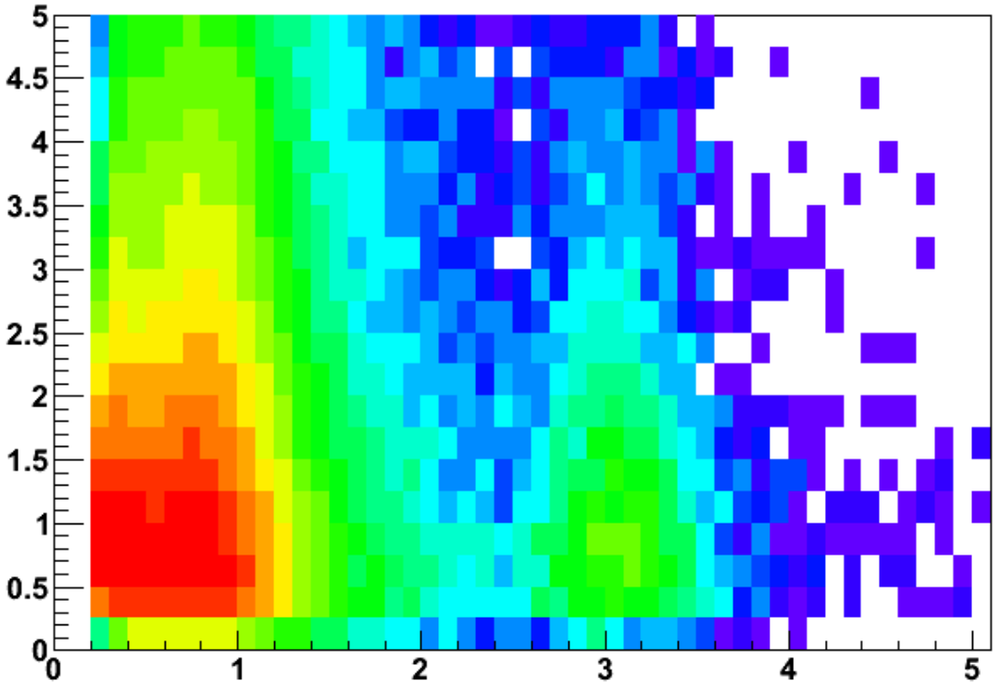
Область кинематических переменных, где ожидается слабый сигнал, “закрывается” на то время, пока оптимизируются критерии отбора. Он открывается лишь в последний момент, чтобы увидеть результат.

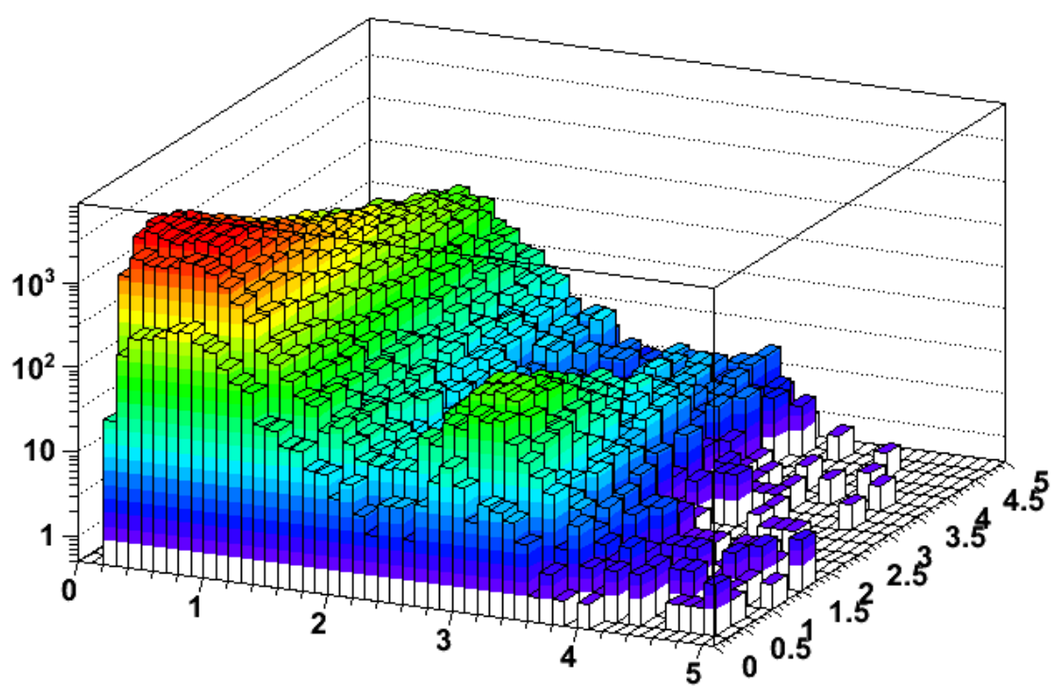
Графические методы обработки и представления данных





Двумерная гистограмма





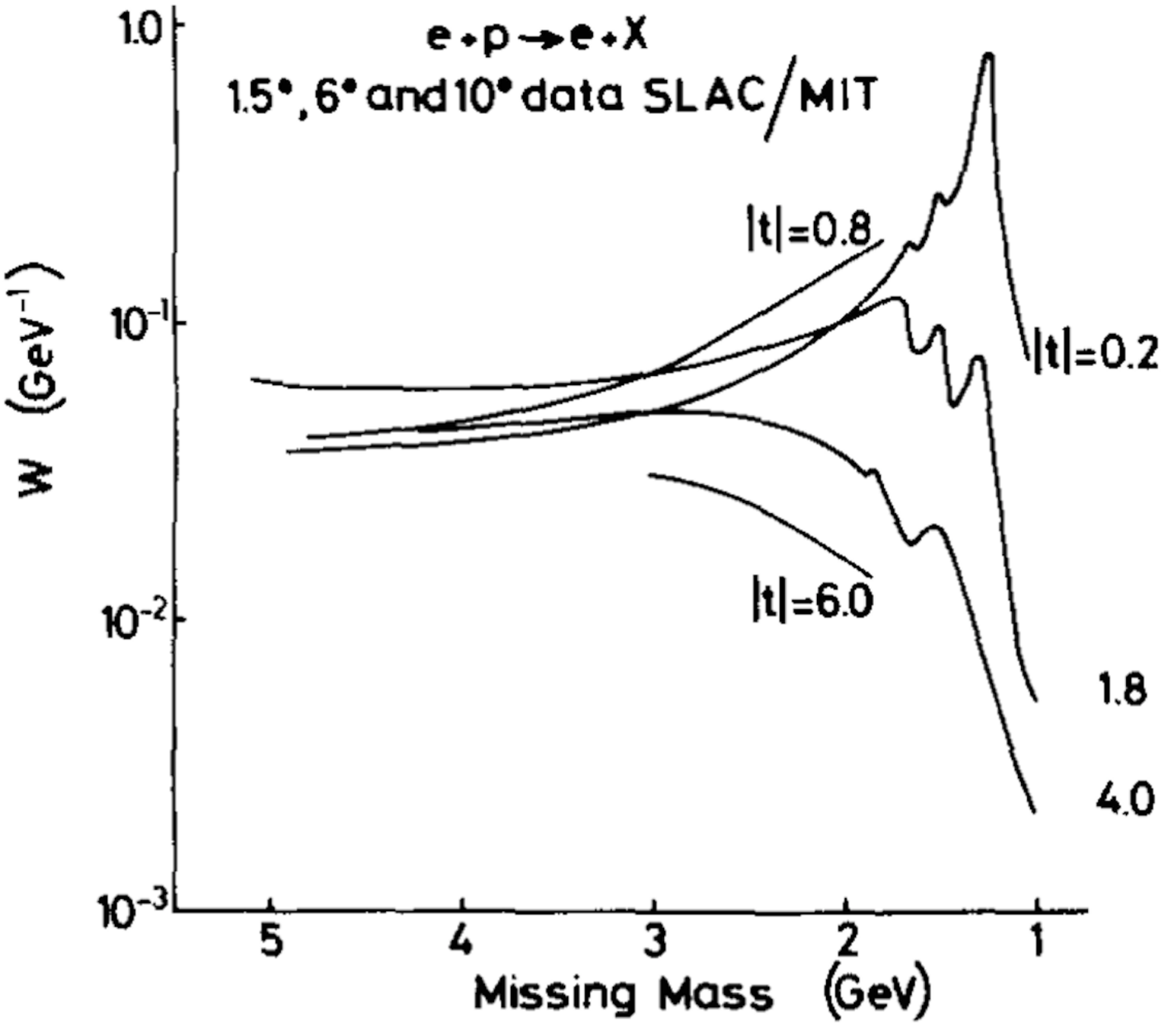
История пакетов обработки и визуализации данных в физике высоких энергий

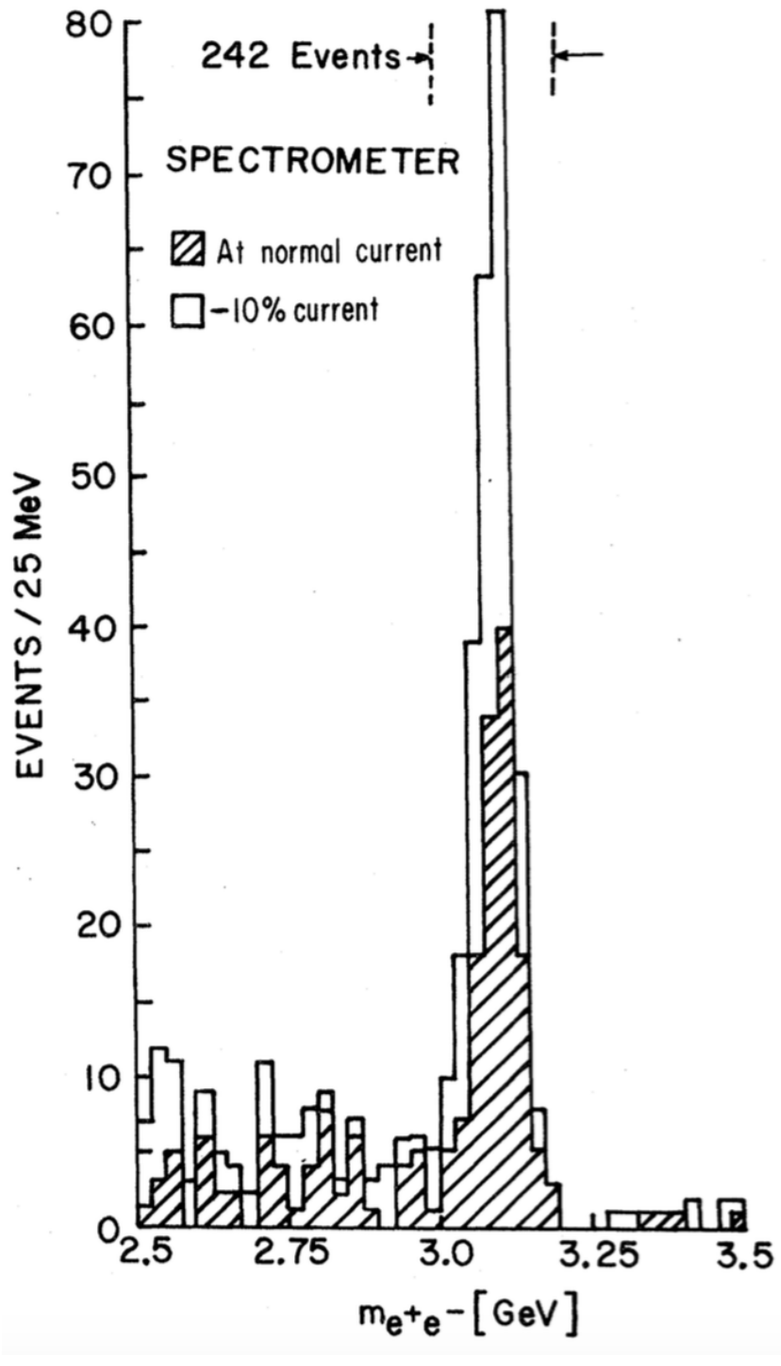
~1980 CERN: HTV – Interactive Histogramming and Visualisation - одна из первых интерактивных систем, позволяющих представить в наглядном графическом виде результаты анализа

1986 CERN: PAW (Physics Analysis Workstation) - основной пакет обработки данных до начала 2000х, позволяющий использовать огромный набор библиотек, написанных на языке FORTRAN (включая CERNLIB). http://cern.ch/paw/.
PAW++ - с расширенным графическим интерфейсом

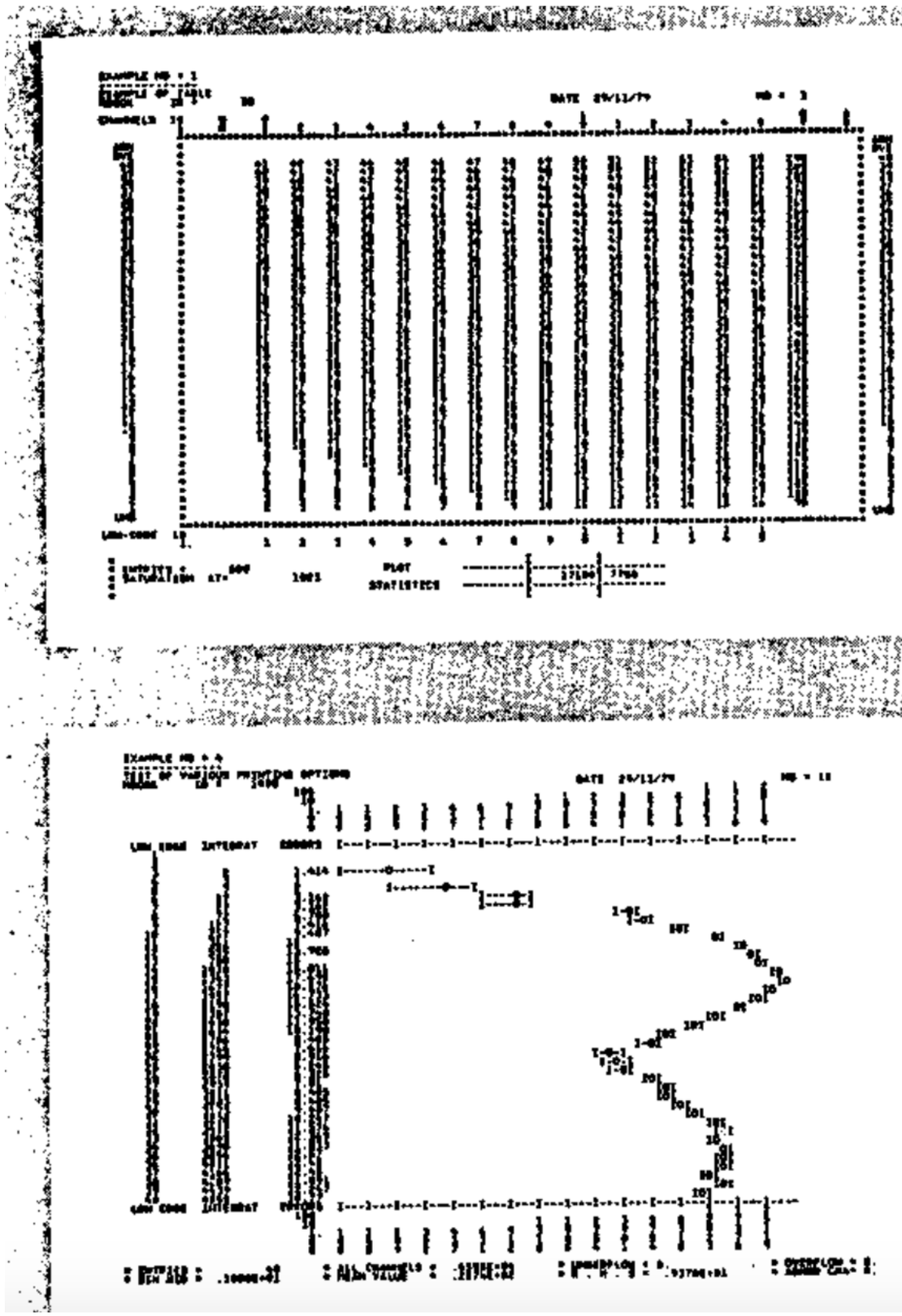
1994 CERN: ROOT - пакет обработки данных, основанный на C++. Является общепринятым в физике высоких энергий с середины 2000х

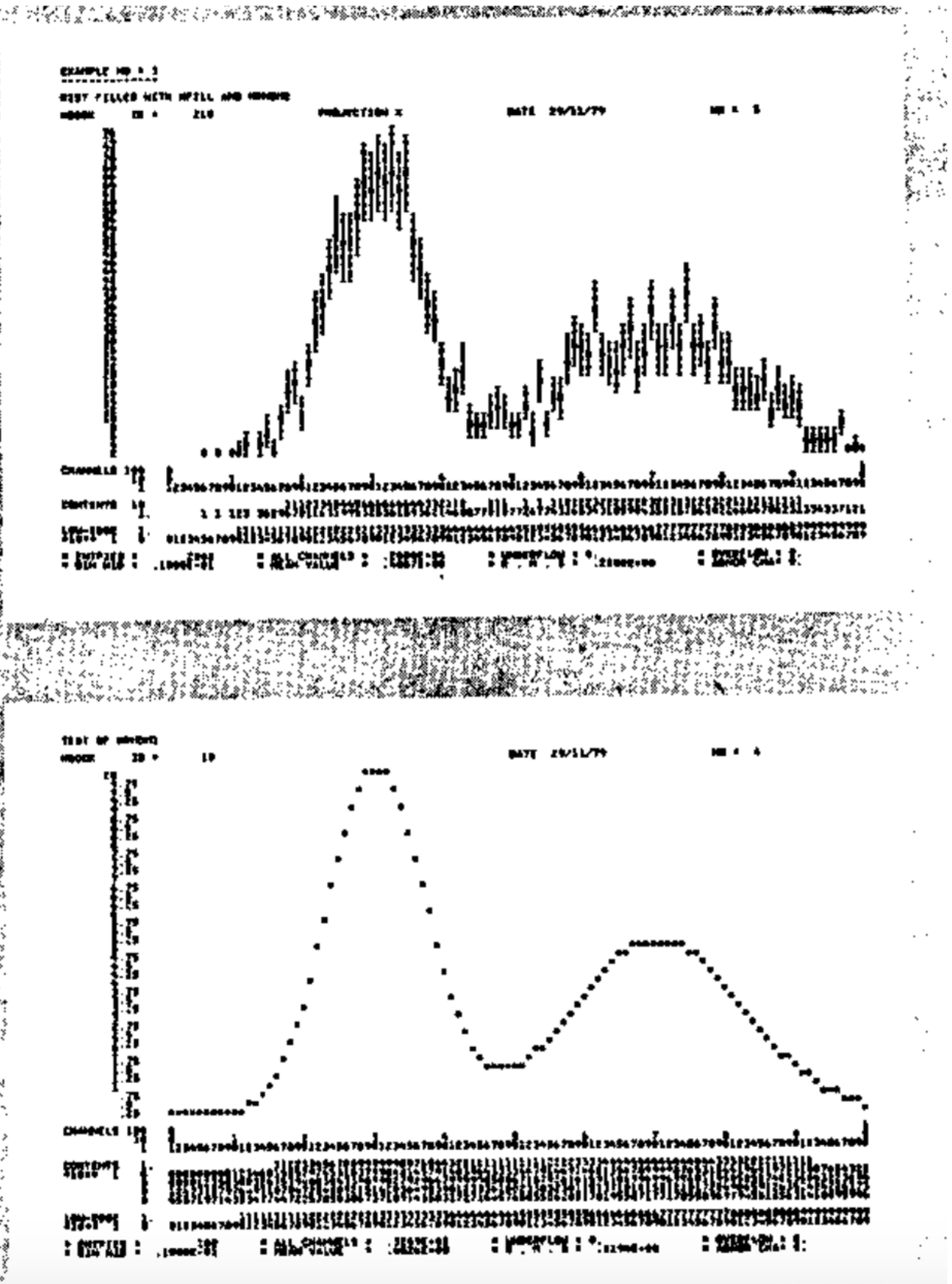
Докомпьютерная эпоха



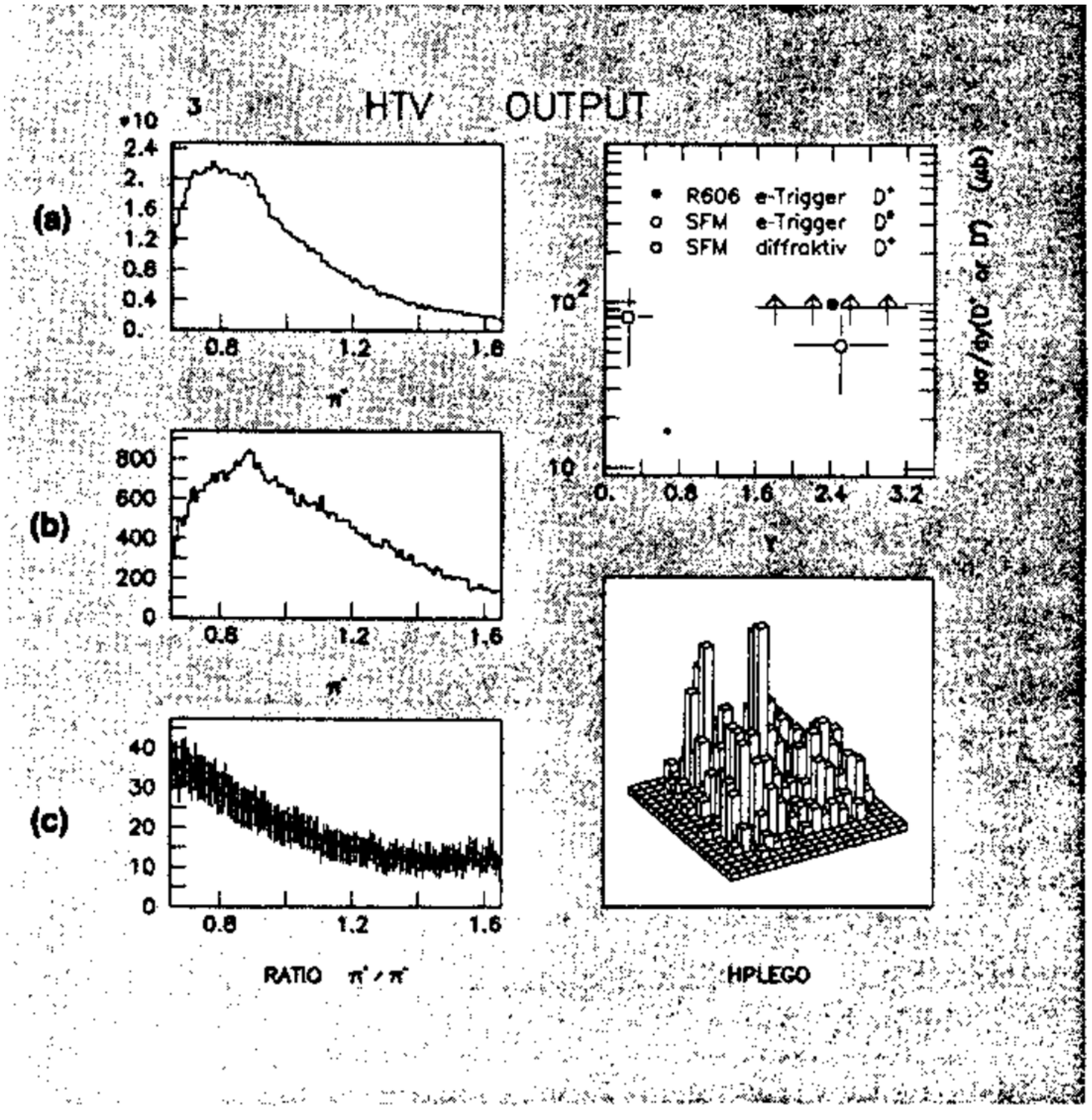


Конец 70х

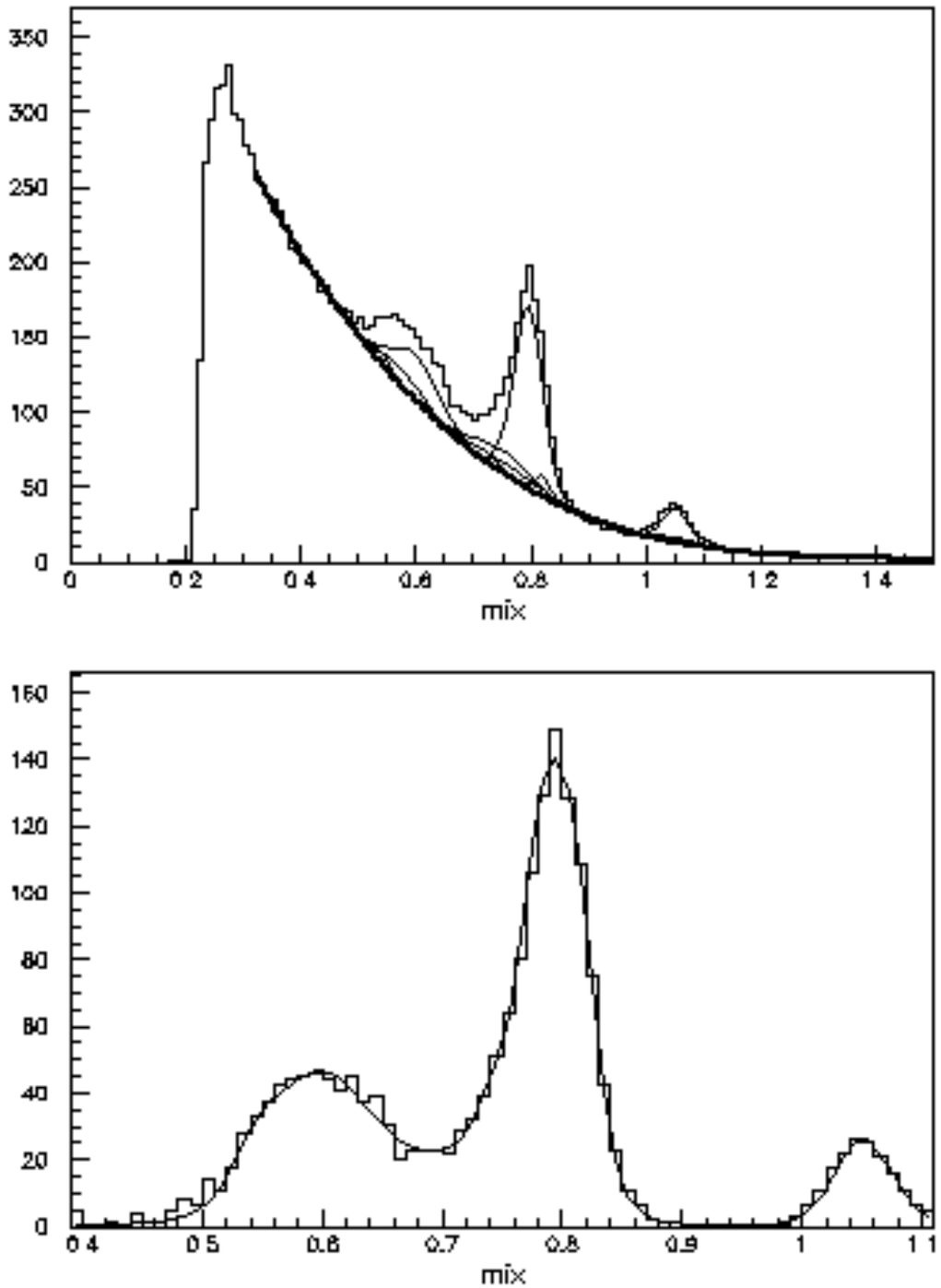


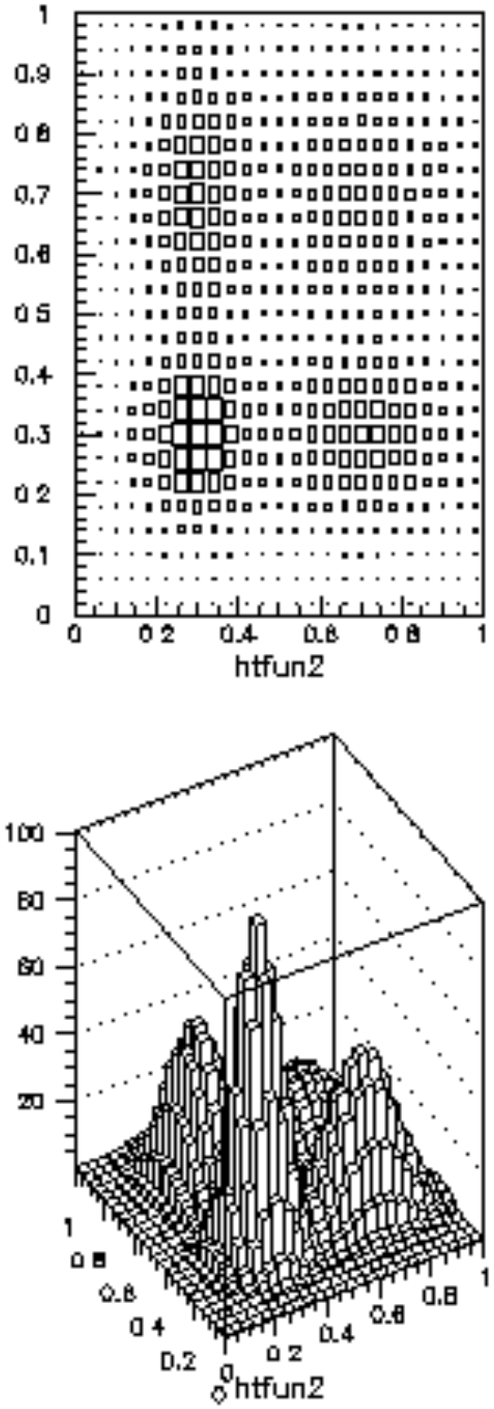


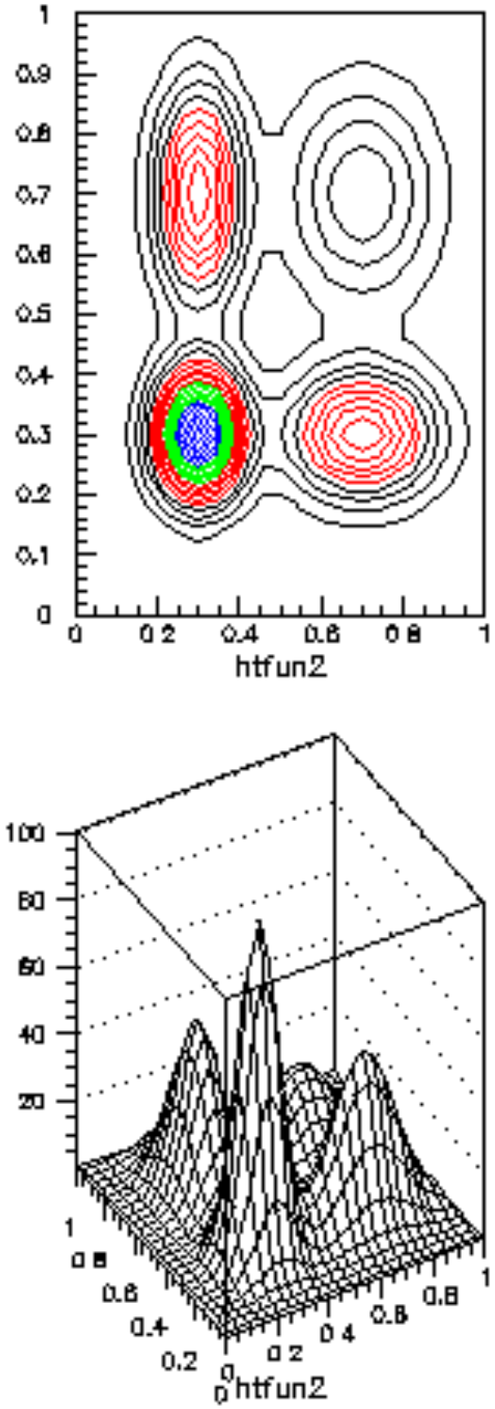
HTV


HTV OUTPUT
(a)
(b)
(c)
R606 e-Trigger D*
SFM e-Trigger D*
SFM diffraktiv D*
RATIO π'/π'
HPLEGO

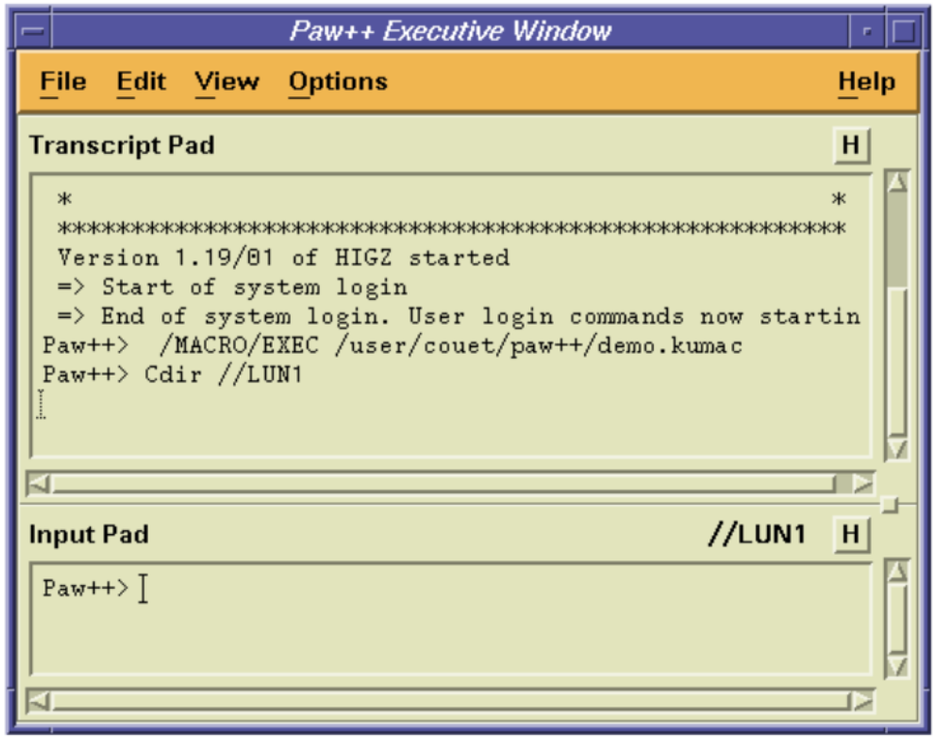
PAW

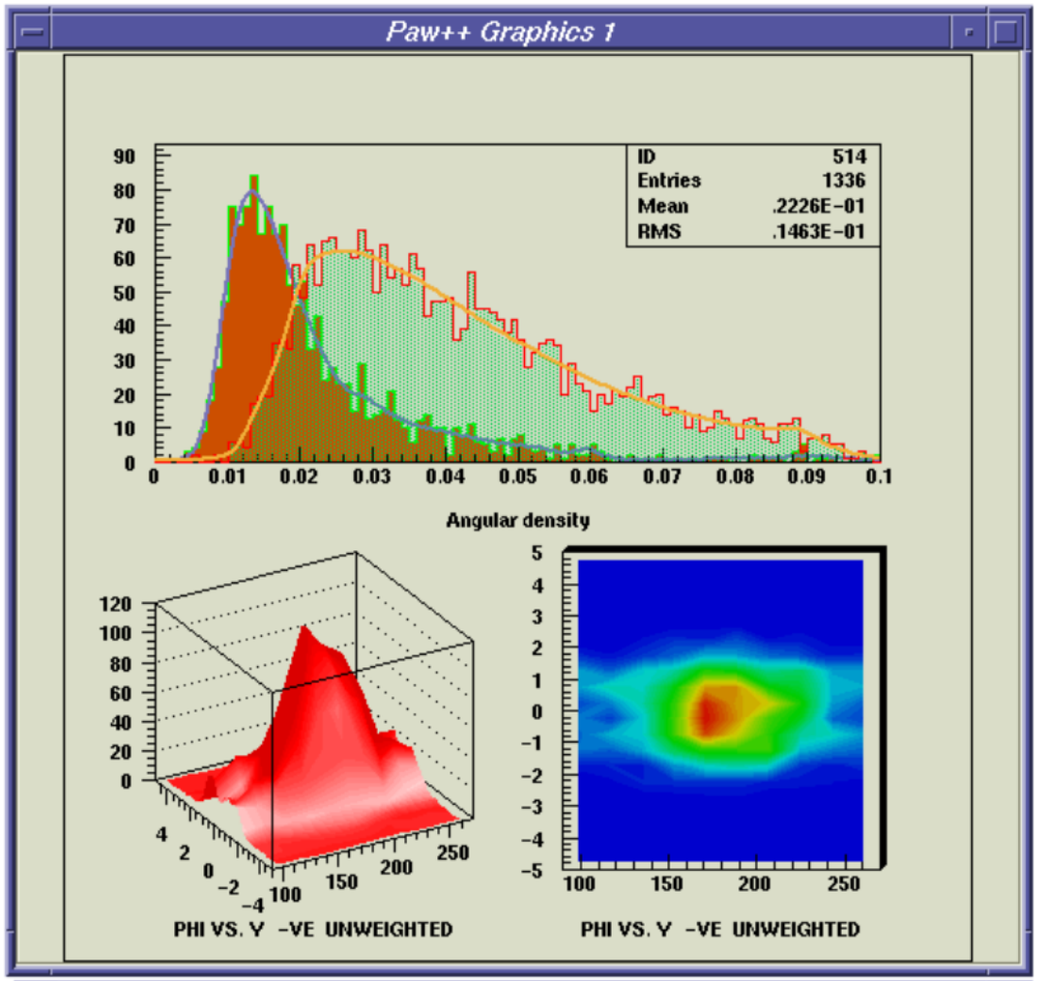


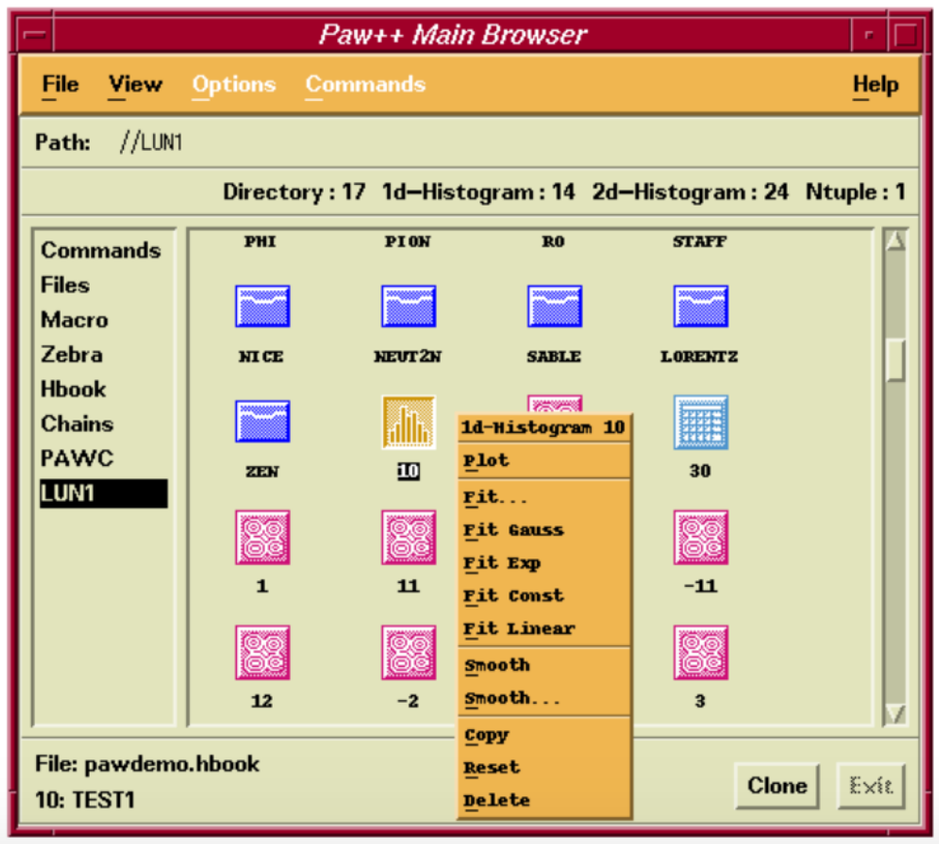


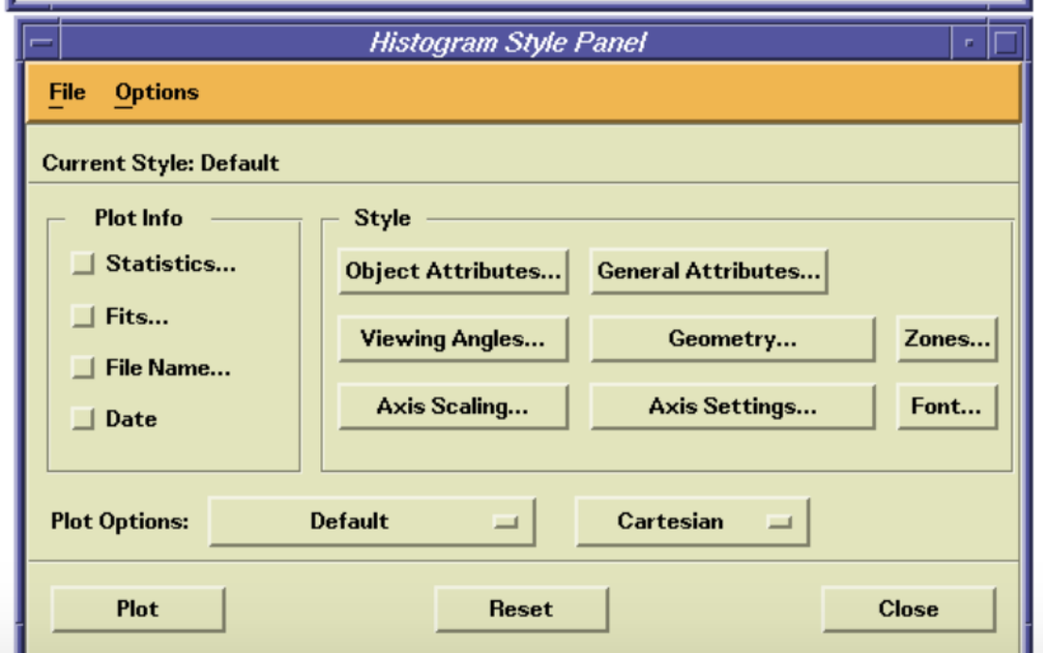


PAW++

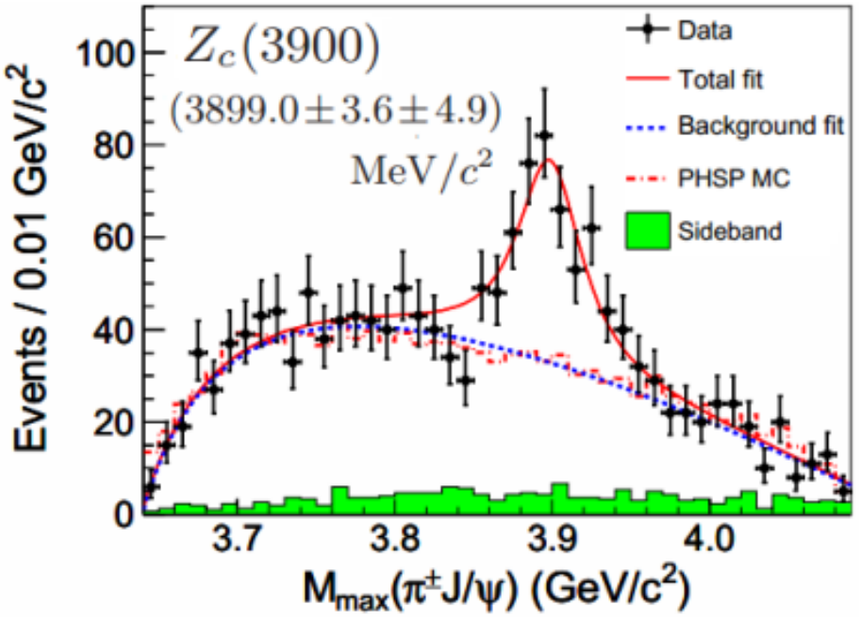

Paw++ Executive Window
File Edit View Options Help
Transcript Pad H
*
****
Version 1.19/01 of HIGZ started
=> Start of system login
=> End of system login. User login commands now startin
Paw++> /MACRO/EXEC /user/couet/paw++/demo.kumac
Paw++> Cdir //LUN1
Input Pad //LUN1 H
Paw++>

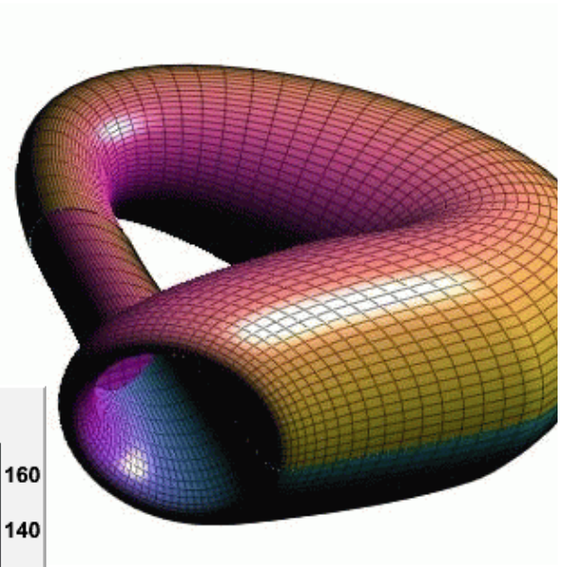

Paw++ Graphics 1
ID 514
Entries 1336
Mean .2226E-01
RMS .1463E-01
Angular density
PHI VS. V -VE UNWEIGHTED
PHI VS. V -VE UNWEIGHTED

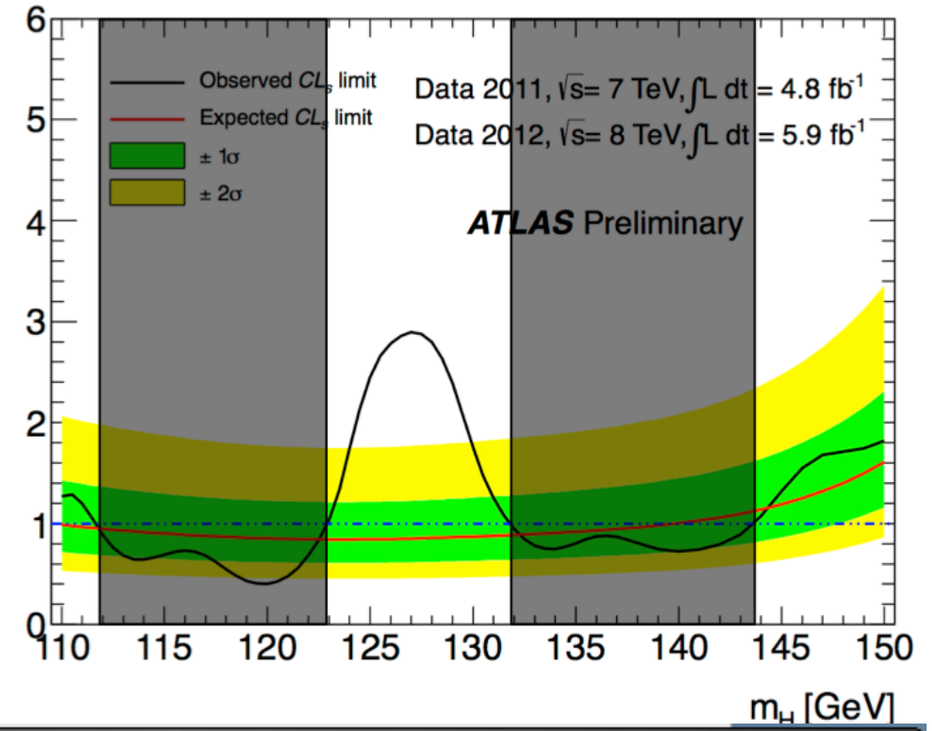

Paw++ Main Browser
File View Options Commands Help
Path: //LUN1
Directory : 17 1d-Histogram : 14 2d-Histogram : 24 Ntuple : 1
Commands
Files
Macro
Zebra
Hbook
Chains
PAWC
LUN1
PHI
PION
RO
STAFF
NICE
NEUT2N
SABLE
LORENTZ
ZEN
10
30
1
11
-11
12
-2
3
1d-Histogram 10
Plot
Fit...
Fit Gauss
Fit Exp
Fit Const
Fit Linear
Smooth
Smooth...
Copy
Reset
Delete
File: pawdemo.hbook
10: TEST1
Clone
Exit

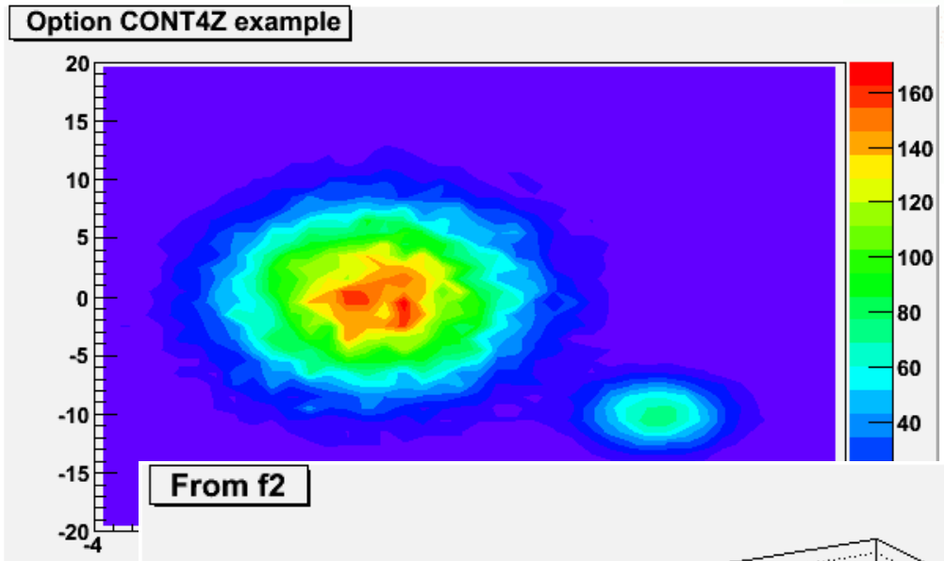

Histogram Style Panel
File Options
Current Style: Default
Plot Info
Statistics...
Fits...
File Name...
Date
Style
Object Attributes...
General Attributes...
Viewing Angles...
Geometry...
Zones...
Axis Scaling...
Axis Settings...
Font...
Plot Options:
Default
Cartesian
Plot
Reset
Close

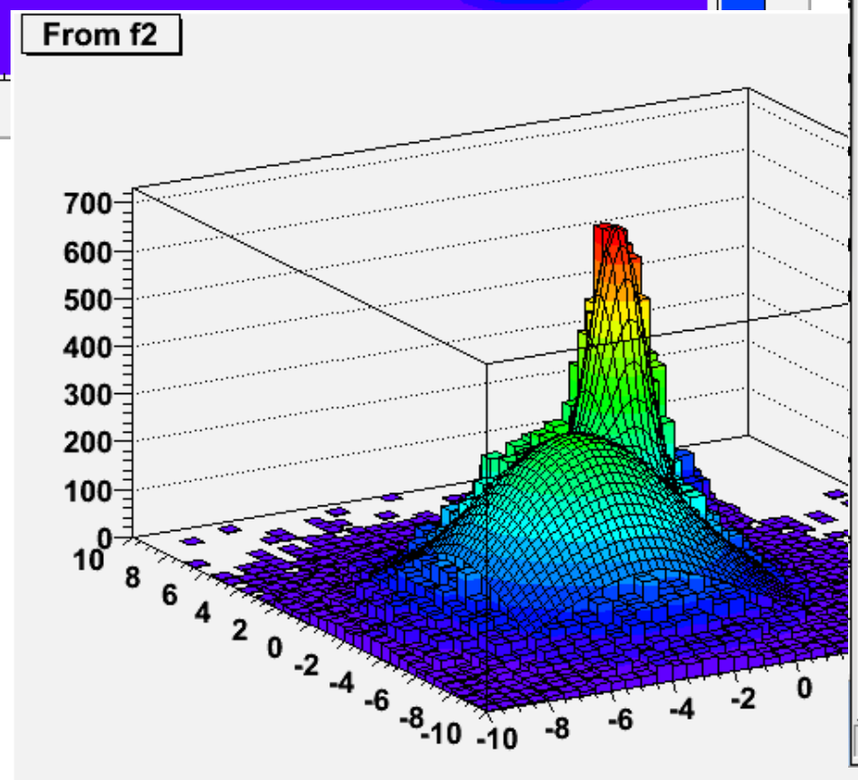
ROOT

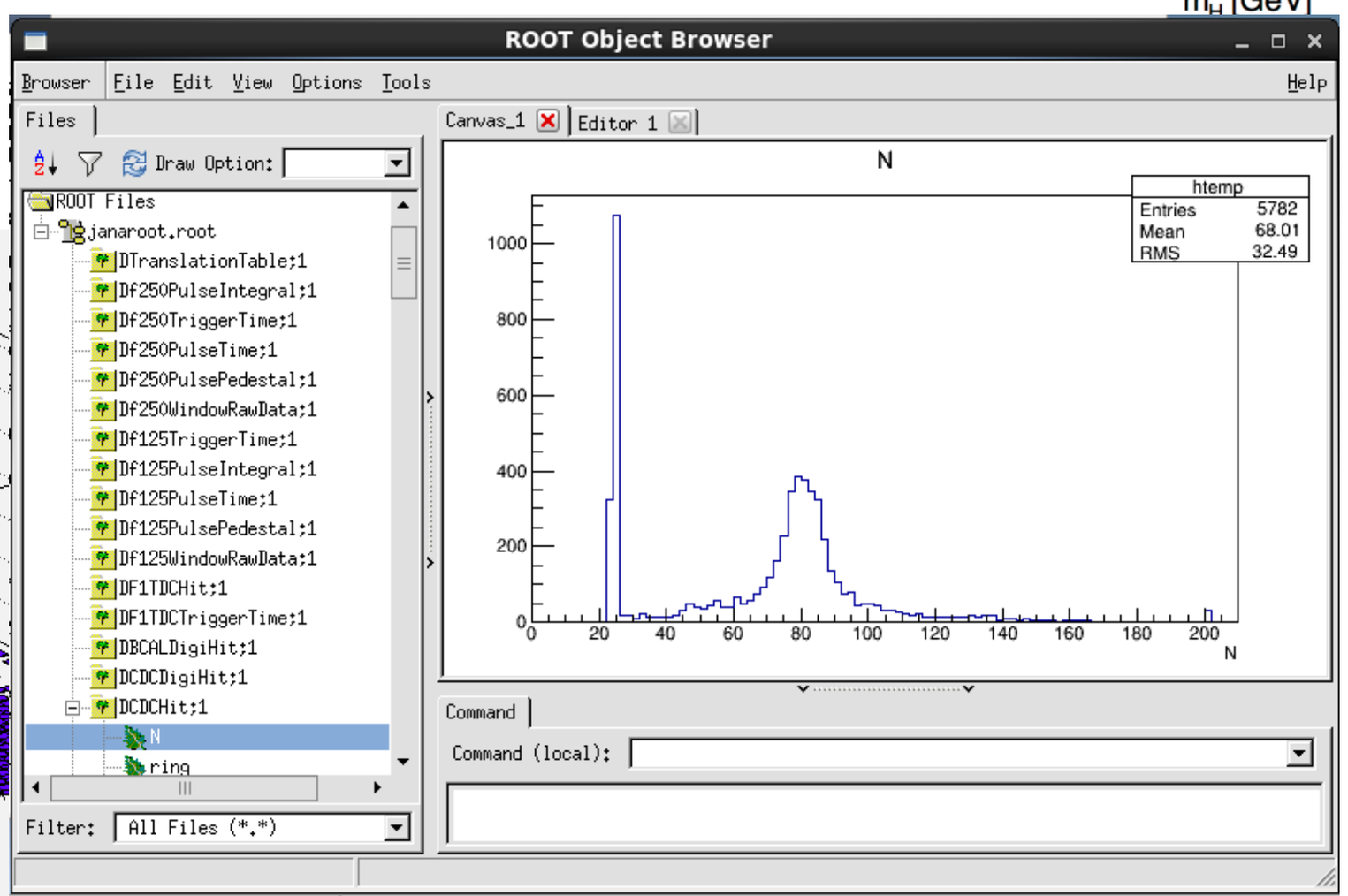

$Z_c(3900)$
$(3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9)$ MeV/c^2
Data
Total fit
Background fit
PHSP MC
Sideband
Events / 0.01 GeV/c^2
$M_{max}(\pi^{\pm}J/\psi)$ (GeV/c^2)




Observed CL_s limit
Expected CL_s limit
± 1σ
± 2σ
Data 2011, $\sqrt{s}$= 7 TeV, $\int L\,dt$ = 4.8 fb^{-1}
Data 2012, $\sqrt{s}$= 8 TeV, $\int L\,dt$ = 5.9 fb^{-1}
ATLAS Preliminary
95% CL limit on σ/σ_{SM}
m_H [GeV]


Option CONT4Z example


From f2


ROOT Object Browser
Browser
File
Edit
View
Options
Tools
Help
Files
Draw Option:
ROOT Files
janaroot.root
DTranslationTable;1
Df250PulseIntegral;1
Df250TriggerTime;1
Df250PulseTime;1
Df250PulsePedestal;1
Df250WindowRawData;1
Df125TriggerTime;1
Df125PulseIntegral;1
Df125PulseTime;1
Df125PulsePedestal;1
Df125WindowRawData;1
DF1TDCHit;1
DF1TDCTriggerTime;1
DBCALDigiHit;1
DCDCDigiHit;1
DCDCHit;1
N
ring
Filter:
All Files (*.*)
Canvas_1
Editor 1
N
htemp
Entries 5782
Mean 68.01
RMS 32.49
Command
Command (local):

ROOT - стандартный пакет обработки данных в физике частиц

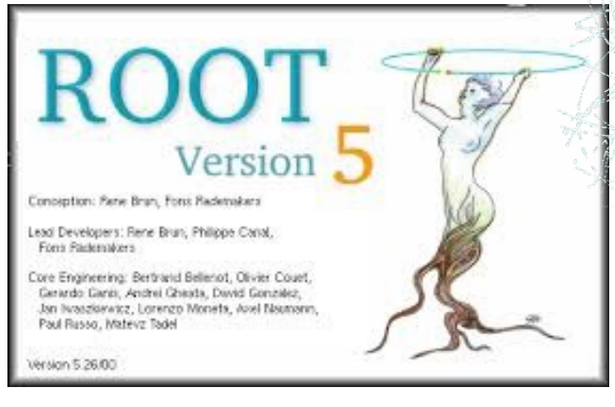


- **Командная строка C++**
- **Обширная библиотека классов C++**
- **Объектно-ориентированный формат хранения данных**

http://root.cern.ch/

ROOT может использоваться в интерактивном режиме. Его библиотеки могут быть так же использованы при компиляции программ на C++

Текущая версия:



5.34



6.32

ROOT 7

В разработке

Моделирование в физике частиц

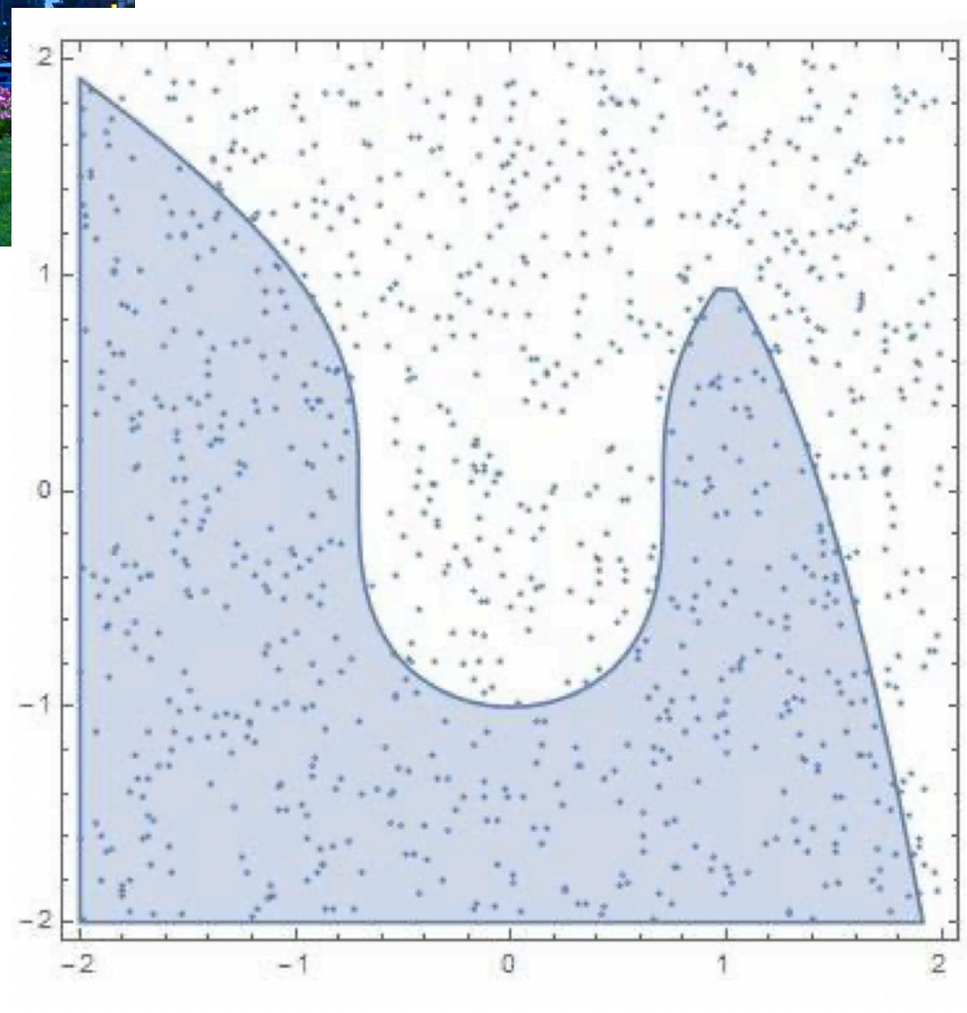
- **Мы хотим знать, что и как часто рождается в том или ином взаимодействии**
- **Мы хотим знать, куда полетят родившиеся частицы и какие импульсы они будут иметь**
- **Мы хотим знать, как они будут взаимодействовать с нашей установкой (геометрический аксептанс, разрешение, эффективность регистрации, амплитудные и временные характеристики отклика и т. д.**

Мы хотим это знать до проведения эксперимента и до создания установки !

Метод Монте Карло



Метод решения математических задач, где поведение системы можно описать функцией плотности вероятности. Простая модель многократно обсчитывается с использованием генераторов случайных чисел.



Метод Монте Карло



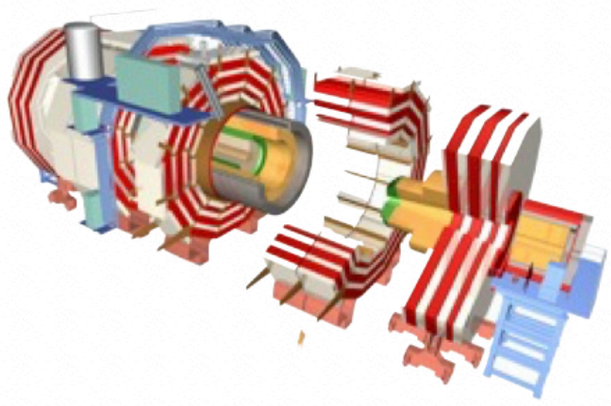
Моделирование в физике частиц

Choose model, constraints, parameters, decay chain of interest

Proposed Theory

Kinematics, information from a known (detectable) particles

Generator



Experiment Triggering

Detector Simulation
- Hardware
- Software

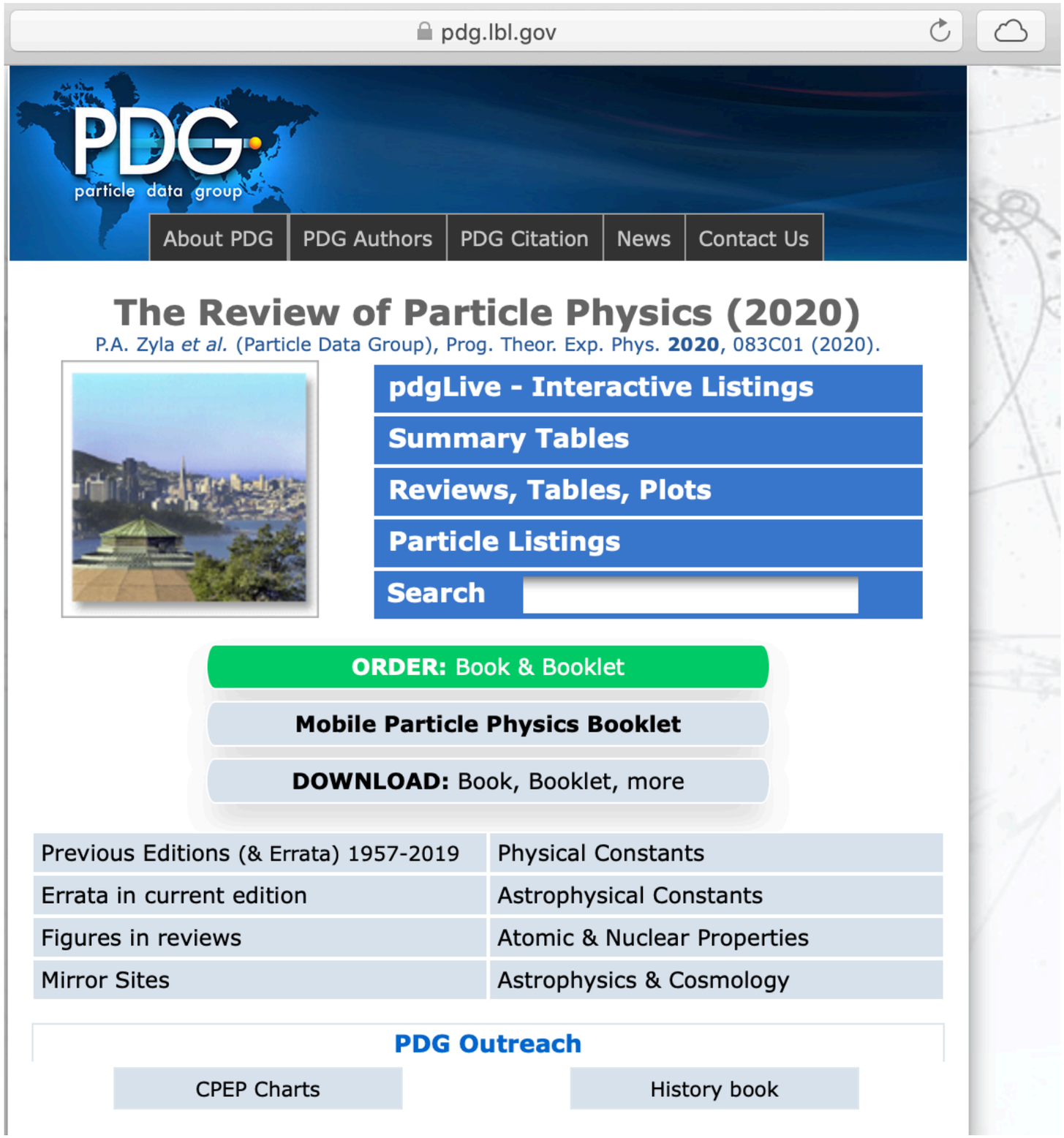
Simulation Digitization Triggering

Offline software
- Event selection

Reconstruction Analysis

Results
Improvement

Наша Библия, Тора, Коран и Камасутра



https://pdg.lbl.gov

Gauge and Higgs Bosons (gamma, g, W, Z, ...)

Leptons (e, mu, tau, ... neutrinos ...)

Quarks (u, d, s, c, b, t, b', t', Free)

Mesons contents

Baryons contents

Searches not in Other Sections (SUSY, Compositeness, ...)

Tests of Conservation Laws

Introduction, History plots, Online information		
Introduction		
History plots		
Authors		
Online particle physics information (rev.)	PDF /	Interactive

Constants, Units, Atomic and Nuclear Properties		
Physical constants (rev.)		
Astrophysical constants (rev.)		
International system of units (SI)		
Periodic table of the elements (rev.)		
Electronic structure of the elements		
Atomic and nuclear properties of materials	PDF /	Interactive
Electromagnetic relations		
Naming scheme for hadrons (rev.)		

Standard Model and Related Topics
Quantum chromodynamics (rev.)
Electroweak model and constraints on new physics (rev.)
Higgs boson physics, status of (rev.)
CKM quark-mixing matrix (rev.)
CP violation in the quark sector (rev.)
Neutrino masses, mixing, and oscillations (new)
Quark model (rev.)
Heavy-quark and soft-collinear effective theory (rev.)
Lattice quantum chromodynamics (rev.)
Structure functions (rev.)
Fragmentation functions in e+ e-, ep, and pp collisions (rev.)
High energy soft QCD and diffraction (new)