

Школа по кварк-глюонной и адронной материи

КГ/АМ-2023

***Эксперимент в
физике частиц***

Гуськов Алексей Вячеславович

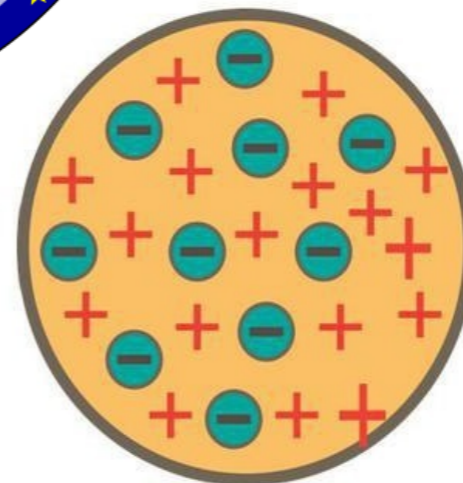
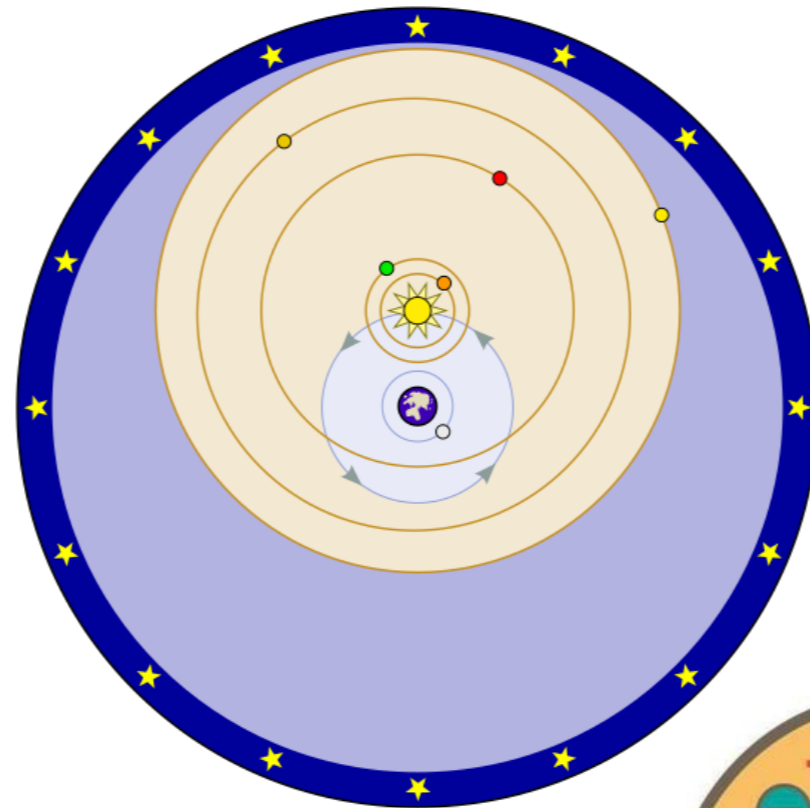
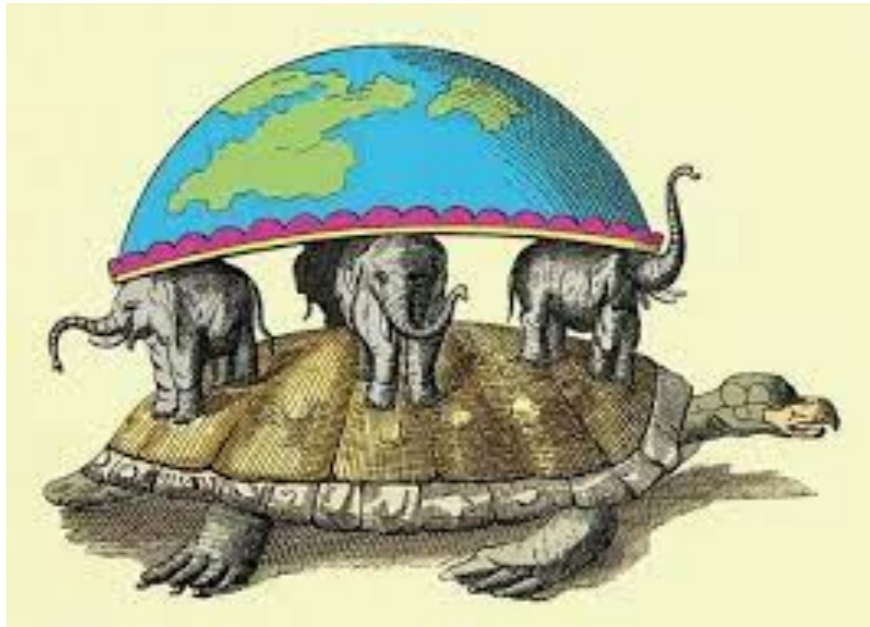
avg@jinr.ru

***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



**А вы теоретики или
экспериментаторы?**

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



Обработчик

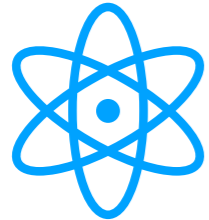
Набор данных

Методист





Что должен знать уметь экспериментатор?



Обладать достаточными общими знаниями в соответствующей области физики частиц



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



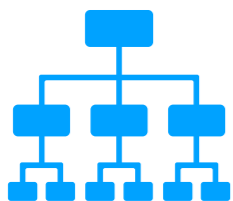
Иметь общее представление о принципах работы основных типов используемых детекторов



Свободно владеть методами матстатистики, теории вероятностей и численного моделирования



Быть программистом (C++, Linux...)



Уметь работать с большими объёмами данных



Владеть английским

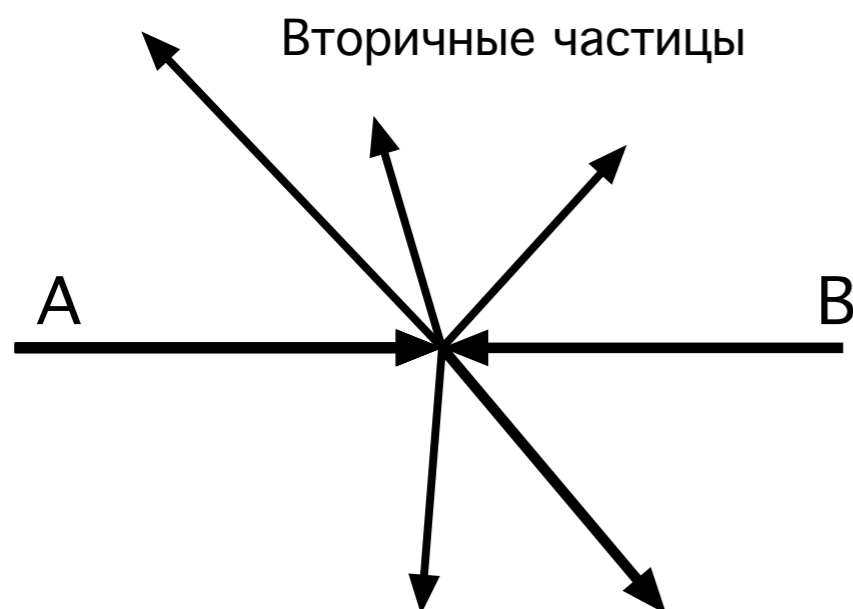
Физика частиц: а что мы вообще изучаем?

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

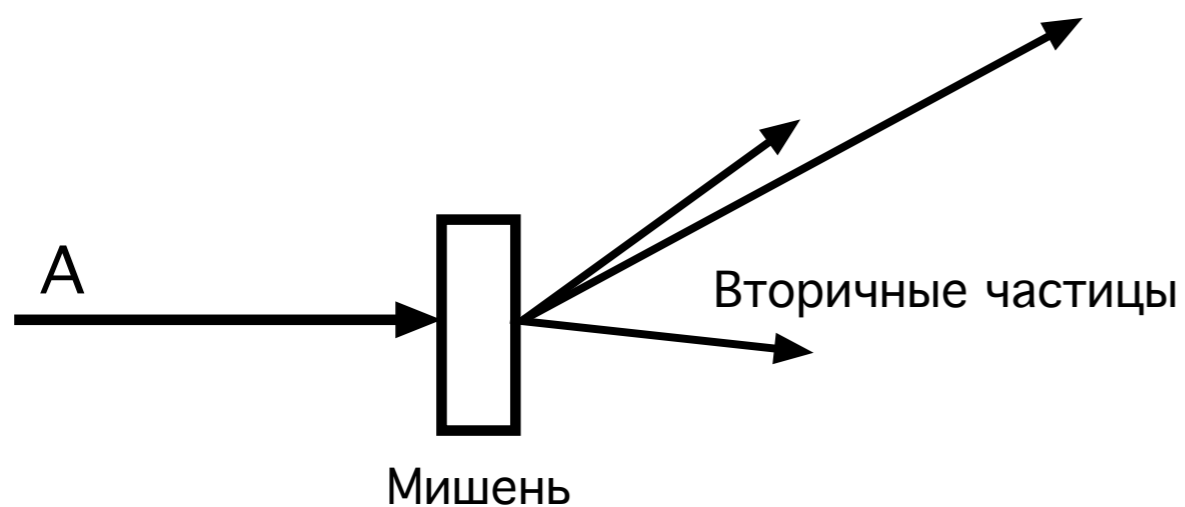
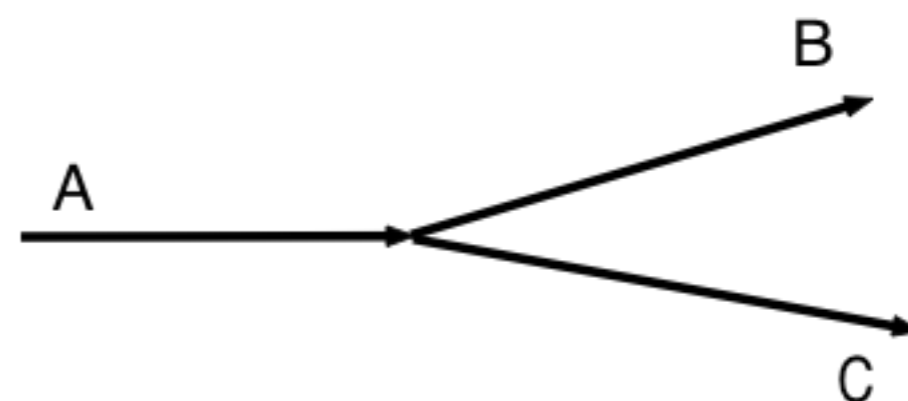
То есть суть эксперимента в физике частиц - заставить частицы **взаимодействовать**, рождая **новые частицы**.

Элементарное физическое событие - акт взаимодействия двух частиц

Встречные пучки

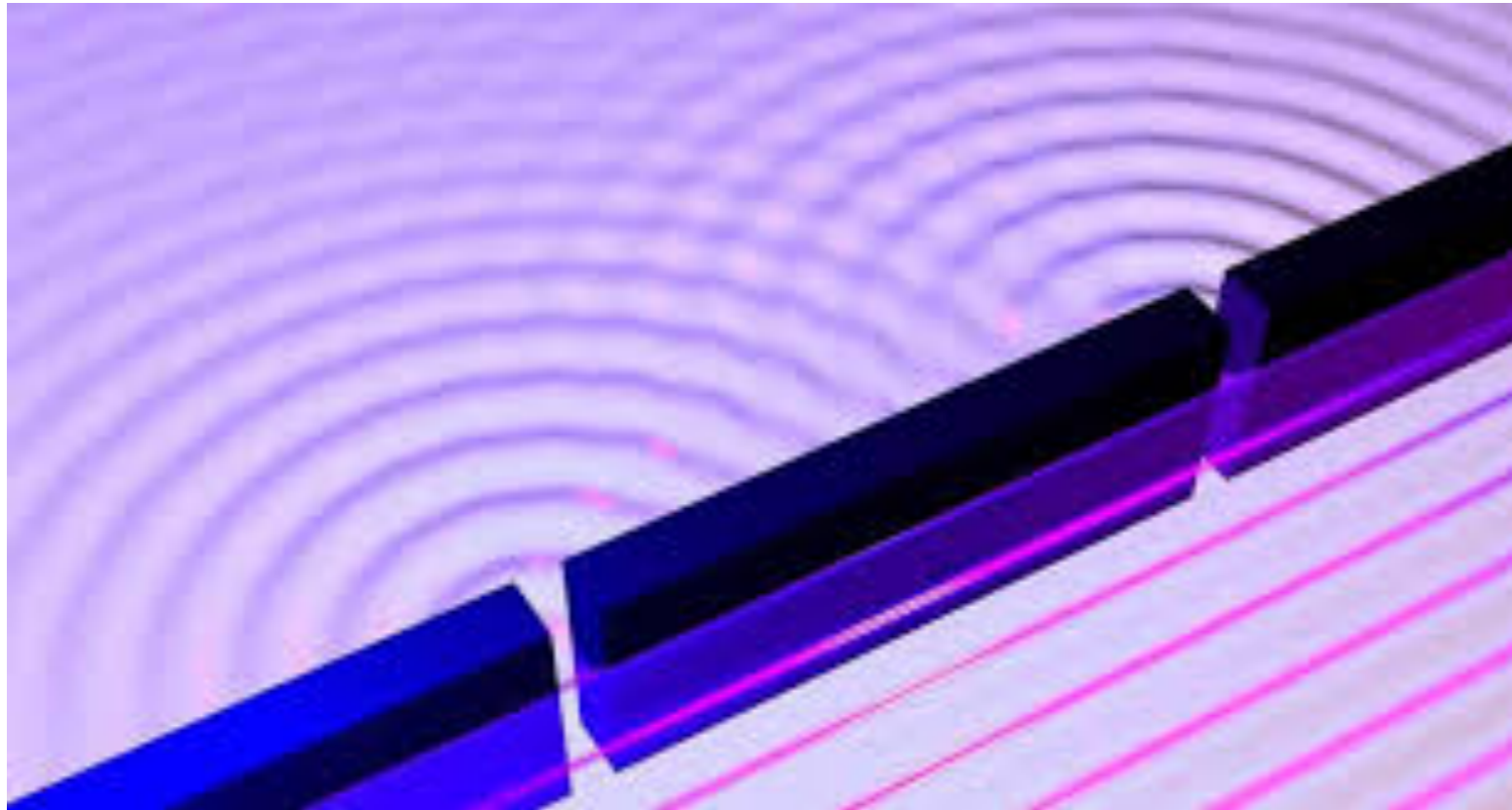


Распад частицы



Неподвижная мишень

Элементарная частица - классический или квантовый объект?



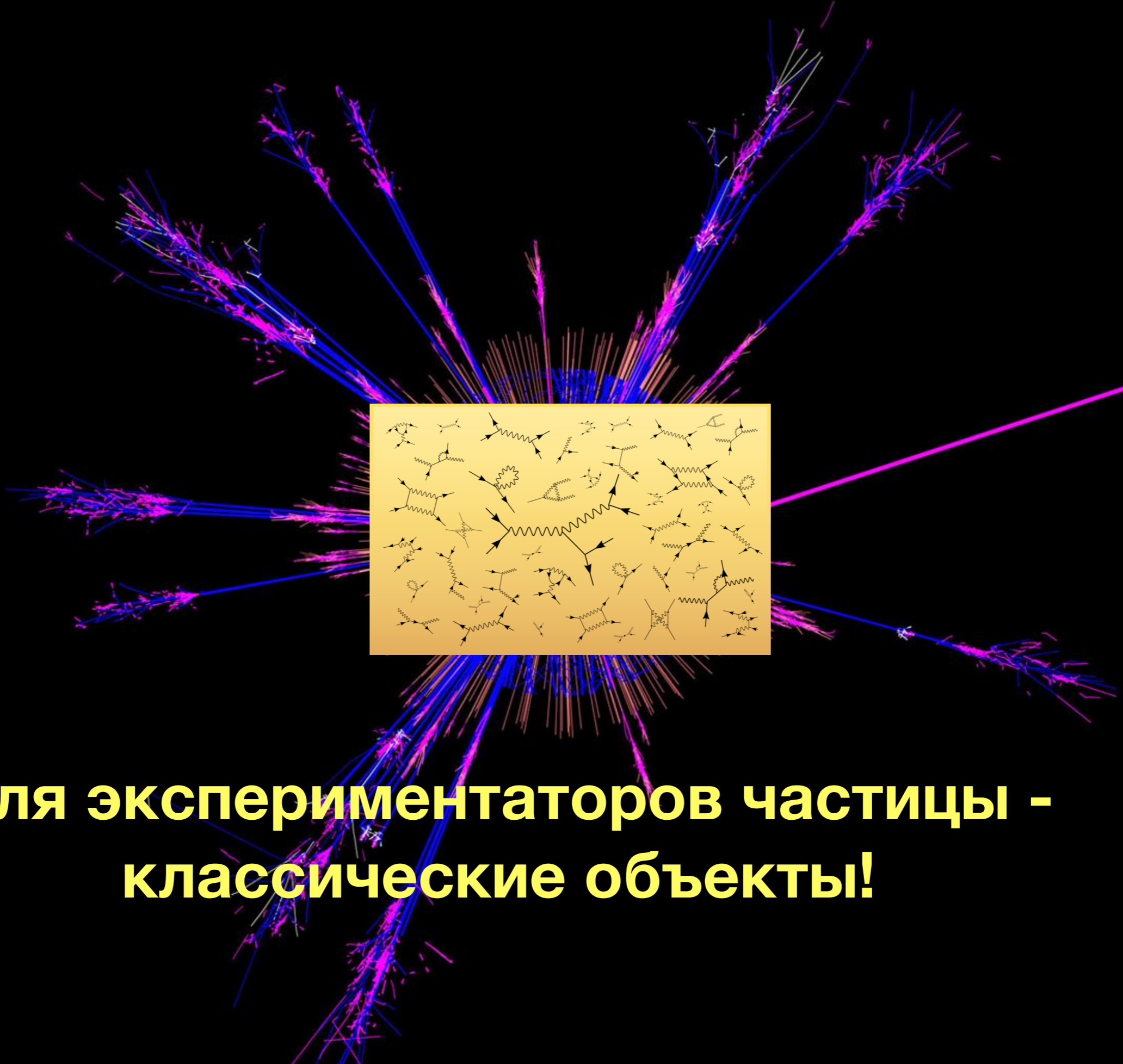
**Де-Бройлевская
длина волны:**

$$\lambda = h/p$$

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

$L \sim \lambda$ — квантовая механика

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



**Для экспериментаторов частицы -
классические объекты!**

При этом частицы для экспериментаторов являются релятивистскими

Наименование частицы	Символ		Масса МэВ	Электрический заряд	Время жизни, (секунды)			
	Частица	Анти-частица						
Фотон	γ	$\bar{\gamma}$	0	0	Стабилен			
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно		
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно		
	Нейтрино тау-лептонное	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	-1	Стабильно		
	Электрон	e^-	e^+	0.511	-1	Стабилен		
	Мюон	μ^-	μ^+	105.66	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$		
	Тау-лептон	T^-	T^+	1782	0	$3,4 \cdot 10^{-13}$		
Мезоны	Пи-мезоны (пионы)	π^0	π^0	134,96	0	$8 \cdot 10^{-17}$		
		π^+	π^-	139,57	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$		
	Ка-мезоны (каоны)	K^+	K^-	493,67	1	$1,24 \cdot 10^{-8}$		
	K^0	\bar{K}^0	497,7	0	$K_S^0 - 8,9 \cdot 10^{-8}$			
	Эта-нуль мезон	η^0	η^0	548,8	0	$K_L^0 - 5,18 \cdot 10^{-8}$ 10^{-18}		
Адроны	Нуклоны	Протон	p	\bar{p}	938,28	1	Стабилен	
		Нейтрон	n	\bar{n}	939,57	0	918	
	Барionyны	Лямбда-гиперон	λ^0	$\bar{\lambda}^0$	1115,6	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$	
			Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1189,37	1	$8 \cdot 10^{-11}$
				Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1192,48	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1197,35	-1	$1,48 \cdot 10^{-10}$	
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1314,9	0	$2,90 \cdot 10^{-10}$	
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1321,3	-1	$1,64 \cdot 10^{-10}$	
	Гипероны	Омега-минус-частица	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1672,2	-1	$8,2 \cdot 10^{-11}$	

Лоренц-фактор:

$$\gamma = E/m$$

Для электронов и позитронов коллайдера LEP

$$\gamma \leq 200\ 000$$

Время жизни частицы:

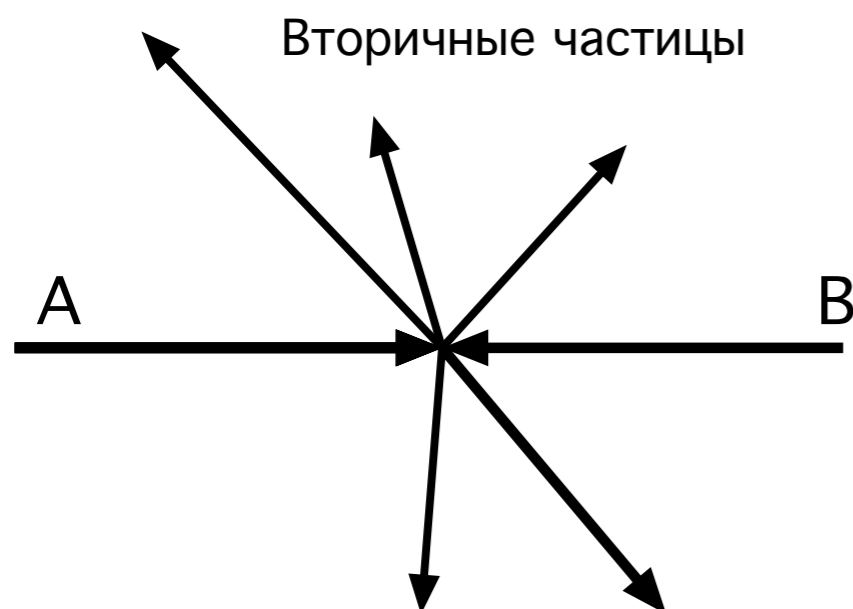
$$t = \gamma \tau$$

Для мюона с энергией 1 ТэВ

$$t = 0.02 \text{ с}$$

Элементарное физическое событие - акт взаимодействия двух частиц

Встречные пучки



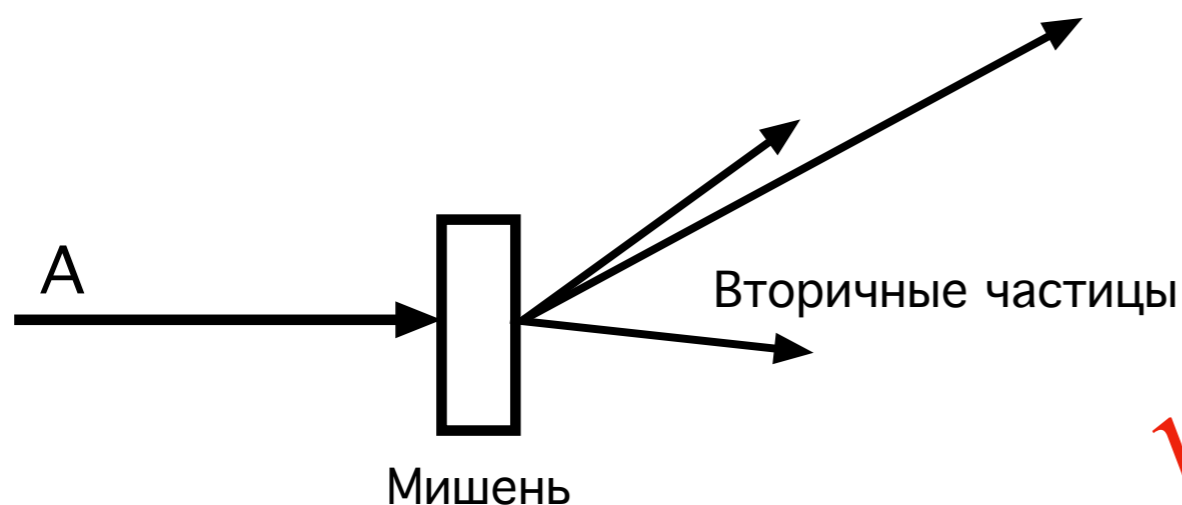
E_0 - энергия начальной частицы

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

Для протона на LHC ($E_0 = 7 \text{ TeV}$):

$$2E_0$$

14 ТэВ

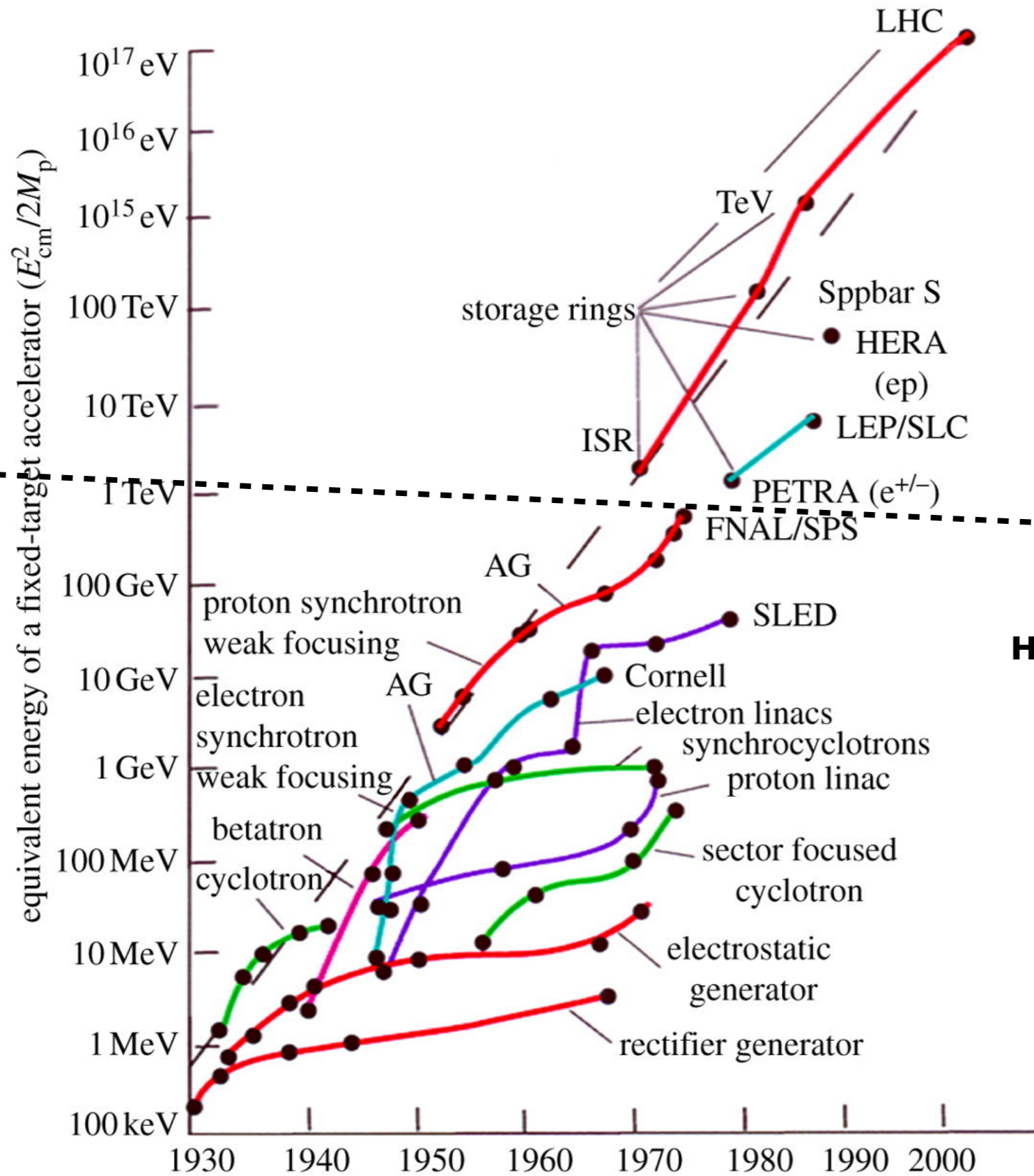


$$\sqrt{2E_0 m}$$

0.115 ТэВ

Неподвижная мишень

А коллайдер точно лучше лучше?



Коллайдеры

Ускорители с
неподвижными мишенями

*Есть вещи, которые на коллайдере
сделать трудно или невозможно.*

Тип взаимодействующих 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

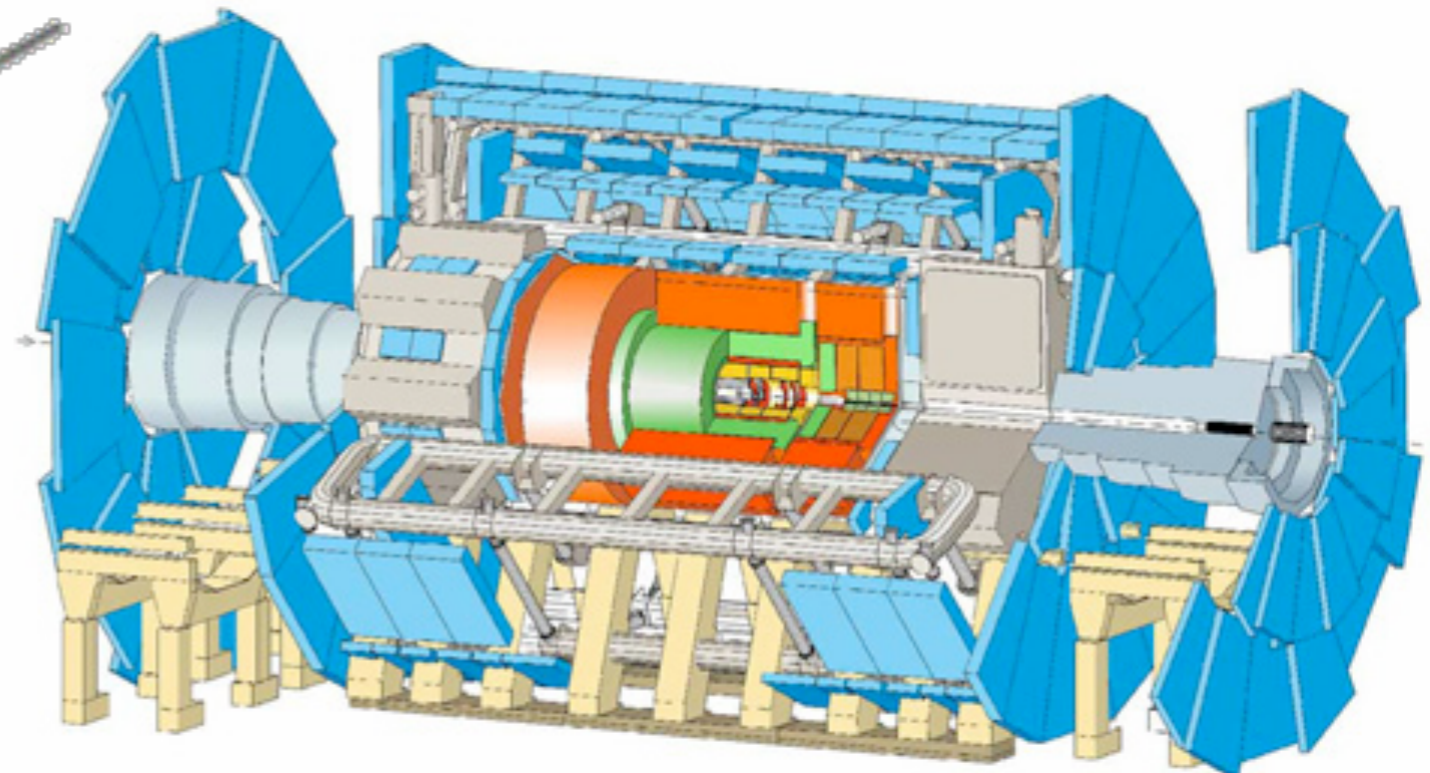
Детектор вытянут в направлении пучка на десятки метров

COMPASS

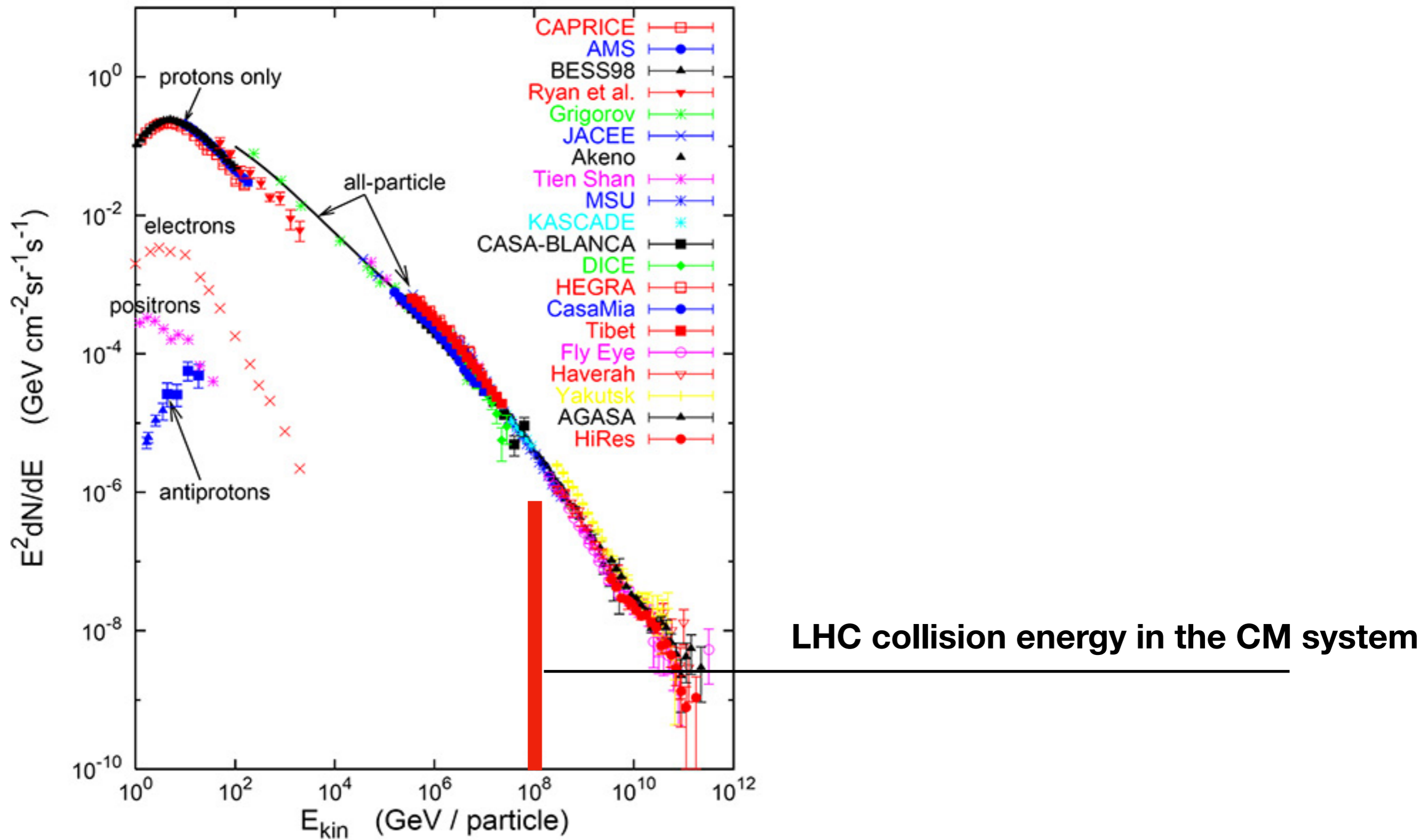


4π геометрия

ATLAS

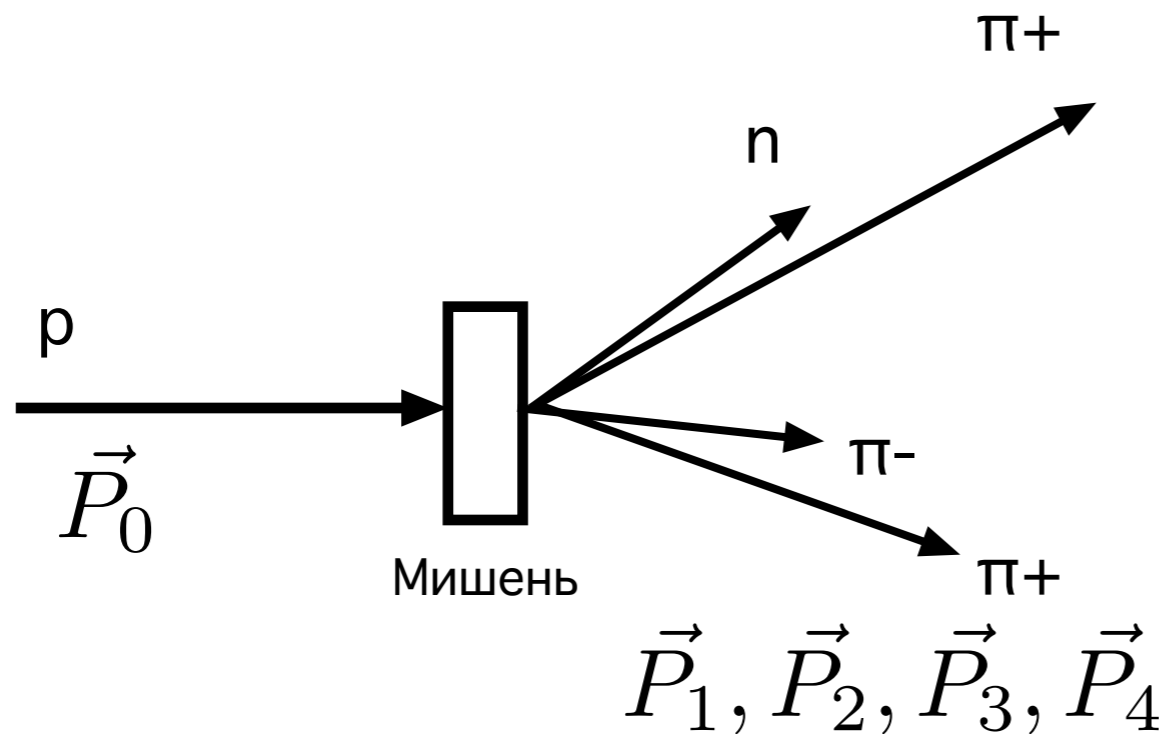


Космические лучи



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

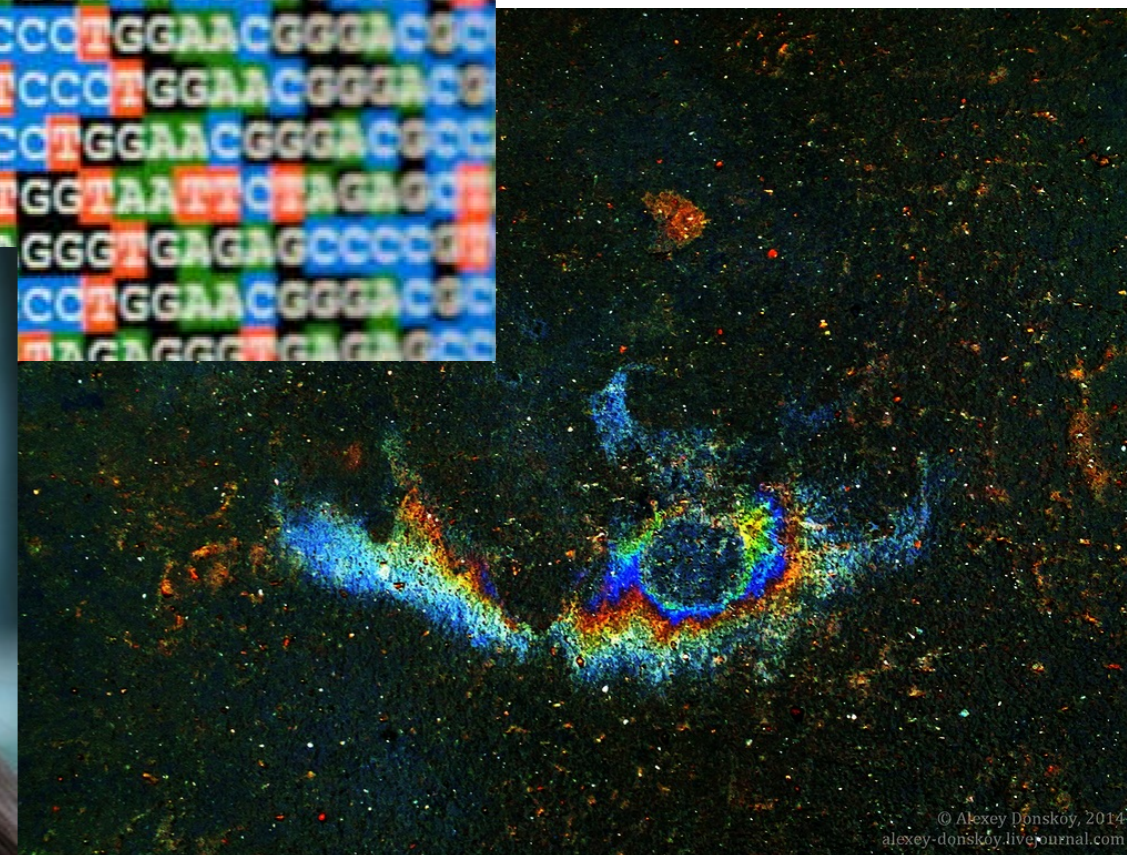
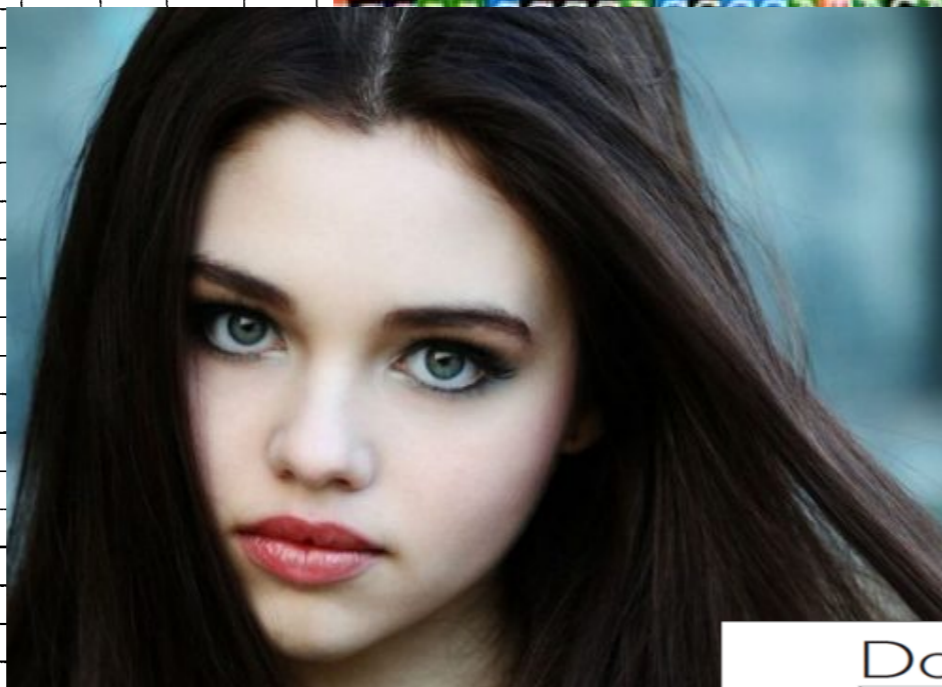
Данные

Согласно Уставу КПСС, Политбюро ЦК КПСС избиралось
руководства работой партии в период между пленумами



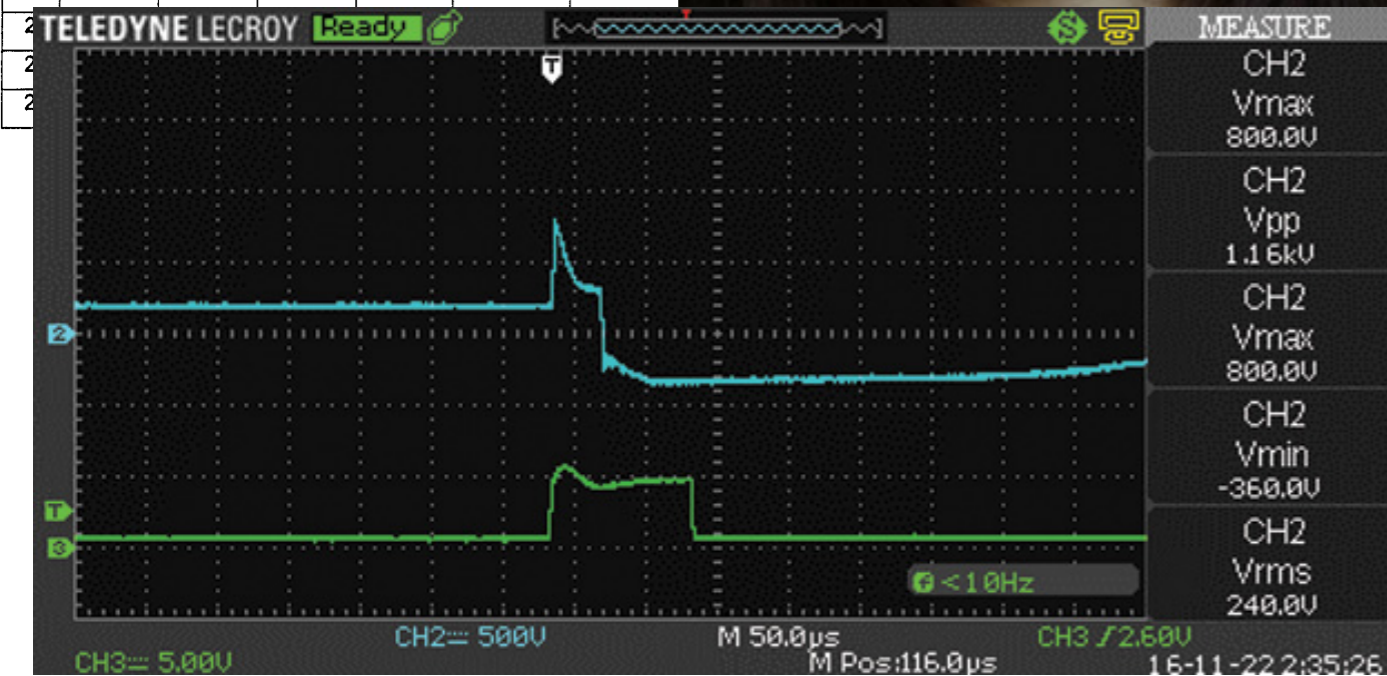
Таблица 1

№ i	Напряжение на n-ом аккумуляторе (U_{a_n})				Напря- жение на АБ U	Среднее напря- жение U_s	Коэффициент состояния n-го аккумулятора $Q_{i,n}$			
	U_{a_1}	U_{a_2}	U_{a_3}	U_{a_4}			$Q_{i,1}$	$Q_{i,2}$	$Q_{i,3}$	$Q_{i,4}$
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				

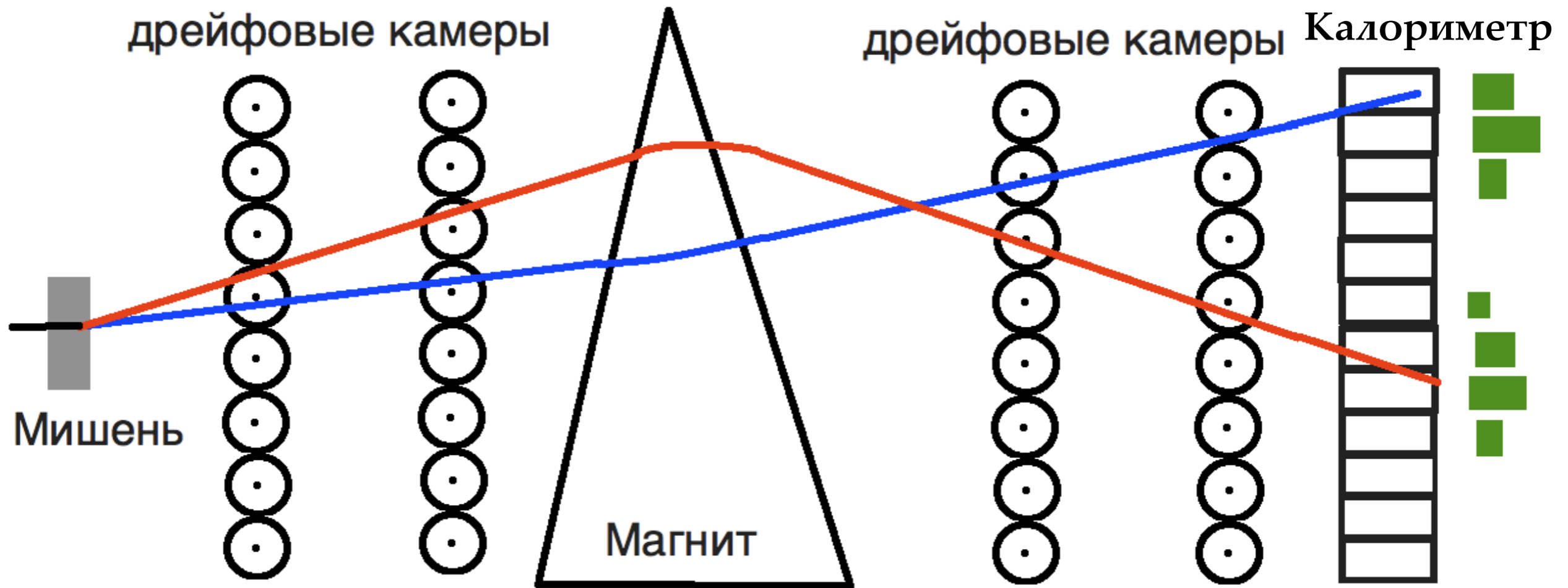


© Alexey Donskoy, 2014
alexey-donskoy.livejournal.com

Dow Jones index



Что содержится в данных, записываемых экспериментальной установкой?



Номера сработавших 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

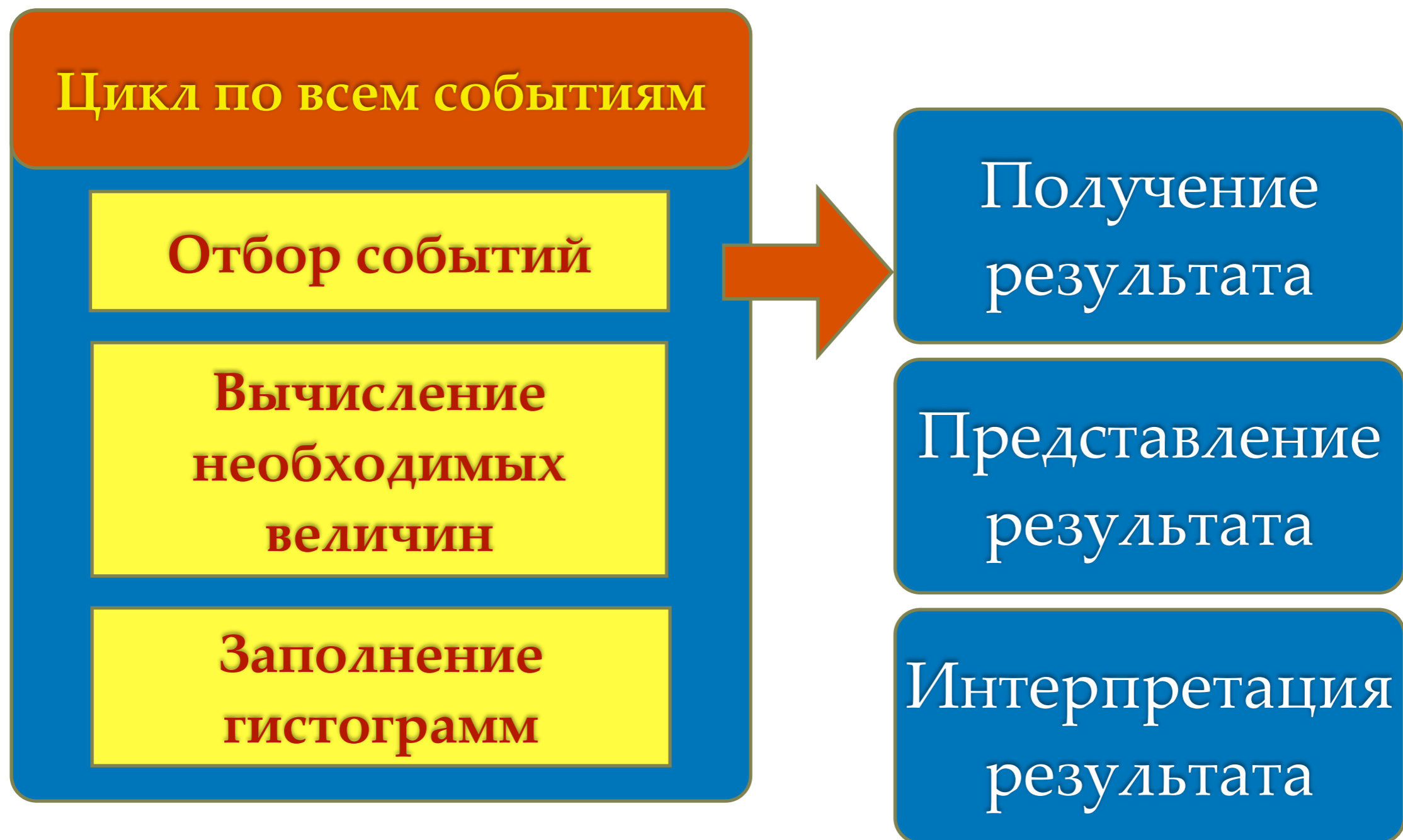
Физические данные
треки, кластеры,
вершины,
идентификация частиц и
Т. Д.

Программа для
физического
анализа

Данные, отобранные
пользователем

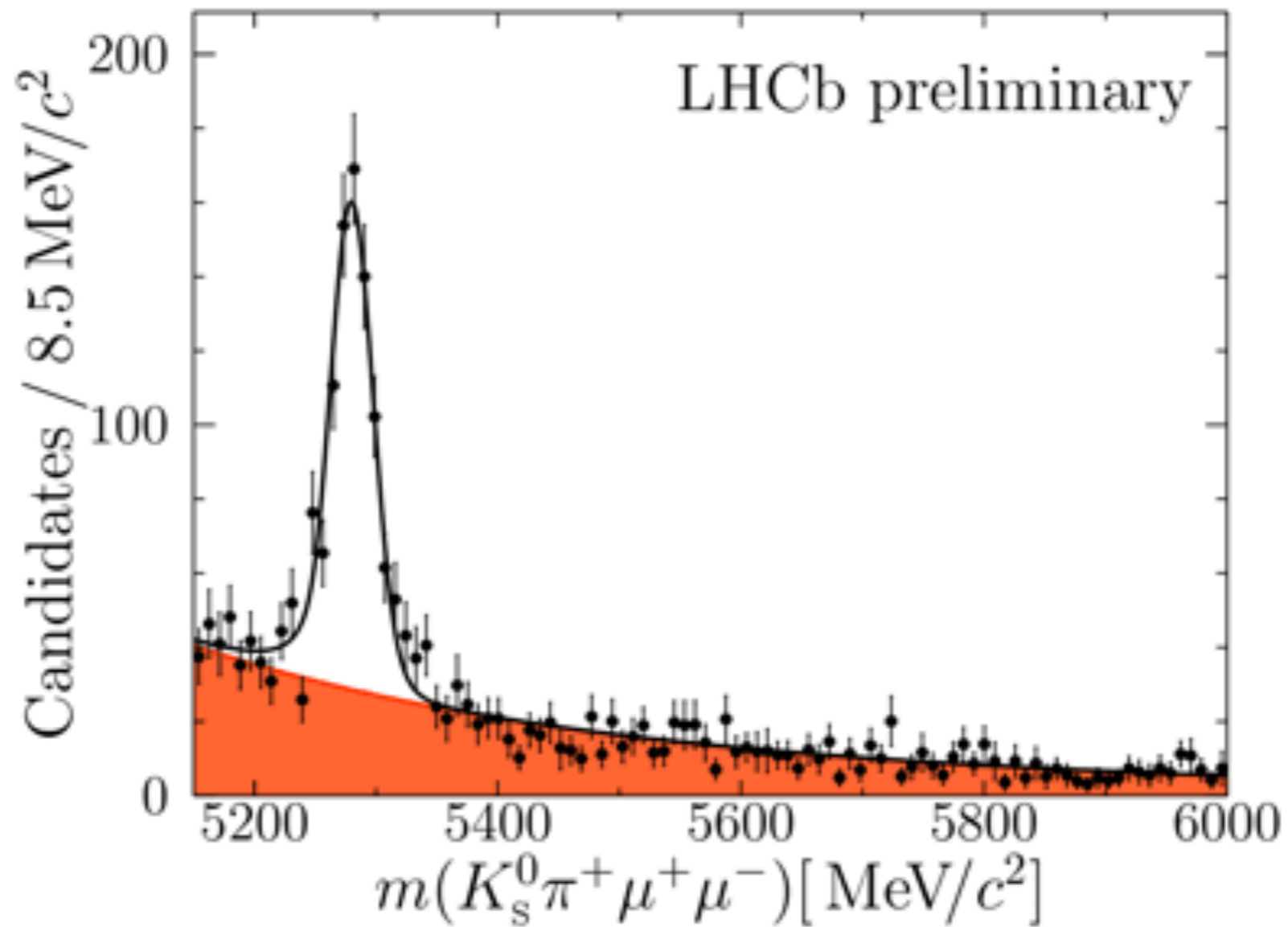
Эвентуальный подход

Любой анализ данных сводится к следующим шагам:



Эвентуальный подход

Любой анализ данных сводится к



Цикл

От

Н

гистограмм

те
та

ние
та

результата



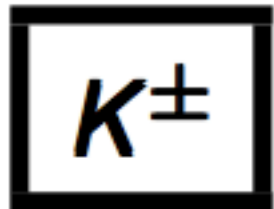
ИДИ В КОЛХОЗ



ВРЕДНУ РАБОЧИМ И КРЕСТЬЯНАМ ТОТ,
КТО РАСПРОДАЕТ И РЕЖЕТ СКОТ

ДА ДИМ КУЛАКУ ДРУЖНЫМ ОТПОР
ОРГАНИЗУЕМ КОЛЛЕКТИВНЫМ СКОТНЫМ ДВОР

Что есть результат измерения?



$$\text{Mass } m = 493.677 \pm 0.016 \text{ MeV}$$

$$\text{Mean life } \tau = (1.2380 \pm 0.0021) \times 10^{-8} \text{ s}$$

Charge Radius

$$\langle r \rangle = 0.560 \pm 0.031 \text{ fm}$$

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

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

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e \quad (4.09 \pm 0.10) \times 10^{-5}$$

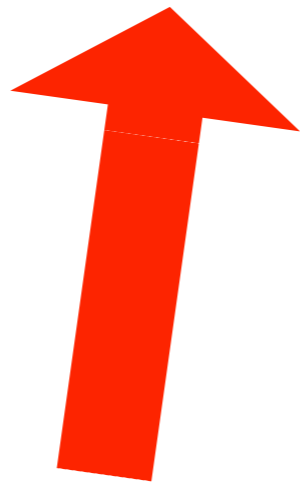
$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu \quad (1.4 \pm 0.9) \times 10^{-5}$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e \quad < 3.5 \times 10^{-6} \text{ CL}=90\%$$

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

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

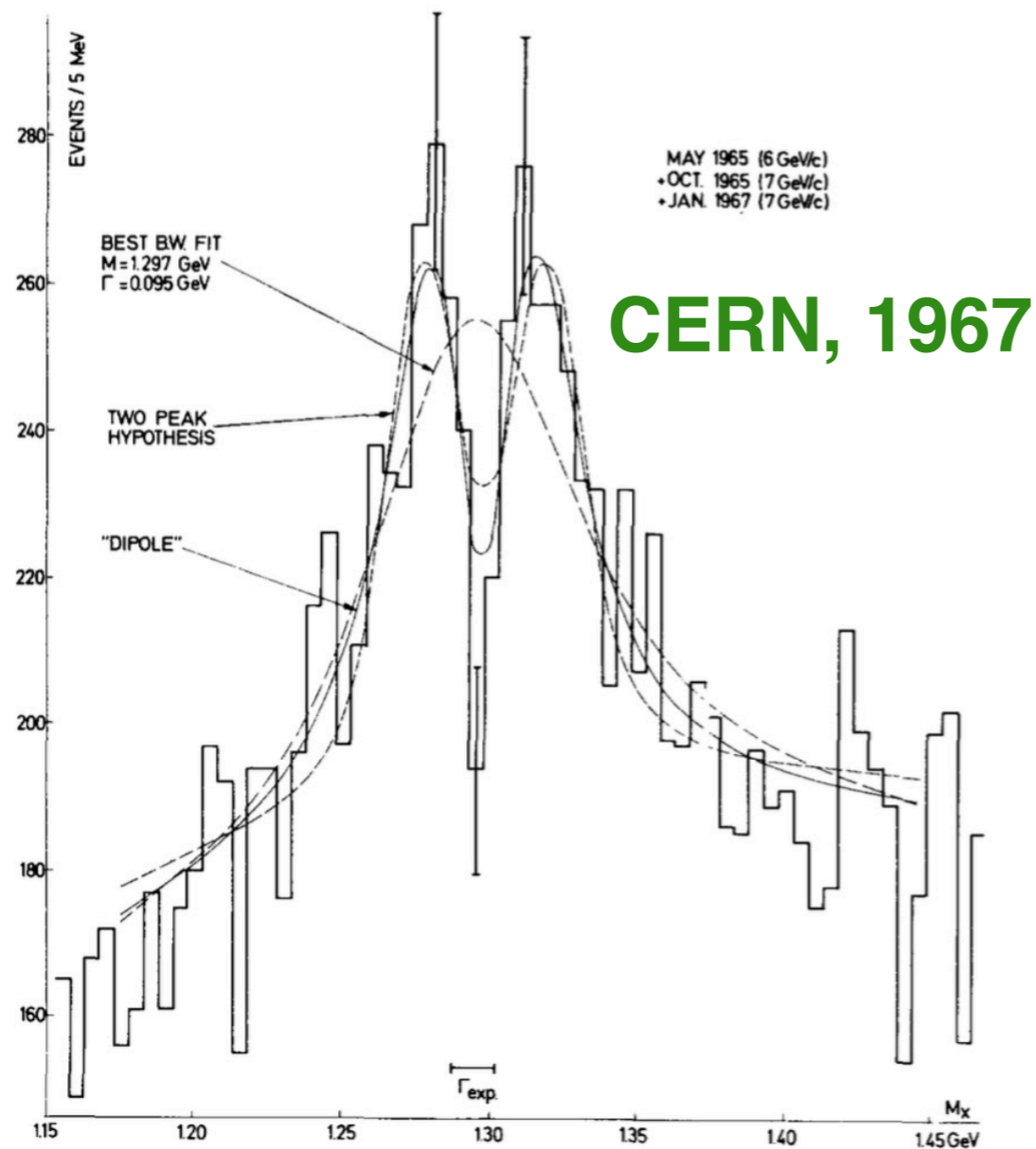


$$\sigma_{stat} \sim 1/\sqrt{N}$$

***Чем физик отличается от
инженера?***

В физическом эксперименте нет места человеческому фактору?

Расщепление $a_2(1320)$ мезона



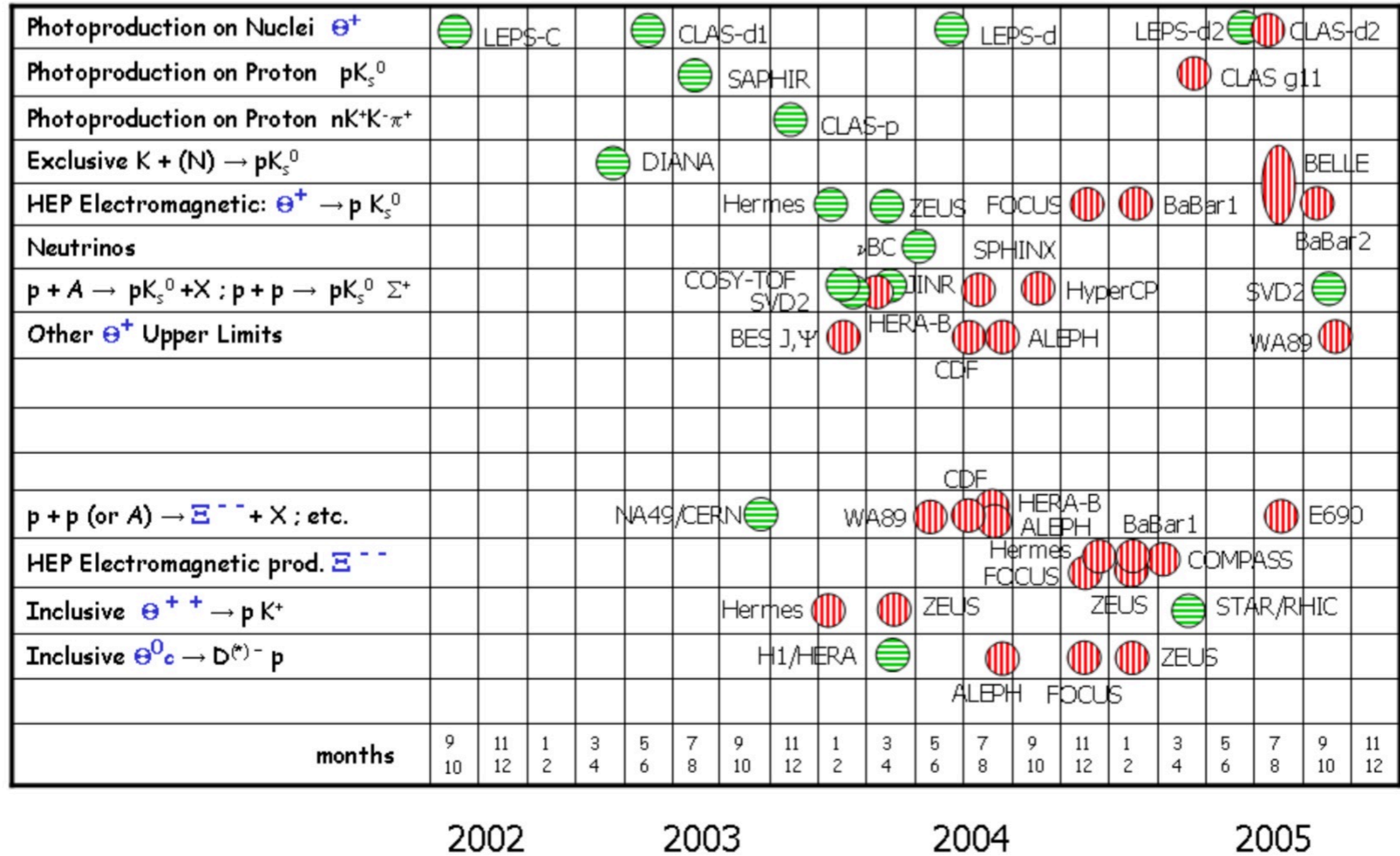
Не одна частица
а две разных?!

Несколько других
экспериментальных групп
подтвердили наблюдение

Однако, при дальнейшем
наборе статистики
эффект исчез.

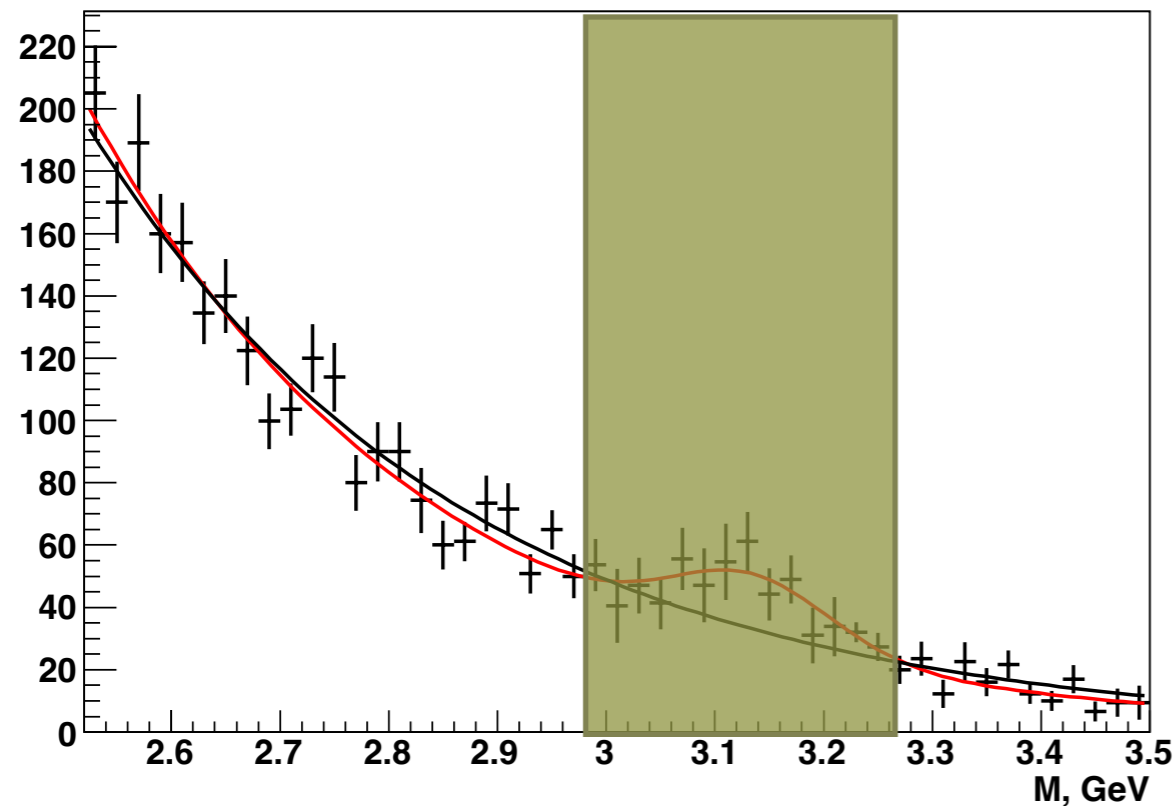
**Wandwagon effect - эффект присоединения к
большинству**

“Открытие” пентакварков в начале 2000х



Вандвагон эффект
- эффект присоединения к большинству

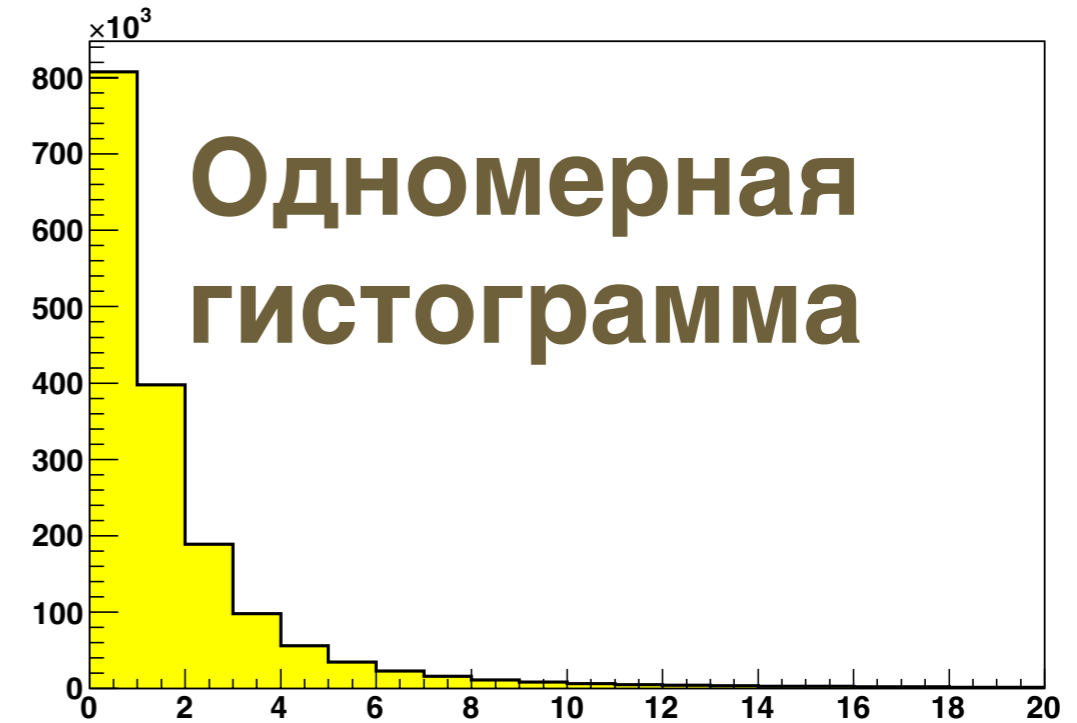
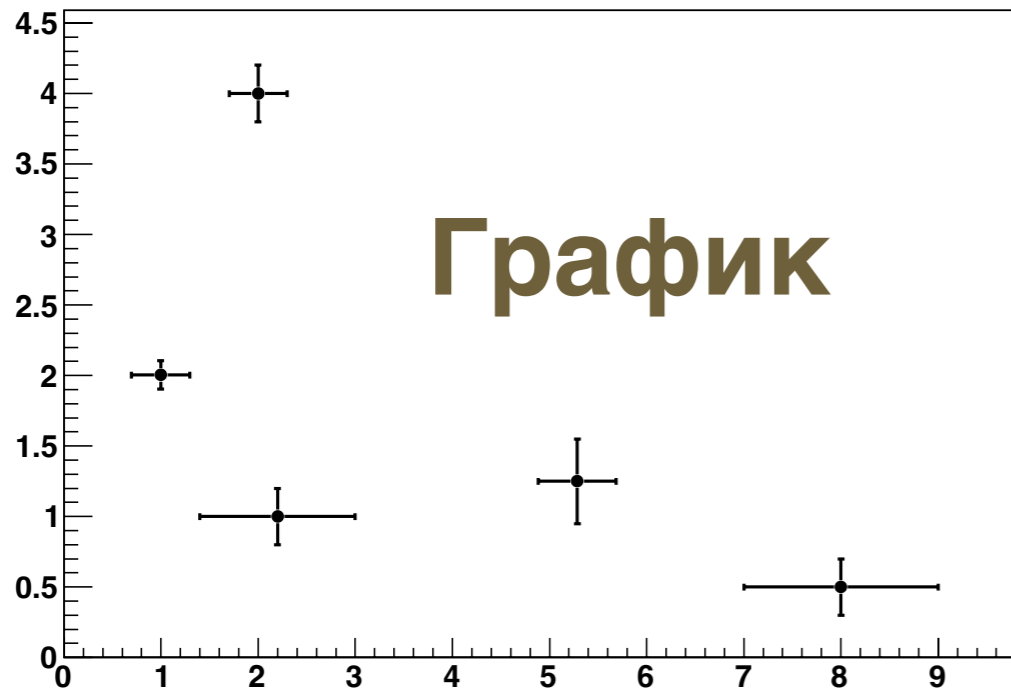
“Слепой” анализ



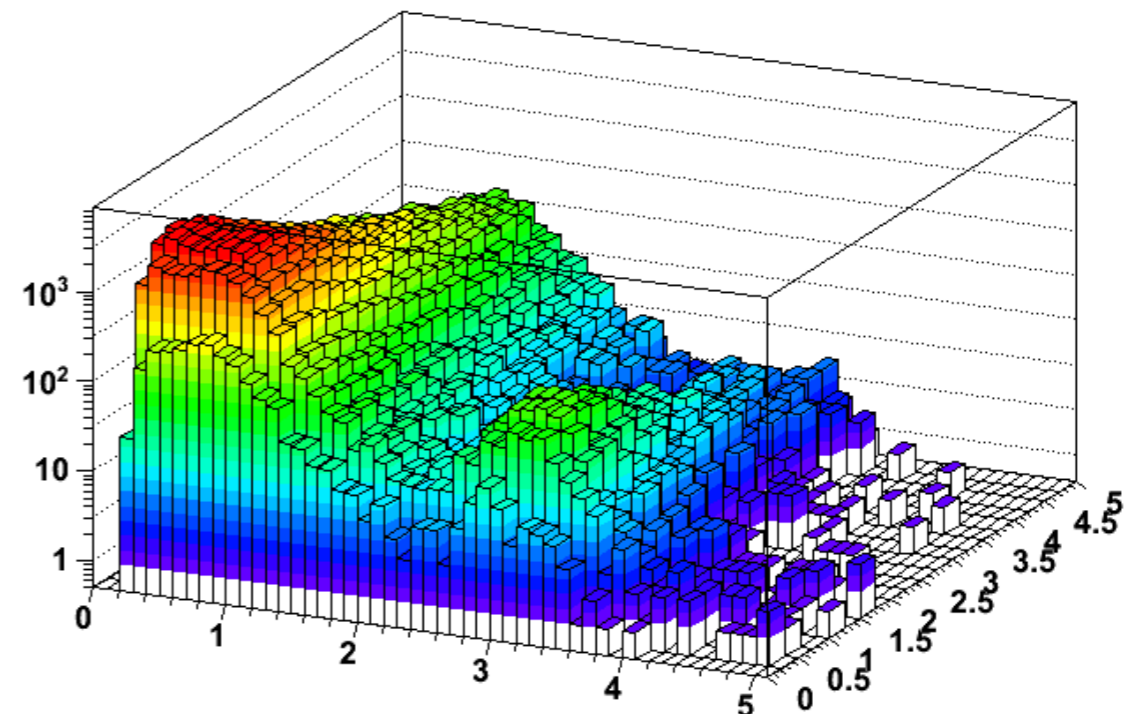
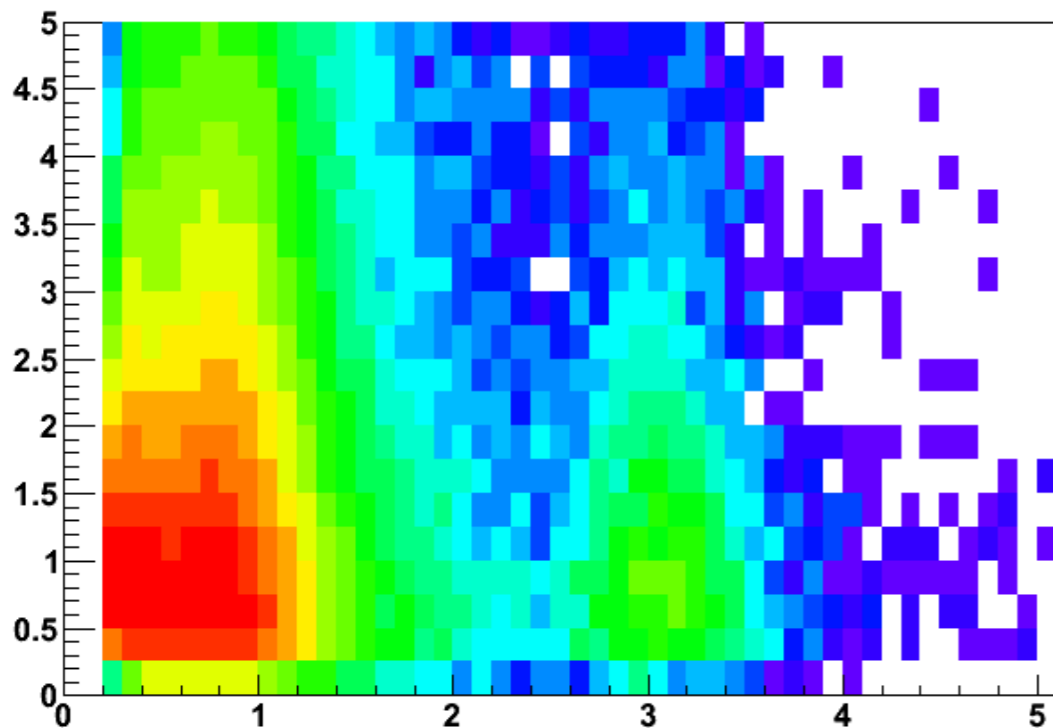
В случае поиска редких событий или слабого сигнала для устранения “психологических” эффектов иногда используют следующий подход:

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

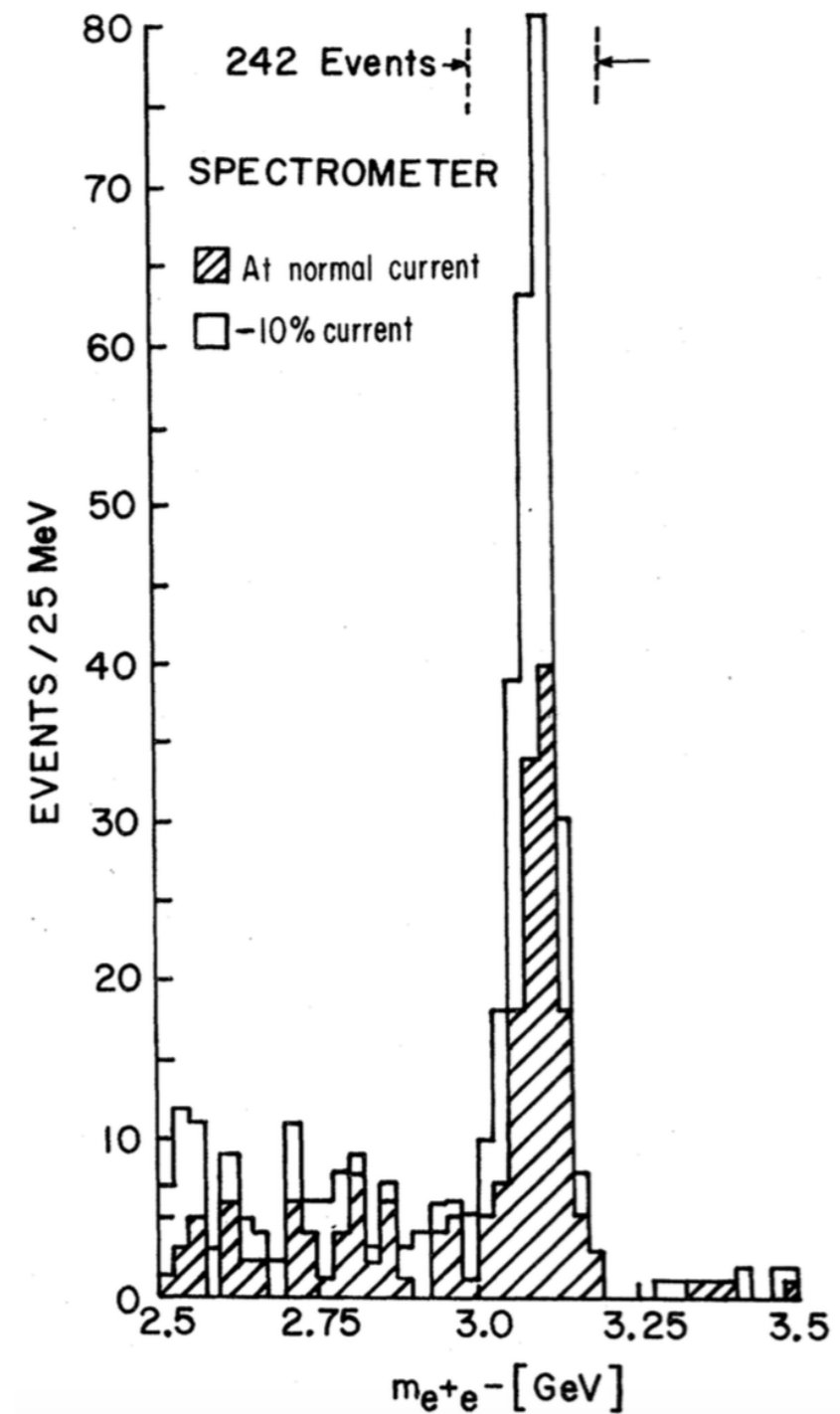
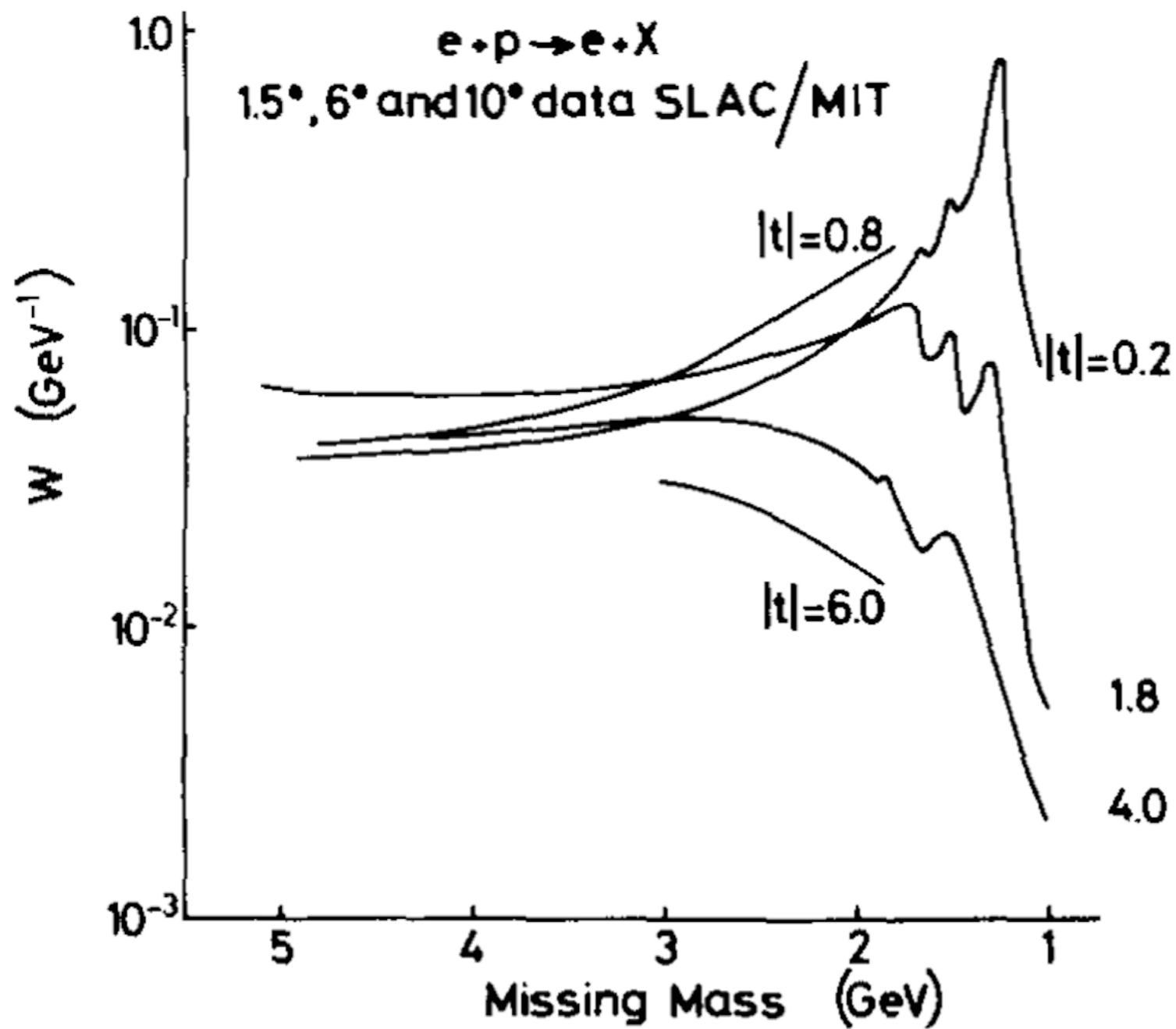
~1980 CERN: **HTV – Interactive Histogramming and Visualisation** - одна из первых интерактивных систем, позволяющих представить в наглядном графическом виде результаты анализа

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/>.

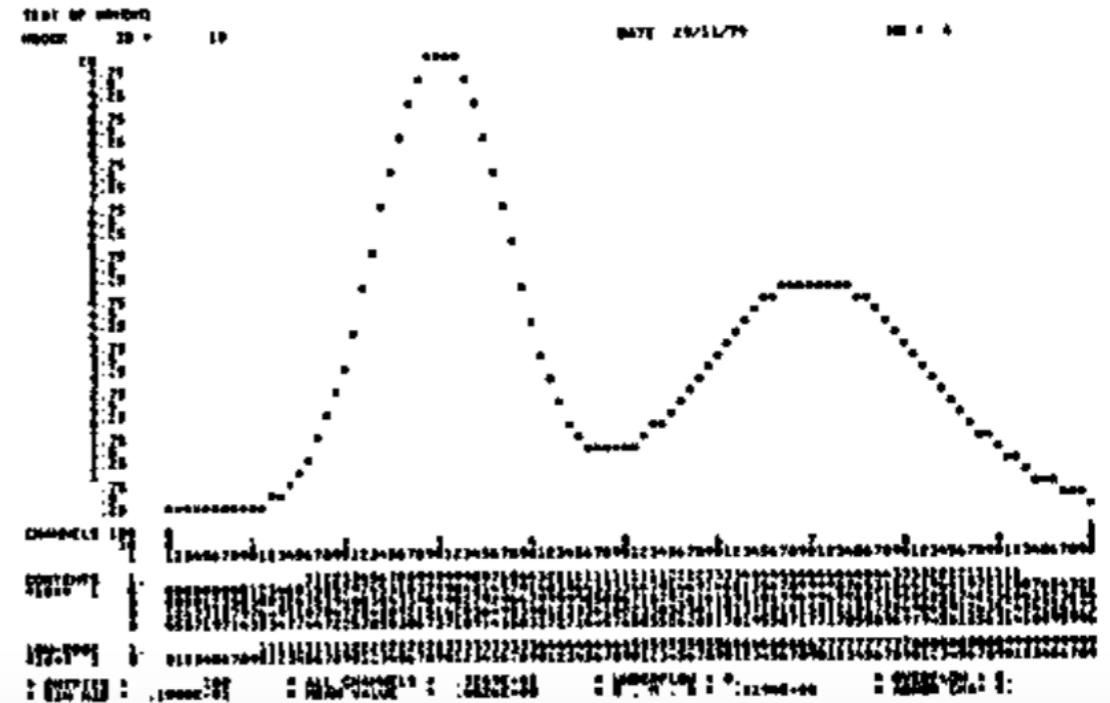
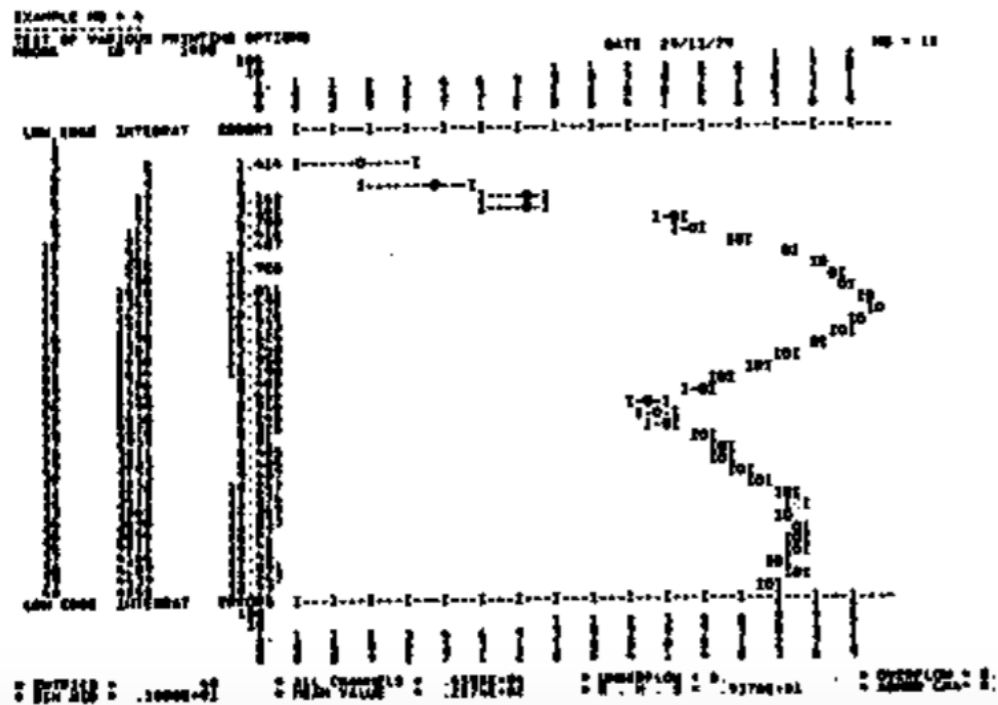
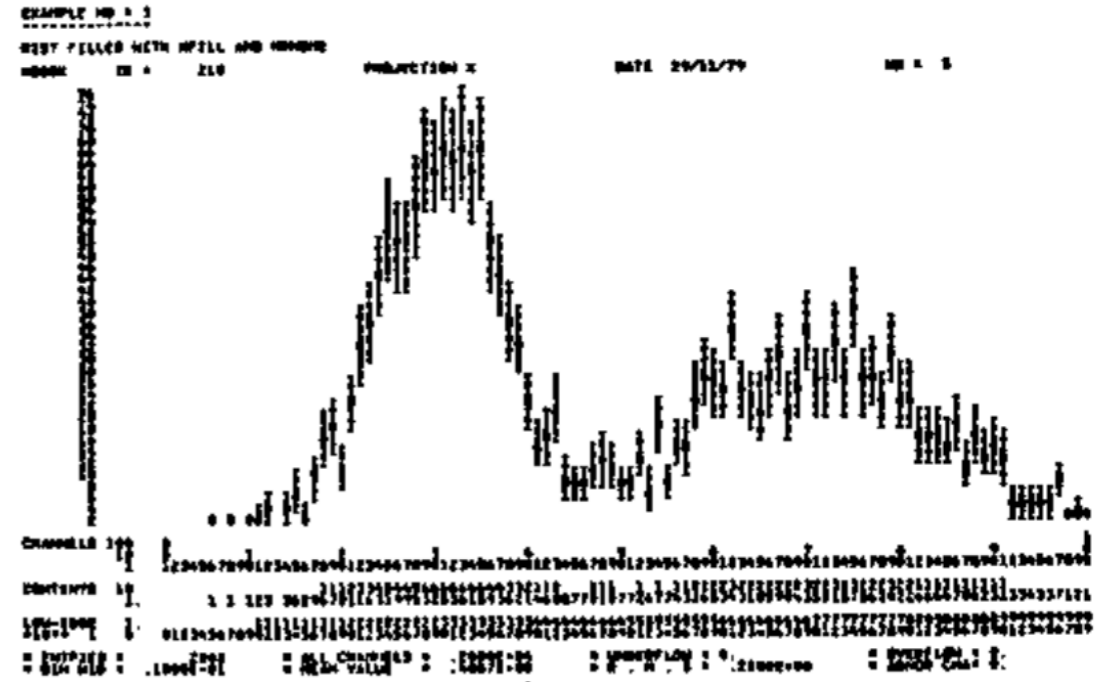
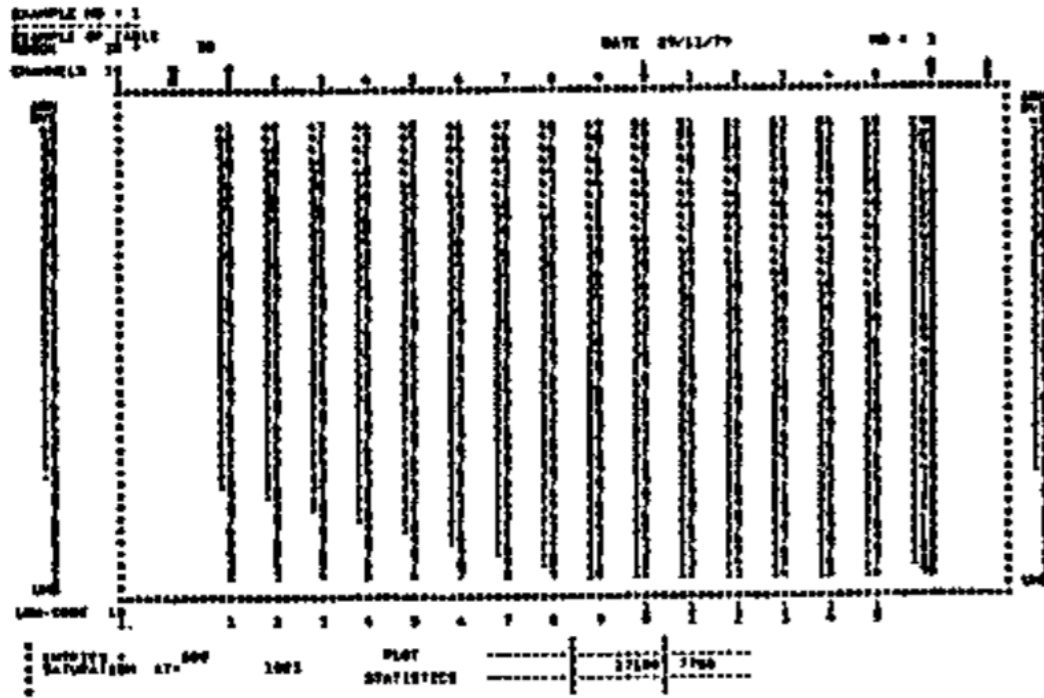
PAW++ - с расширенным графическим интерфейсом

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

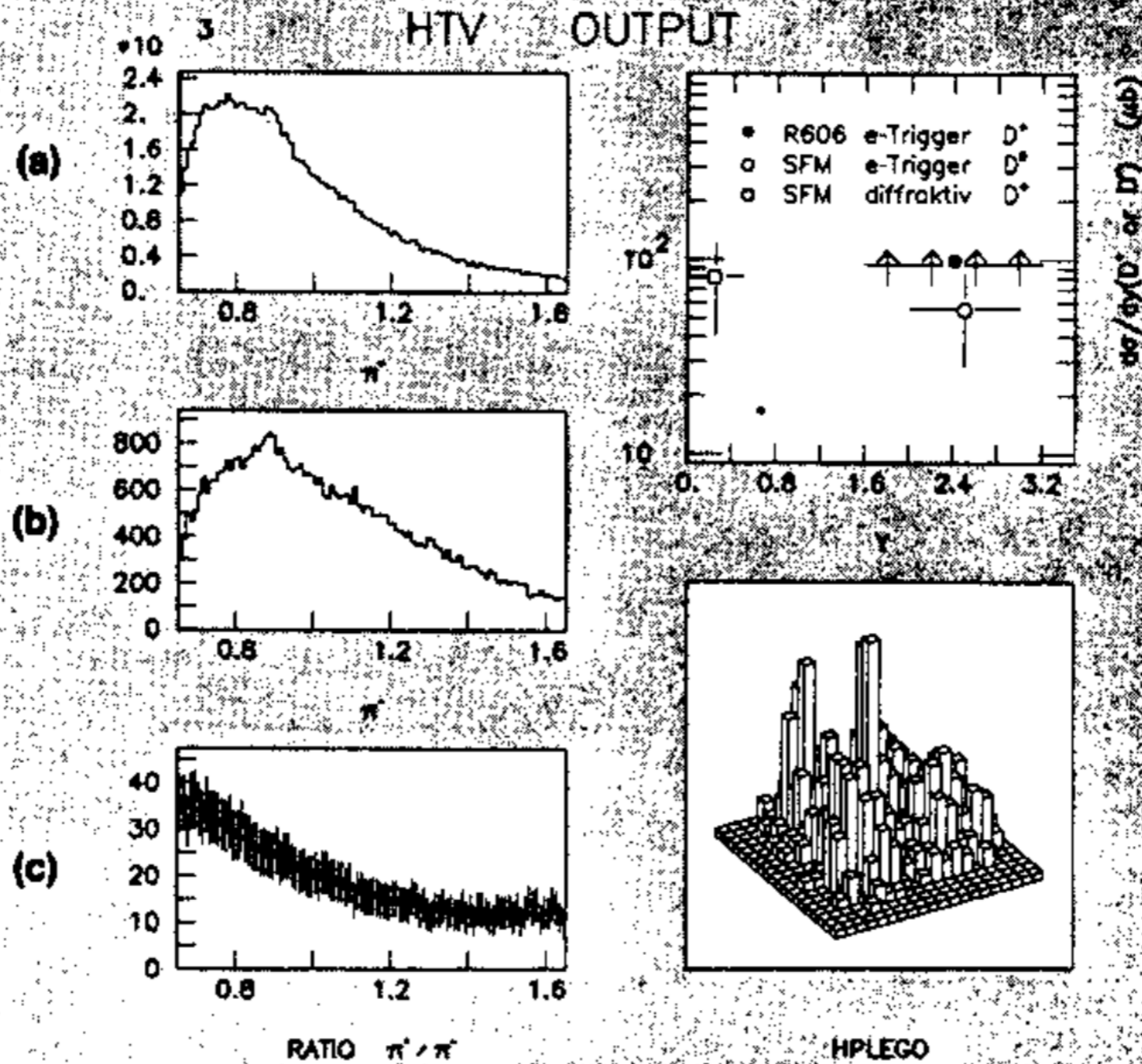
Докомпьютерная эпоха



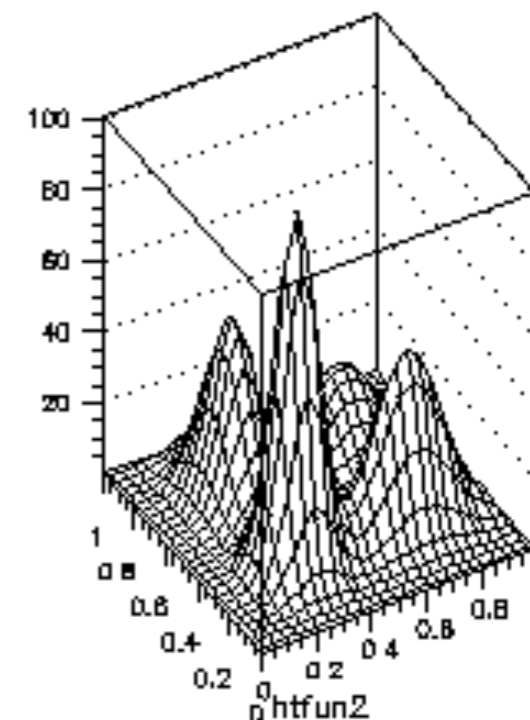
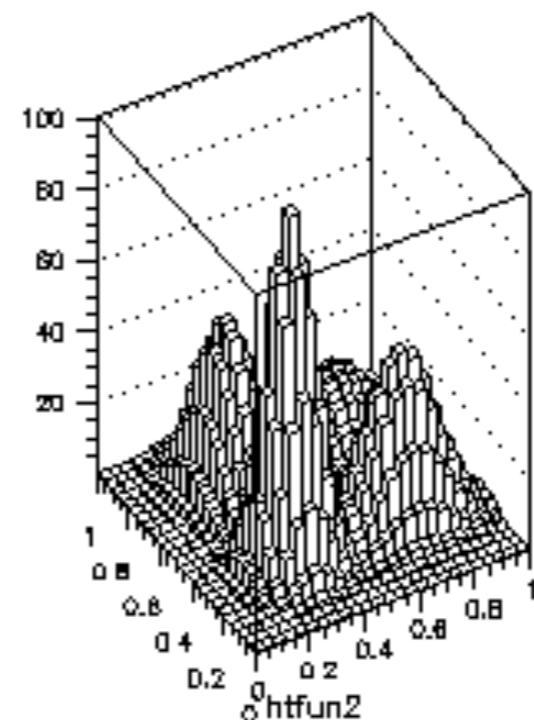
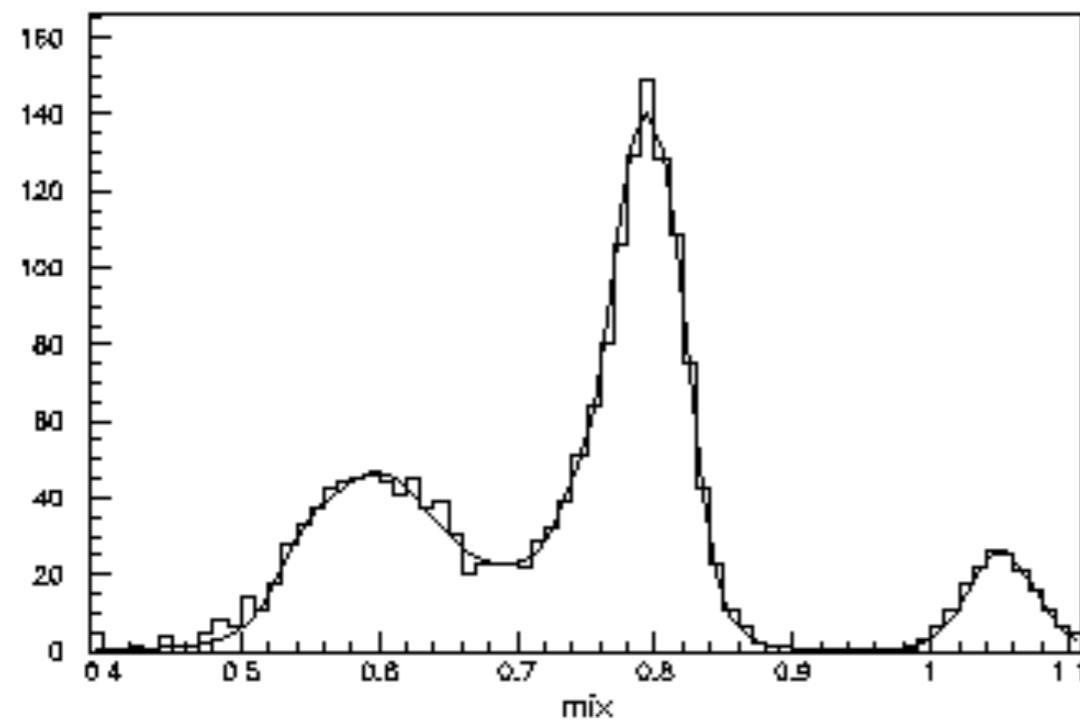
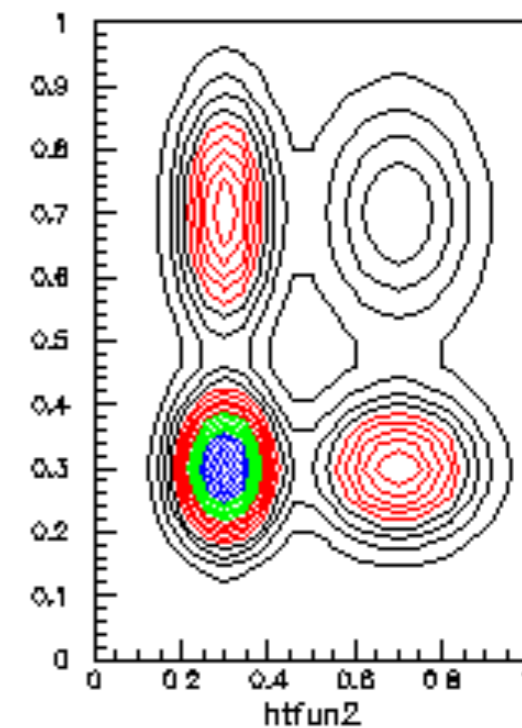
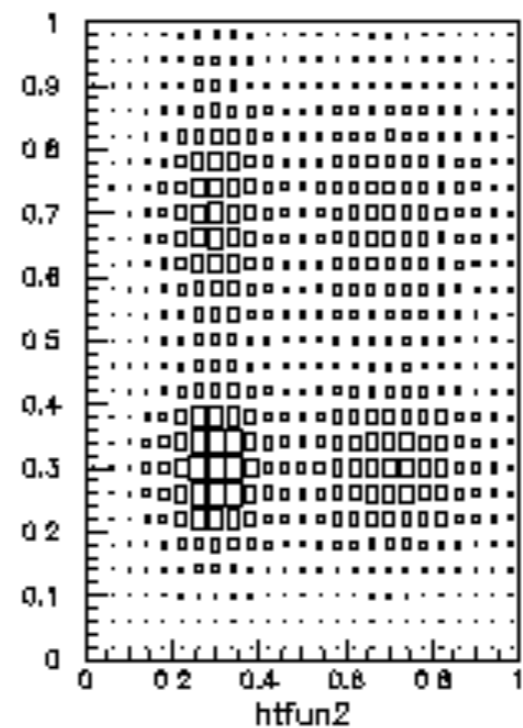
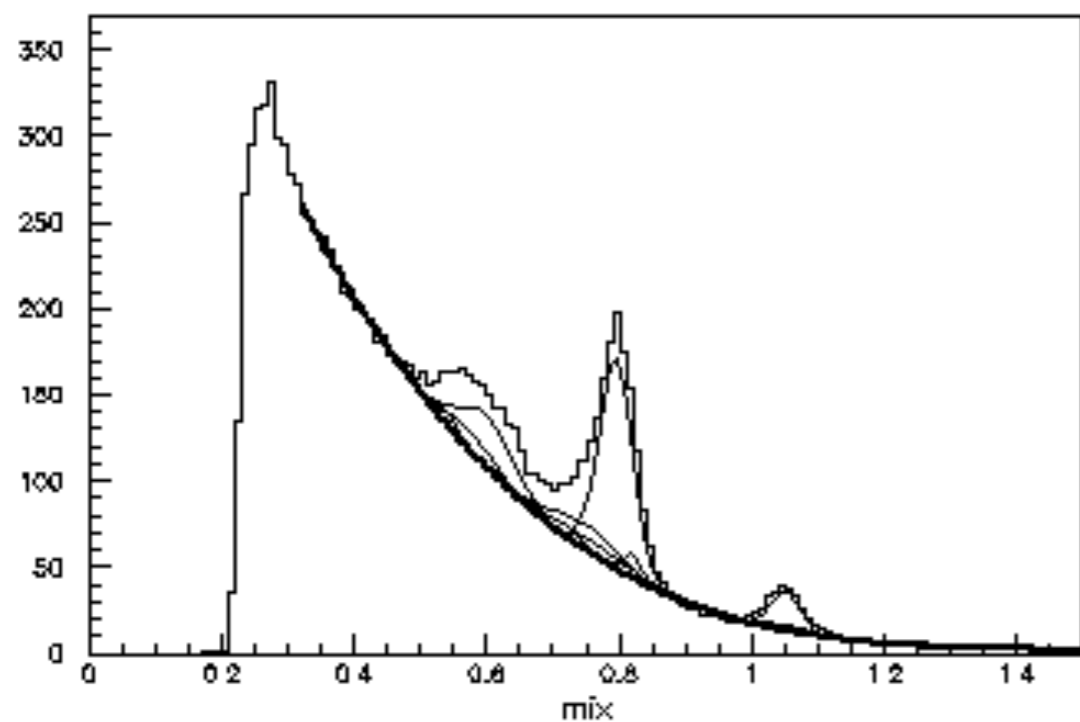
Конец 70х



HTV



PAW



PAW++

Paw++ Executive Window

File Edit View Options Help

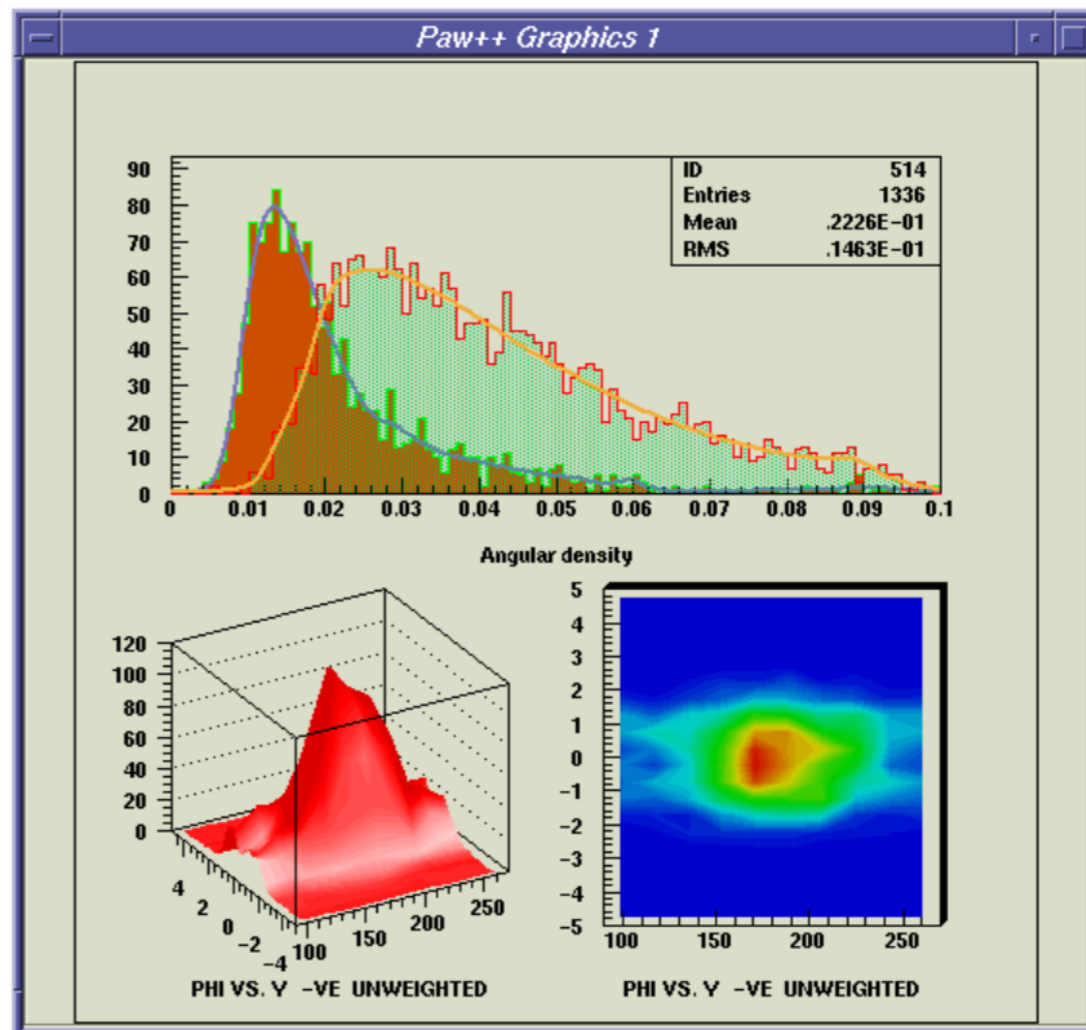
Transcript Pad H

```

*
*****
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++ Main Browser

File View Options Commands Help

Path: //LUN1

Directory: 17 1d-Histogram: 14 2d-Histogram: 24 Ntuple: 1

Commands	PHI	PI0N	R0	STAFF
Files				
Macro	NICE	NEUT2N	SABLE	LORENTZ
Zebra				
Hbook	ZEN	10	1d-Histogram 10	30
Chains			Plot	
PAWC	1	11	Fit...	
LUN1			Fit Gauss	
	12	-2	Fit Exp	
			Fit Const	
			Fit Linear	
			Smooth	
			Smooth...	
			Copy	
			Reset	
			Delete	

File: pawdemo.hbook
10: TEST1

Clone

Histogram Style Panel

File Options

Current Style: Default

Plot Info

- Statistics...
- Fits...
- File Name...
- Date

Style

Object Attributes... General Attributes...

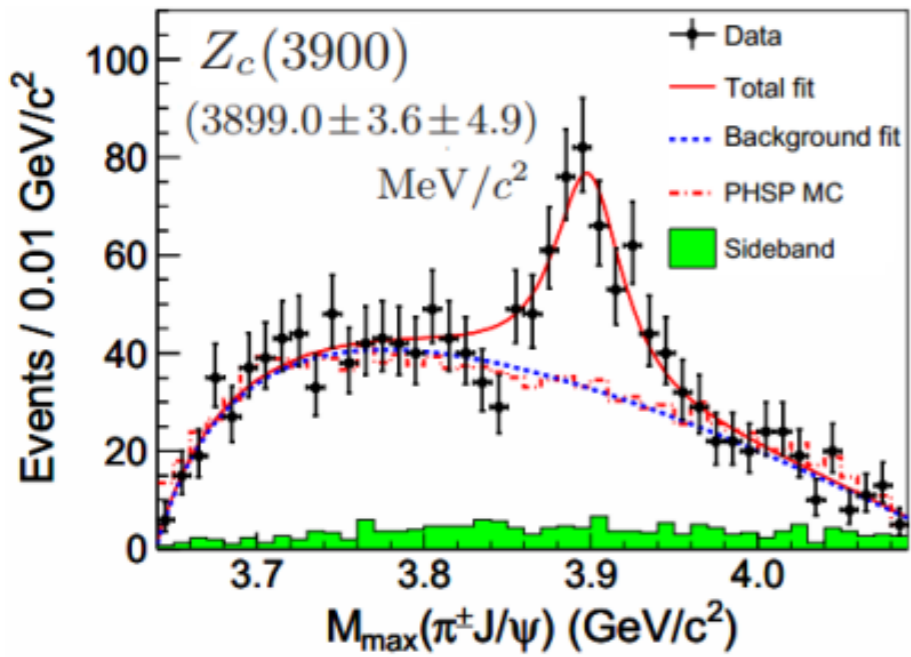
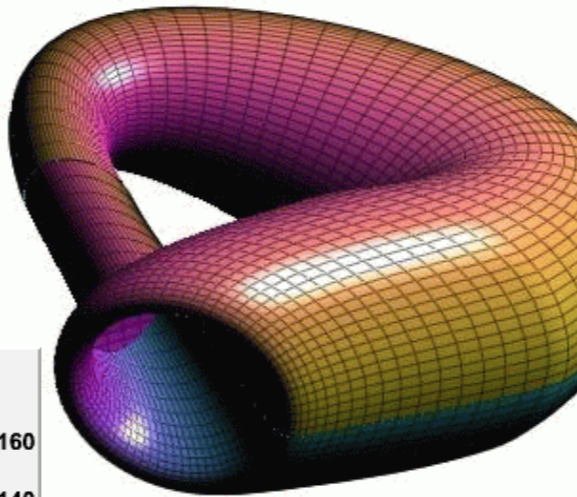
Viewing Angles... Geometry... Zones...

Axis Scaling... Axis Settings... Font...

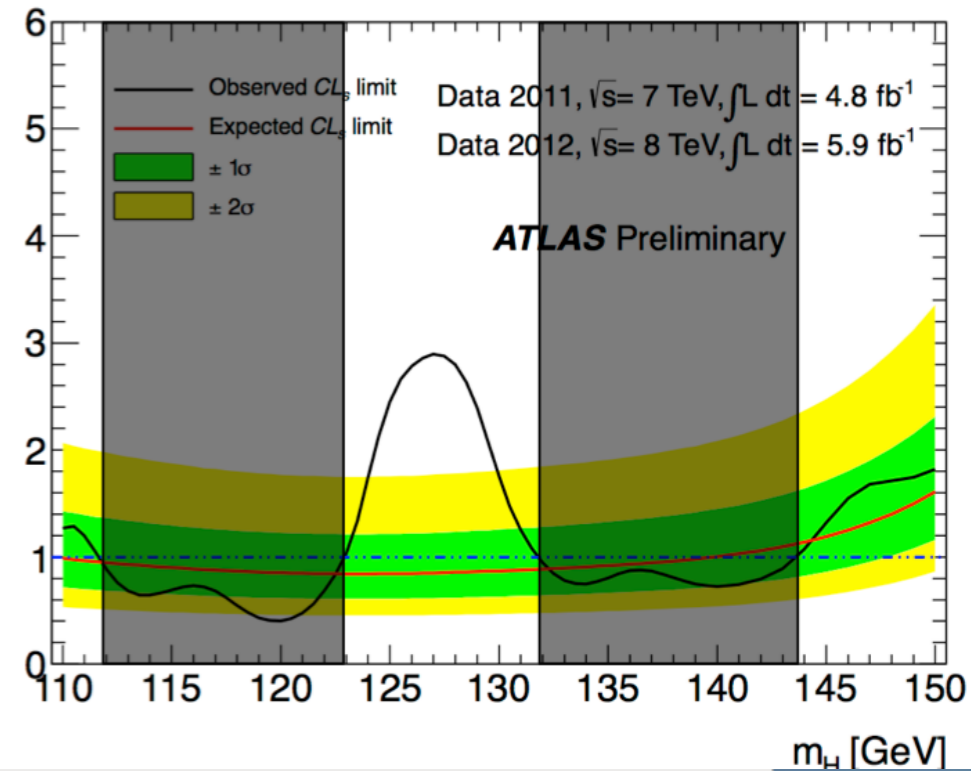
Plot Options: Default Cartesian

Plot

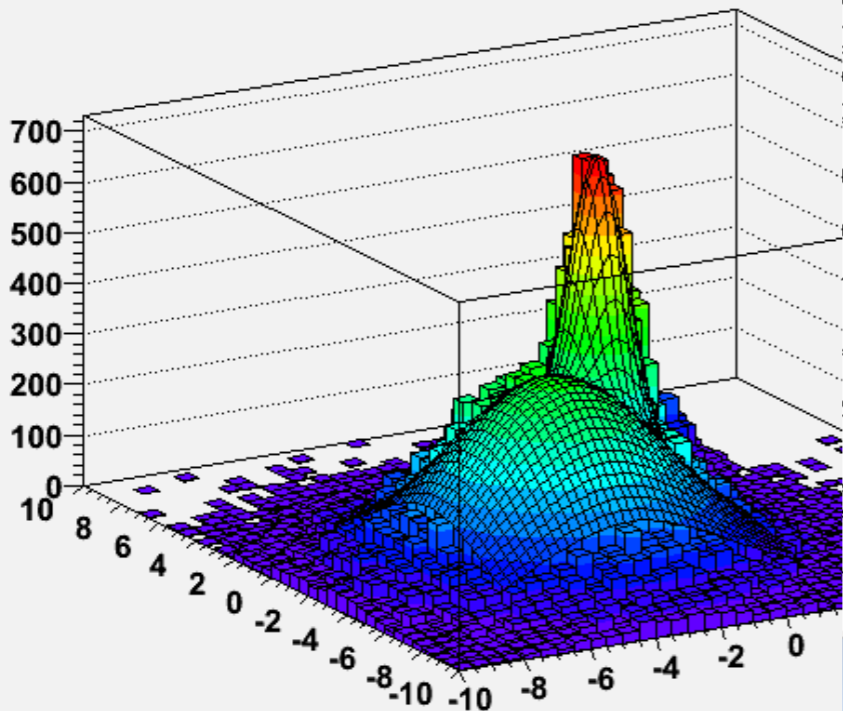
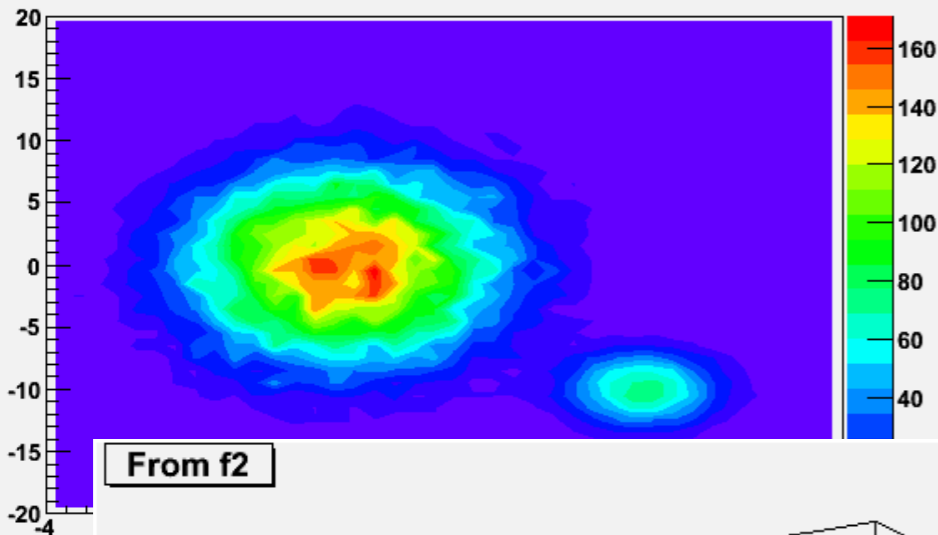
ROOT



95% CL limit on $\sigma/\sigma_{\text{SM}}$



Option CONT4Z example



ROOT Object Browser

Browser File Edit View Options Tools Help

Files

- 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

Canvas_1 Editor 1

N

htemp	
Entries	5782
Mean	68.01
RMS	32.49

Command
Command (local):

Filter: All Files (*.*)

ROOT - стандартный пакет обработки данных в физике частиц

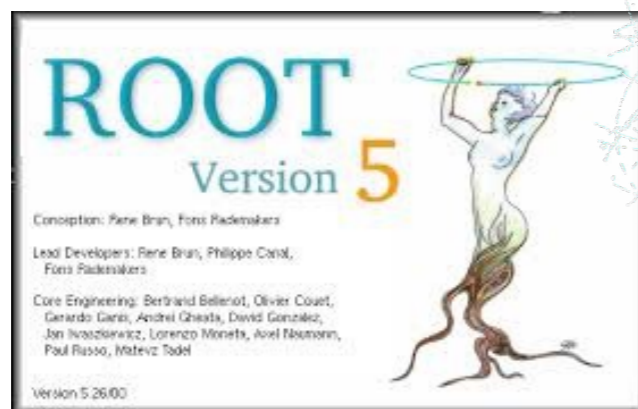
- Интерпретатор C++
- Обширная библиотека классов C++
- Объектно-ориентированный формат хранения данных



<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



6.26

ROOT 7
В разработке

Моделирование в физике частиц

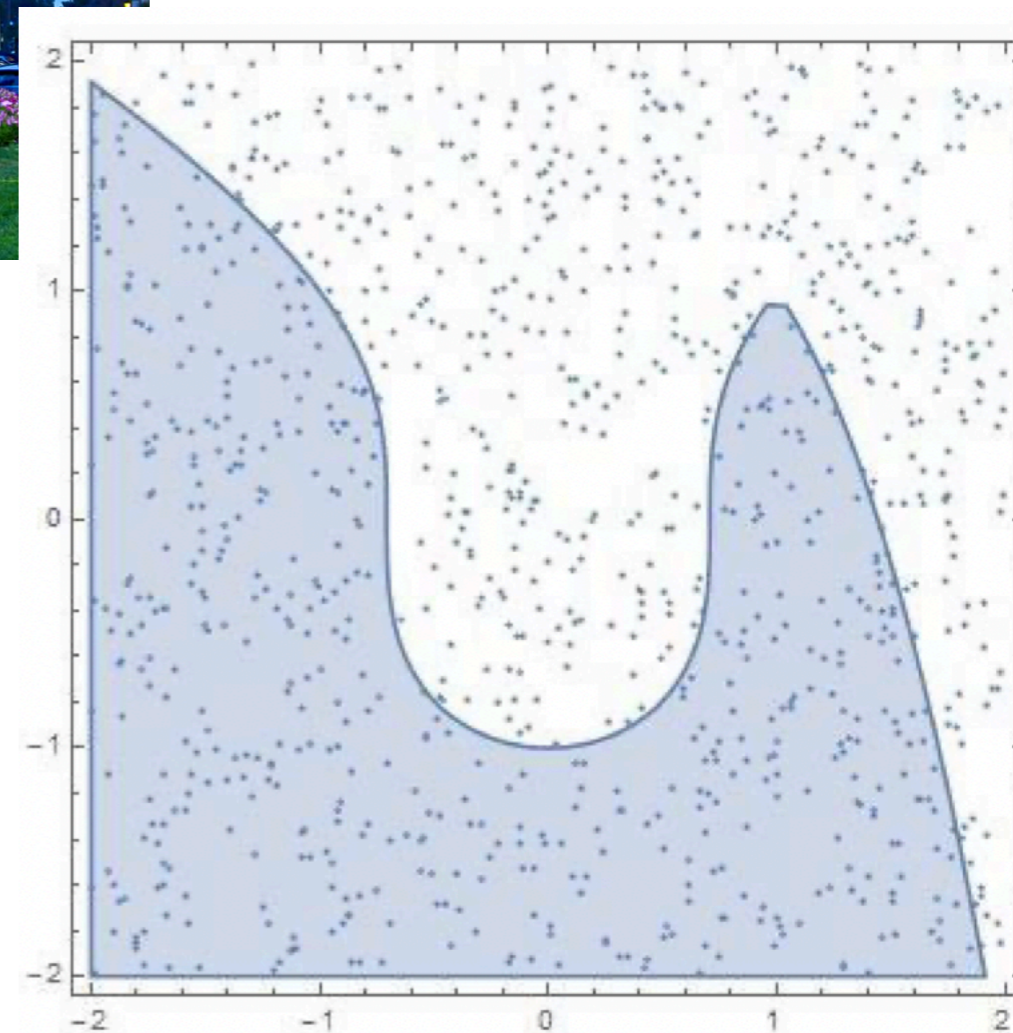
- **Мы хотим знать, что и как часто рождается в том или ином взаимодействии**
- **Мы хотим знать, куда полетят родившиеся частицы и какие импульсы они будут иметь**
- **Мы хотим знать, как они будут взаимодействовать с нашей установкой (геометрический аксептанс, разрешение, эффективность регистрации,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

Detector Simulation

- Hardware
- Software

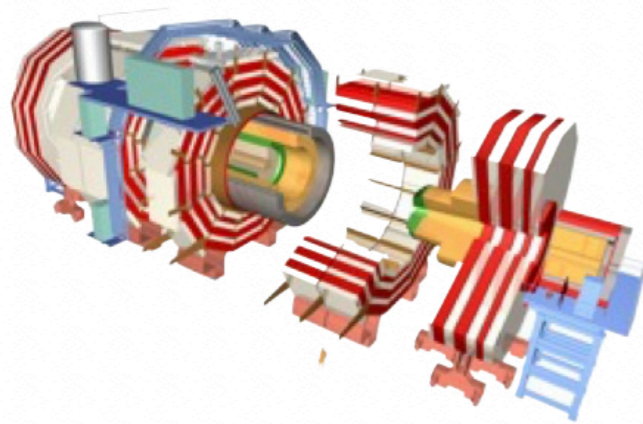
Simulation Digitization Triggering

Offline software
- Event selection

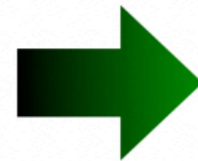
Reconstruction Analysis



Results Improvement



Experiment Triggering



Наша Библия, Тора, Коран и Камасутра

The screenshot shows a web browser window with the URL `pdg.lbl.gov`. The page features the PDG logo (particle data group) and a navigation menu with links for 'About PDG', 'PDG Authors', 'PDG Citation', 'News', and 'Contact Us'. The main heading is 'The Review of Particle Physics (2020)' by P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), published in *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 083C01 (2020). A sidebar on the right contains a vertical list of links: 'pdgLive - Interactive Listings', 'Summary Tables', 'Reviews, Tables, Plots', 'Particle Listings', and a 'Search' input field. Below this, there are buttons for 'ORDER: Book & Booklet', 'Mobile Particle Physics Booklet', and 'DOWNLOAD: Book, Booklet, more'. At the bottom, a table lists various resources, and a 'PDG Outreach' section includes links for 'CPEP Charts' and 'History book'.


pdg.lbl.gov

PDG
particle data group

About PDG | PDG Authors | PDG Citation | News | Contact Us

The Review of Particle Physics (2020)

P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 083C01 (2020).



- pdgLive - Interactive Listings
- Summary Tables
- Reviews, Tables, Plots
- Particle Listings
- Search

ORDER: Book & Booklet

Mobile Particle Physics Booklet

DOWNLOAD: Book, Booklet, more

Previous Editions (& Errata) 1957-2019	Physical Constants
Errata in current edition	Astrophysical Constants
Figures in reviews	Atomic & Nuclear Properties
Mirror Sites	Astrophysics & Cosmology

PDG Outreach

- CPEP Charts
- History book

<https://pdg.lbl.gov>

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

Leptons (e , μ , τ , ... 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 \(new\)](#)