

# Въведение във физиката на елементарните частици

## П. Яйджиев, ИЯИЯЕ - БАН

A small fraction of the CMS  
Collaboration: June 2012



*П. Яйджиев – ИЯИЯЕ – БАН, Програма Български Учители - ЦЕРН 4.10 – 9.10.2015*

## **1. Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частиици**

**1.1 Симетрията като обединяващ принцип**

**1.2 Сили на взаимодействие и симетрии**

**1.3 Спонтанно нарушение на симетриите**

## **2. Отворени въпроси пред Стандартния Модел**

*Как се определят масите на е.ч.?*

*Защо имаме 3 генерации на е.ч. и как ароматите на кварките и неутрината се смесват?*

*Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?*

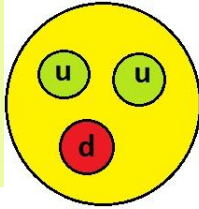
*От какво е съставена “тъмната материя” и “тъмната енергия” във Вселената?*

*Съществуват ли други видове симетрия на ел.ч. – „Суперсиметрия“?*

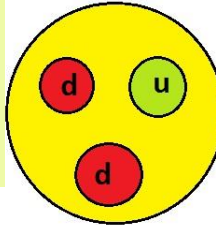
## **3. Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC**

# Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частички - (СМ)

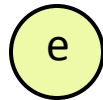
Протон  
Маса  $1.7 \times 10^{-27}$  кг.  
Заряд +1



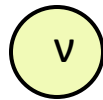
Неутрон  
Маса  $1.7 \times 10^{-27}$  кг.  
Заряд 0



Електрон  
Маса 0.0005 от  
масата на протона,  
Заряд -1

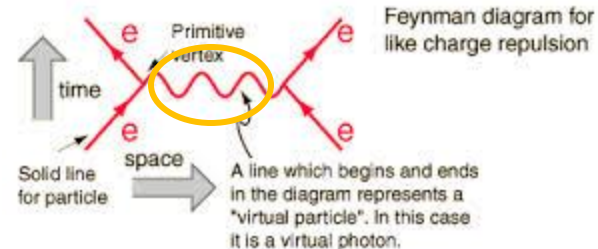


Неутрино  
Маса  $10^{-11}$  от масата  
на протона, Заряд 0



СМ описва взаимодействието  
на елементарните частици  
3 двойки кварки -  
(u,d), (c,s), (t,b)  
3 двойки лептони -  
(e,ν<sub>e</sub>), (μ,ν<sub>μ</sub>), (τ,ν<sub>τ</sub>)  
3 сили  
- Електромагнитни (γ)  
- Слабо Взаимодействие (W,Z),  
- Силно Взаимодействие (g)  
- Поле на Хигс – чрез  
взаимодействието с него  
частиците придобиват маса

	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z</b> weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W</b> weak force
Leptons				125.3 GeV 0 0 <b>H<sup>0</sup></b> Higgs boson
				Bosons (Forces)



**Елементарните Частички  
в нашето всекидневие**

# Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частичи - Симетрията като обединяващ принцип

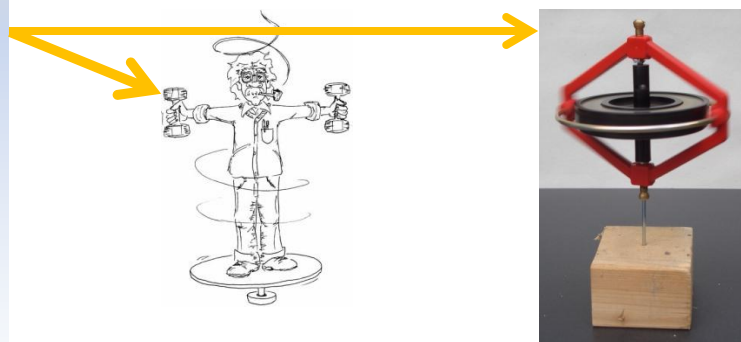
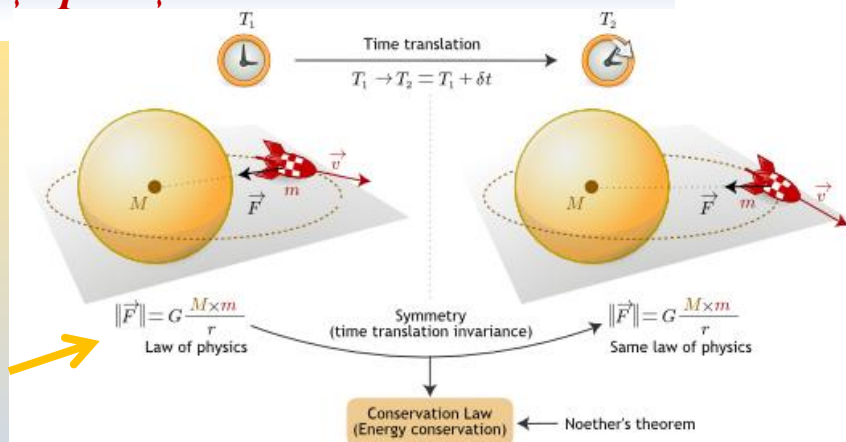
Симетрията е водещ принцип във физиката на елементарните частици – през 1918 г. беше показана връзката на всяка симетрия със закон за запазване (E.Noether).

Глобални симетрии:

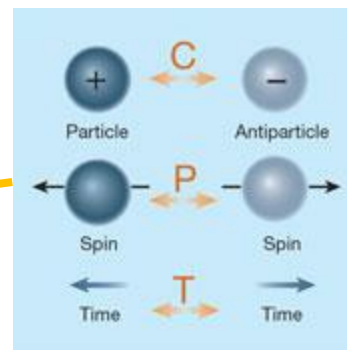
- Транслация във времето – Запазване на енергията
- Транслация в пространството – Запазване на момент на количеството на движение
- Ротация в пространството – Запазване на ъгловия момент

Дискретни симетрии:

- Координати – „P“ - запазване на пространствена четност
- Заряд – „C“ - запазване на зарядова четност
- Време – „T“ - запазване на временна четност



Нарушение на симетриите – CPT симетрията се запазва, но CP, P и T се нарушават в слабите взаимодействия



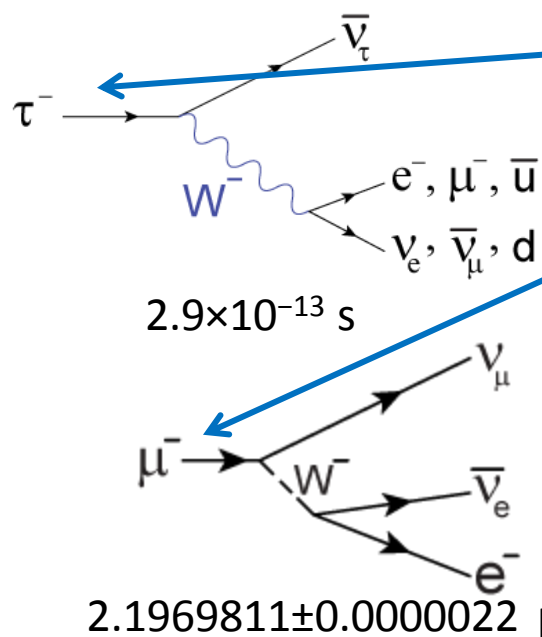
# Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частичи - Симетрията като обединяващ принцип

## Симетрии

- Глобални – трансляции и ротации в пространството и времето
- Дискретни – C,P,T
- Вътрешни – симетрия на Стандартния Модел  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

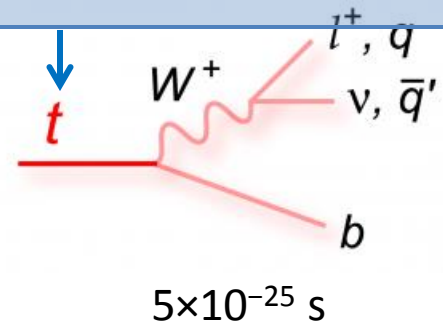
Симетрия	Взаимодействие /сила/	Ел. частица	Маса
U(1)	Електромагнитно	Фотон $\gamma$	0
SU(3)	Силно	Глуон g	0
SU(2)	Слабо	W, Z бозони	80, 91 GeV

2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 $\gamma$ photon
4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_e$ electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\mu$ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\tau$ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z weak force
0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ $\mu$ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 W weak force
125.3 GeV 0 0 H <sup>0</sup> Higgs boson			



Тежките частици се разпадат на по-леки и в детекторите на елементарни частици се наблюдават крайните продукти. Мюонът може да бъде регистриран директно поради по-дълго време на живот.

1 протон = 1 GeV  
 $E=mc^2$



# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

**matter constituents**  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1×10 <sup>-8</sup>	0	<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	<b>t</b> top	175	2/3
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in  $\text{GeV}/c^2$  (remember  $E = mc^2$ ), where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$ . The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

## BOSONS

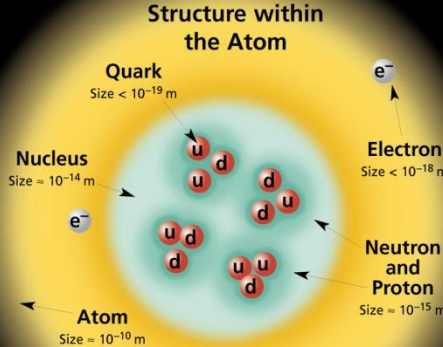
**force carriers**  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.4	-1			
<b>W<sup>+</sup></b>	80.4	+1			
<b>Z<sup>0</sup></b>	91.187	0			

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electric charges interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ .

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Property	Gravitational		Weak (Electroweak)		Electromagnetic		Strong	
	Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Flavor	Electric Charge	Electric Charge	Color Charge	Residual
Particles experiencing:	All	All	Quarks, Leptons	Quarks, Leptons	Electrically charged	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	Graviton (not yet observed)	<b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b>	<b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b>	$\gamma$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:								
$10^{-18} \text{ m}$	$10^{-41}$	$10^{-41}$	0.8	0.8	1	1	25	Not applicable to quarks
$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	$10^{-41}$	$10^{-41}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	1	1	60	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	$10^{-36}$	$10^{-36}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	1	1	Not applicable to hadrons	20

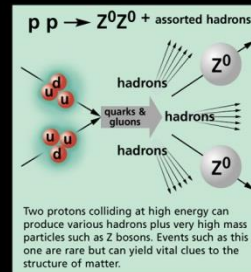
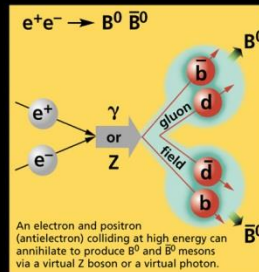
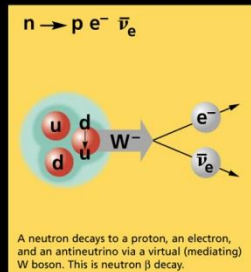
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b><math>\pi^+</math></b>	pion	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
<b><math>K^-</math></b>	kaon	<b><math>s\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
<b><math>\rho^+</math></b>	rho	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
<b><math>B^0</math></b>	B-zero	<b><math>d\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
<b><math>\eta_c</math></b>	eta-c	<b><math>c\bar{c}</math></b>	0	2.980	0

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



### The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

- U.S. Department of Energy
- U.S. National Science Foundation
- Lawrence Berkeley National Laboratory
- Stanford Linear Accelerator Center
- American Physical Society, Division of Particles and Fields
- BURLE** INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

**2. Отворени въпроси пред Стандартния Модел**

Как се определят масите на е.ч.? – Механизъм на Хигс

Защо имаме 3 генерации на е.ч. ?

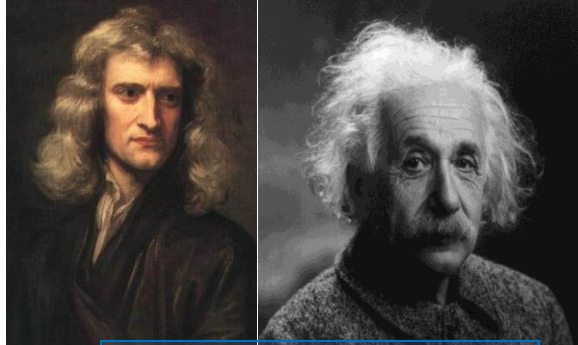
Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с СР нарушение в Стандартния Модел?

От какво е съставена “тъмната материя” и “тъмната енергия” във Вселената?

На какво е приличала материята в първите мигове на Вселената? (кварк-глюонна плазма?)

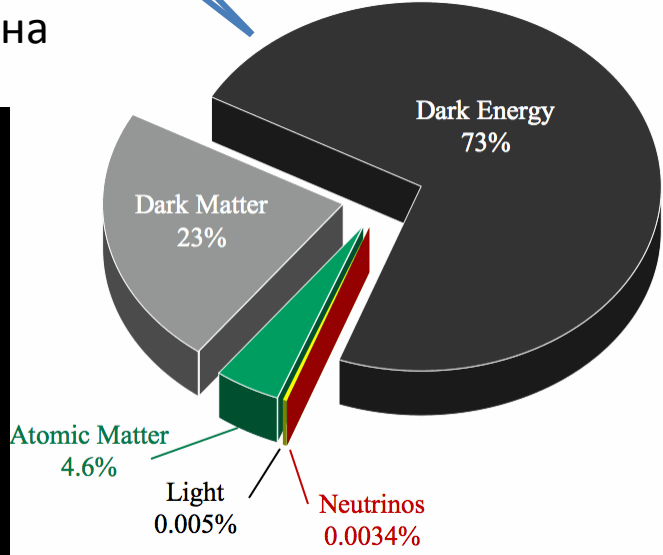
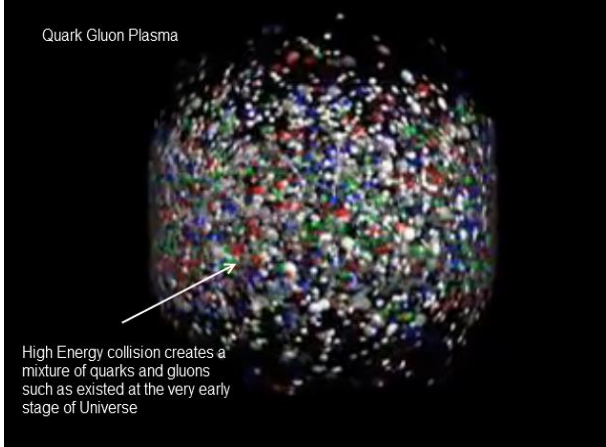
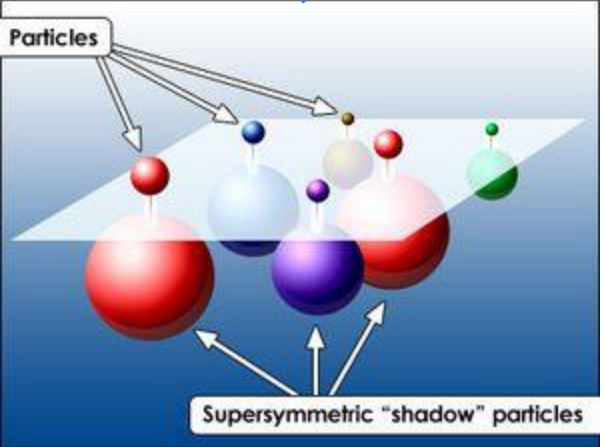
Възможни ли са повече размерности?

Има ли нова симетрия? SUSY?

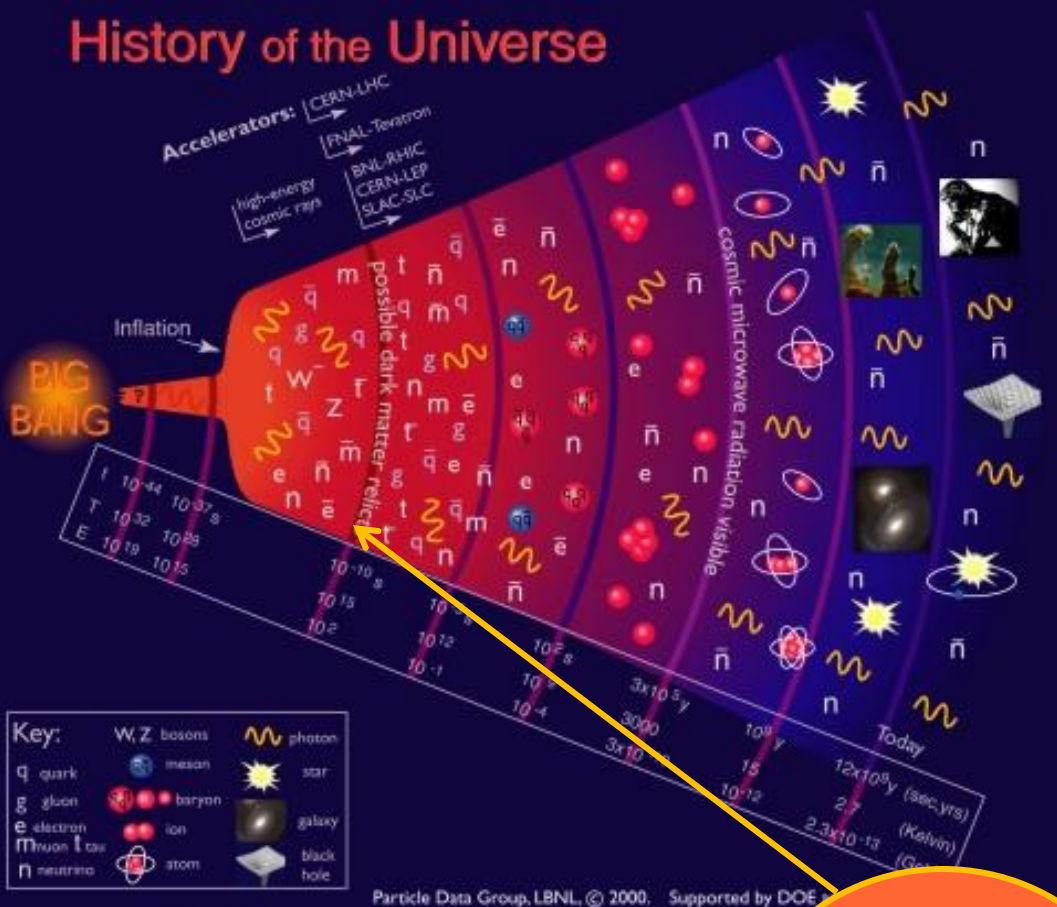


$F = ma$     $E = mc^2$   
 Всичко това е правилно.  
 Но как един обект става масивен?

Симулация на кварк глюонна плазма при 2 трилиона К

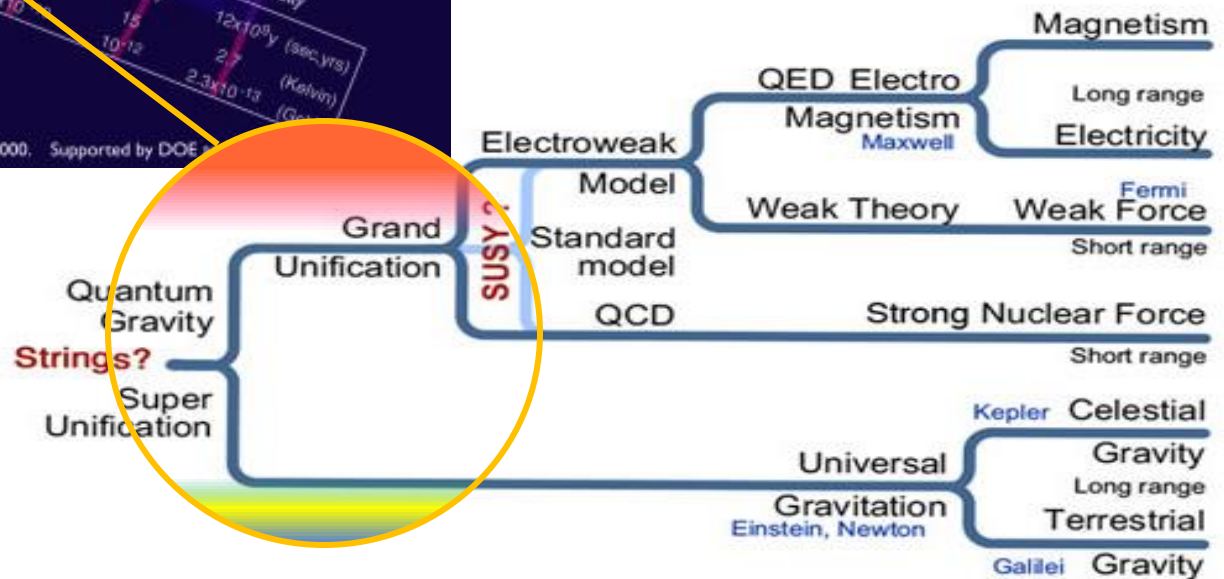


# History of the Universe



## 3. Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC

Граница на нашето познание до днес





## Цел на физиката на високите енергии

1. Да се надникне дълбоко в Природата ( $E \sim 1/\text{размера}$ )  
(мощен микроскоп)

2. Да се открият нови частици с по висока маса ( $E = mc^2$ )

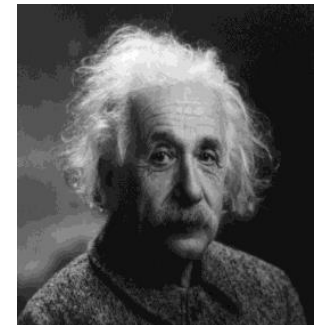
3. Да се изучи младата Вселена ( $E = kT$ )

И всичко това в Лаборатория – LHC-CERN

de Broglie



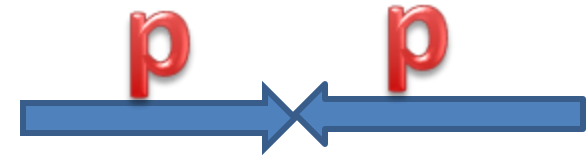
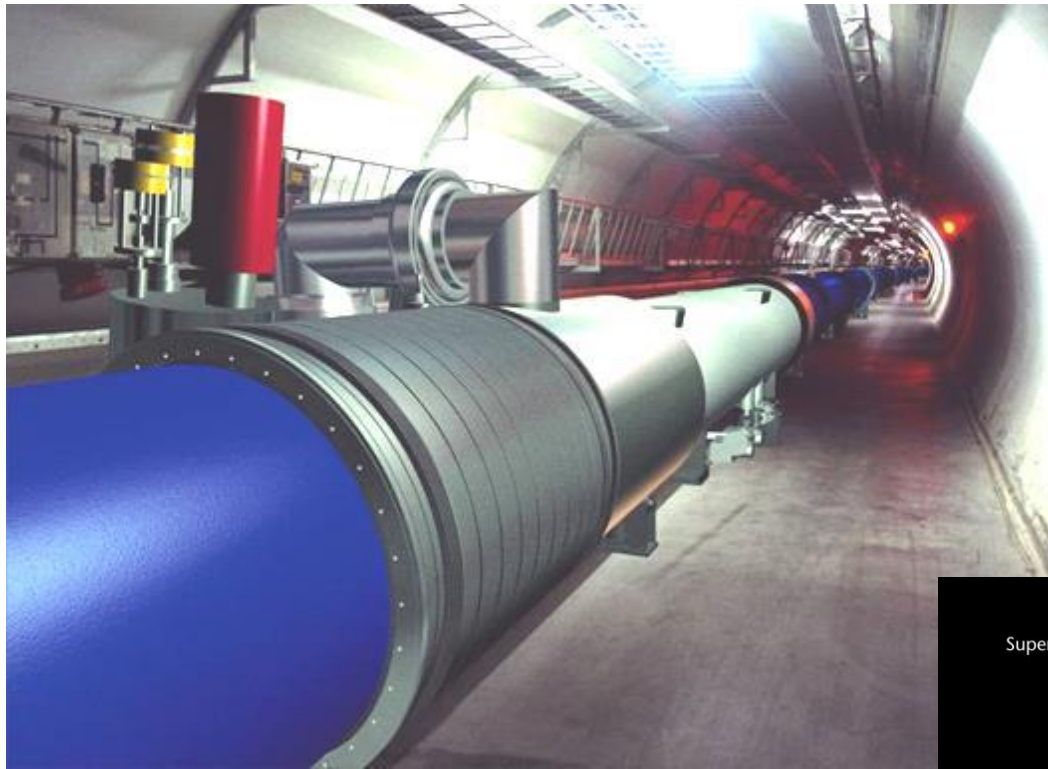
Einstein



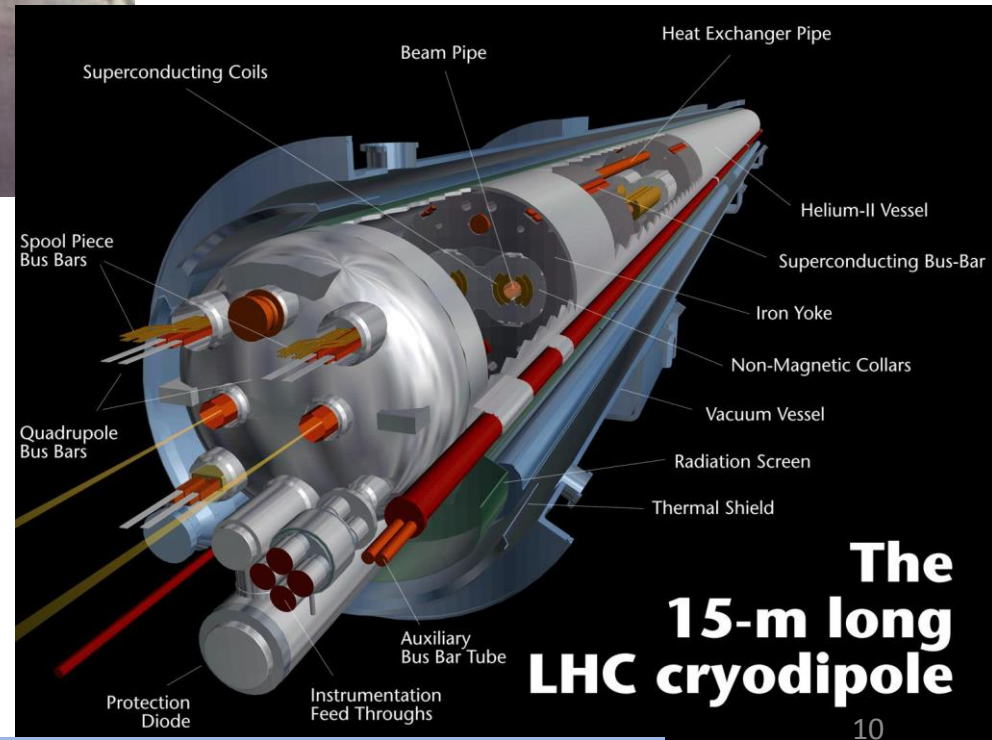
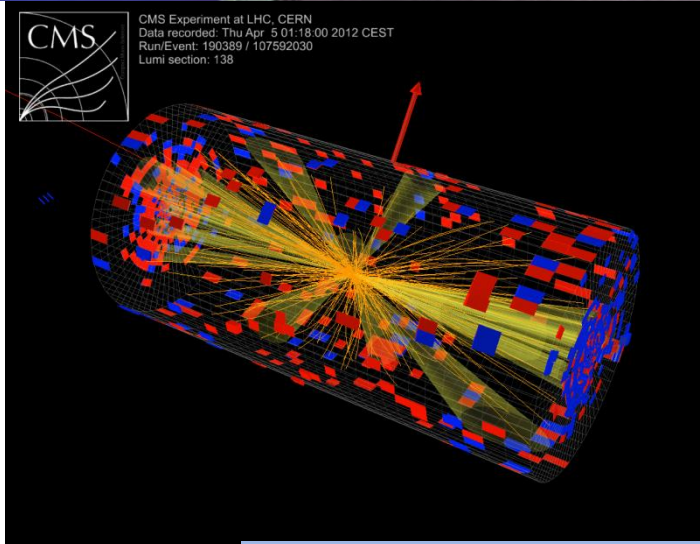
Boltzmann



# LHC



7 TeV + 7 TeV  
 $P(\text{TeV}) = 0.3 B(\text{T}) R(\text{km})$   
 12 kA  
 Светимост  
 $L = N^2 k f \gamma / 4 \pi \epsilon \beta = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



## Единици на измерване

Вероятност и интензивност на взаимодействието:

Сечение на разсейване  $\sim r^2$

барн:  $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$

$1 \text{ мб} = 10^{-27} \text{ см}^2$

$1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$

Светимост (интензивност на сноповете протони):  $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

LHC 2010:  $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2011:  $\sim 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2012:  $\sim 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Честотата на взаимодействията при сблъскване на сноповете от протони = светимостта  $\times$  сечението

Пример:

Бозон на Хигс:

сечение ( $m = 125 \text{ ГэВ}$  при  $8 \text{ тэВ}$ )  $\approx 10 \text{ пб}$

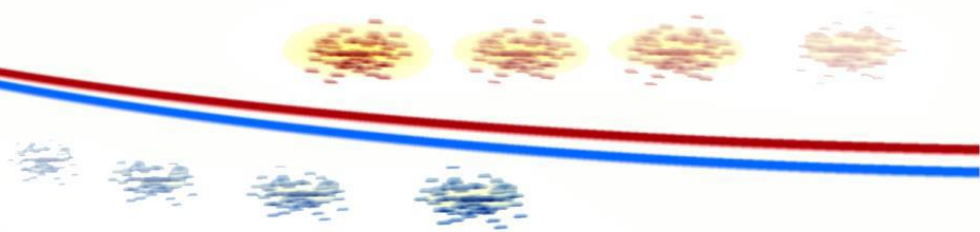
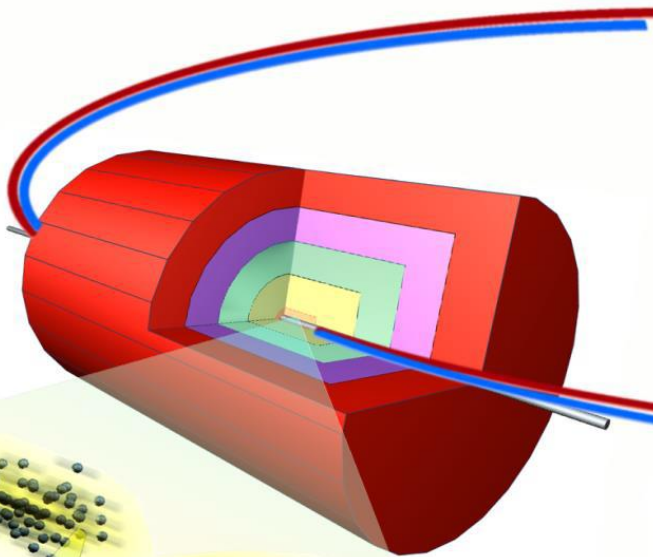
1 събитие за 10 сек.

### Сравнение на енергиите

	Система на центъра на масите(СЦМ)	Лабораторна система(ЛС)
Лаборатория Фермилаб ,Чикаго	1 TeV X 1 TeV	$2 \cdot 10^3 \text{ TeV}$
LHC	3.5 TeV X 3.5 TeV	$2 \cdot 10^4 \text{ TeV}$
LHC	7 TeV X 7 TeV	$10^5 \text{ TeV}$
LHC PbPb	5.5 TeV нуклон/нуклон	

# LHC

$7 \times 10^{12}$  eV енергия на снопа  
 $10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> светимост  
2808 пакета/сноп  
 $10^{11}$  протона/пакет

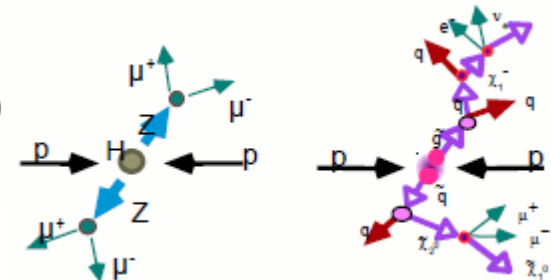


пресичане на пакети –  $4 \times 10^7$  Hz

протонни сблъсъци  $10^9$  Hz

раждане на нови частици  $10^{-5}$  Hz (Higgs, SUSY,...)

Селекция на 1 събитие от 10,000,000,000,000

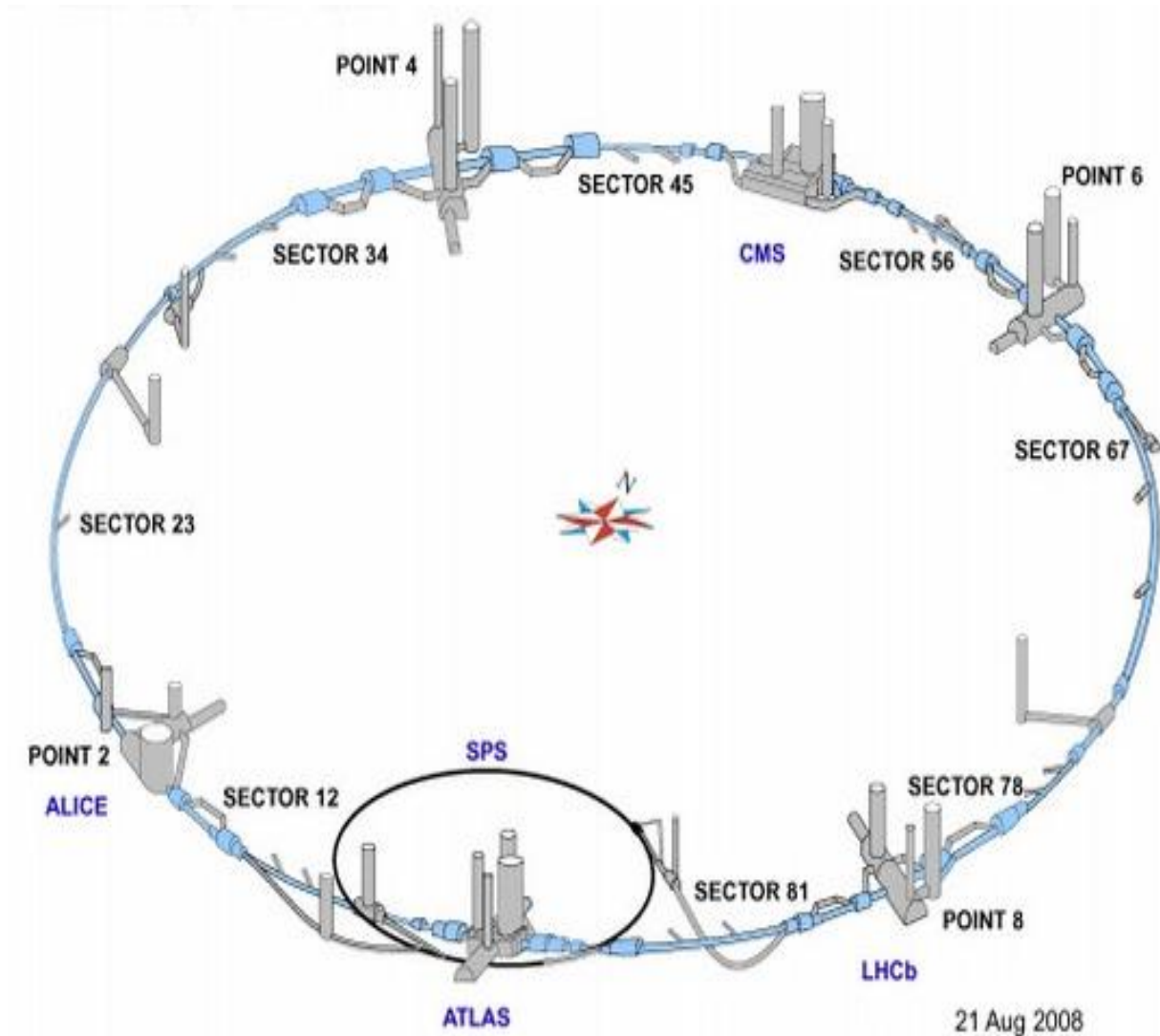


# LHC :

...протоните обикалят със светлинна скорост 27 км тунел в противоположни посоки 11,000 пъти в секунда.

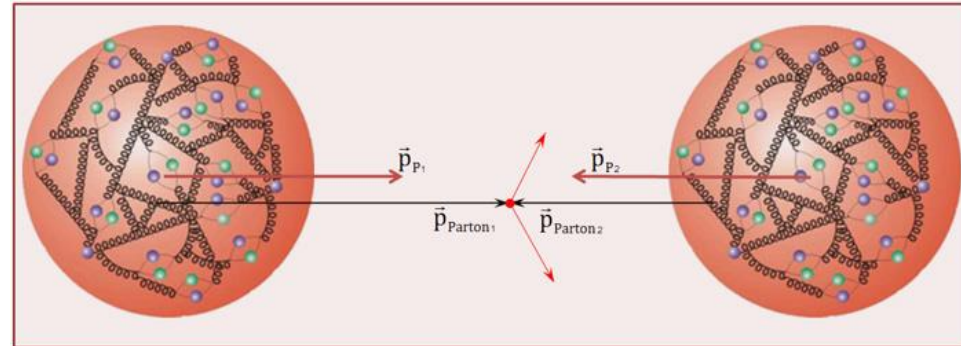
...за да се ускорят протони близо до скоростта на светлината се изисква вакуум по-дълбок от междузвездното пространство. Има 10 пъти по-голяма атмосфера на Луната, отколкото в LHC.

...когато двата ускорени снопа протони се ударят, това ще генерира температура 100,000 пъти по-голяма отколкото в ядрото на Слънцето, но в микроскопично пространство.

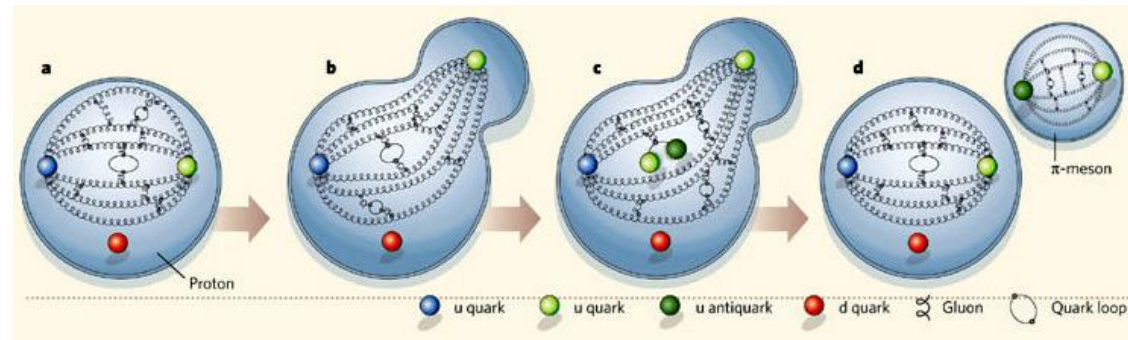


# Пример на основни процеси при взаимодействието на протоните в ЛНС

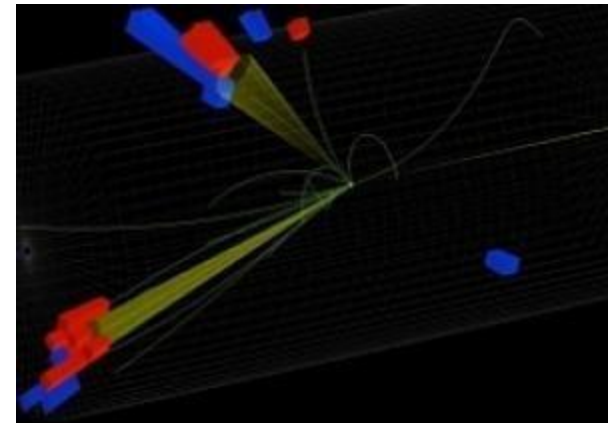
Протонът се състои от 3 кварка и глюонно поле което ги задържа – това твърдение е в сила за протон с ниска енергия. При скорост близка до скоростта на светлината, в протона се появяват множество частици – кварки, антикварки и глюони – „партони“.



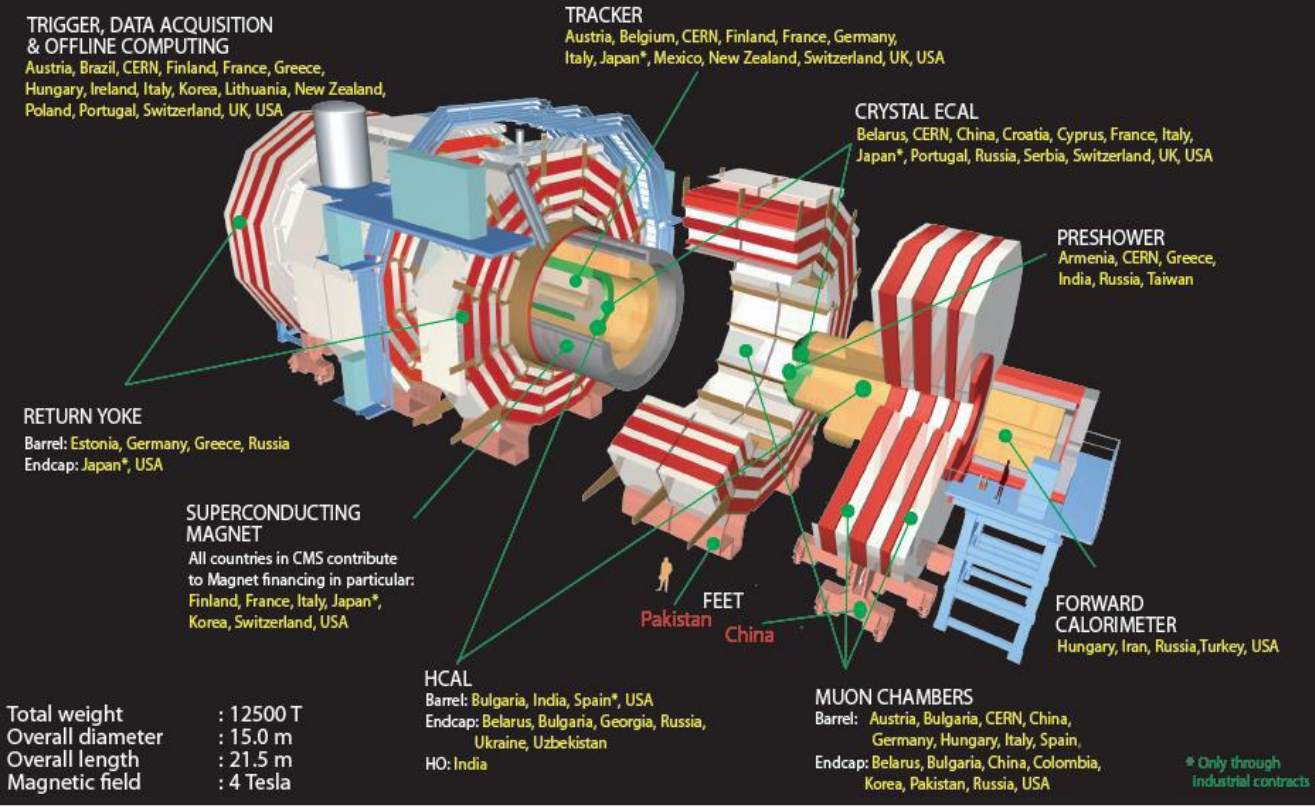
При достатъчно висок импулс един отделен кварк може да се отдели от протона, при това силата на привличане нараства с разстоянието и глюонното поле ражда допълнителни кварк-антикваркови двойки – ражда се пион или различни видове адрони /пиони, каони и др./ при многократното разкъсване на струната свързваща кварка с протона.

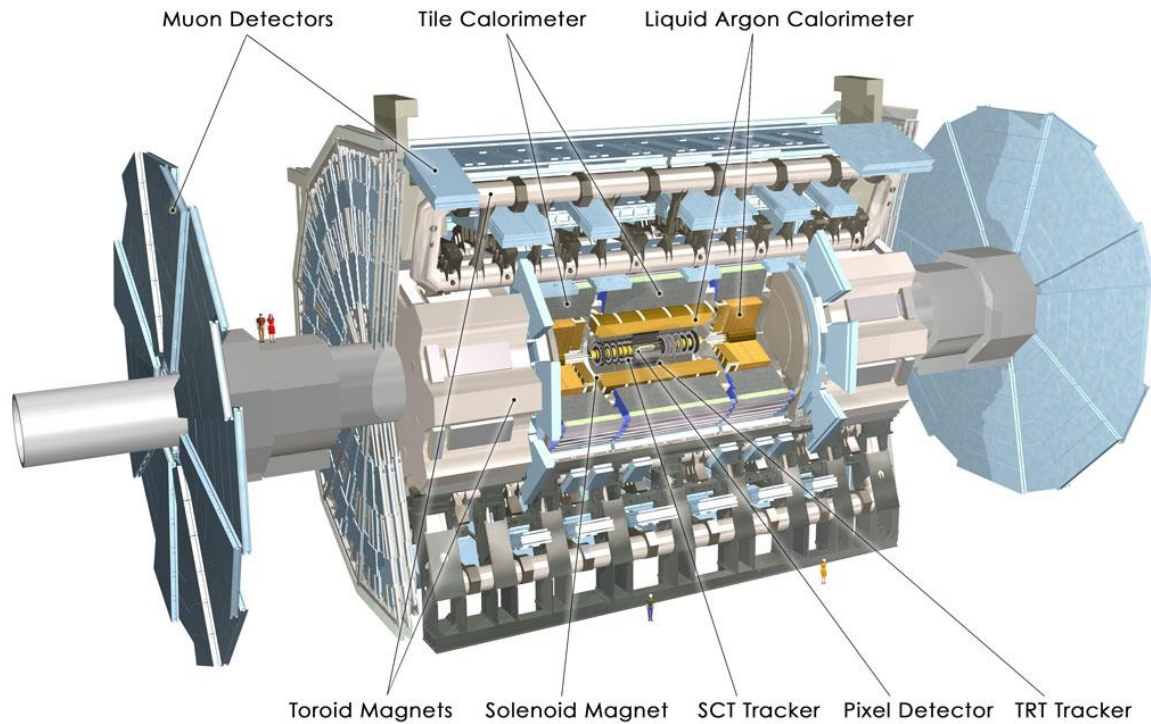


Адроните предпочитат да се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“ които се регистрират в детектора

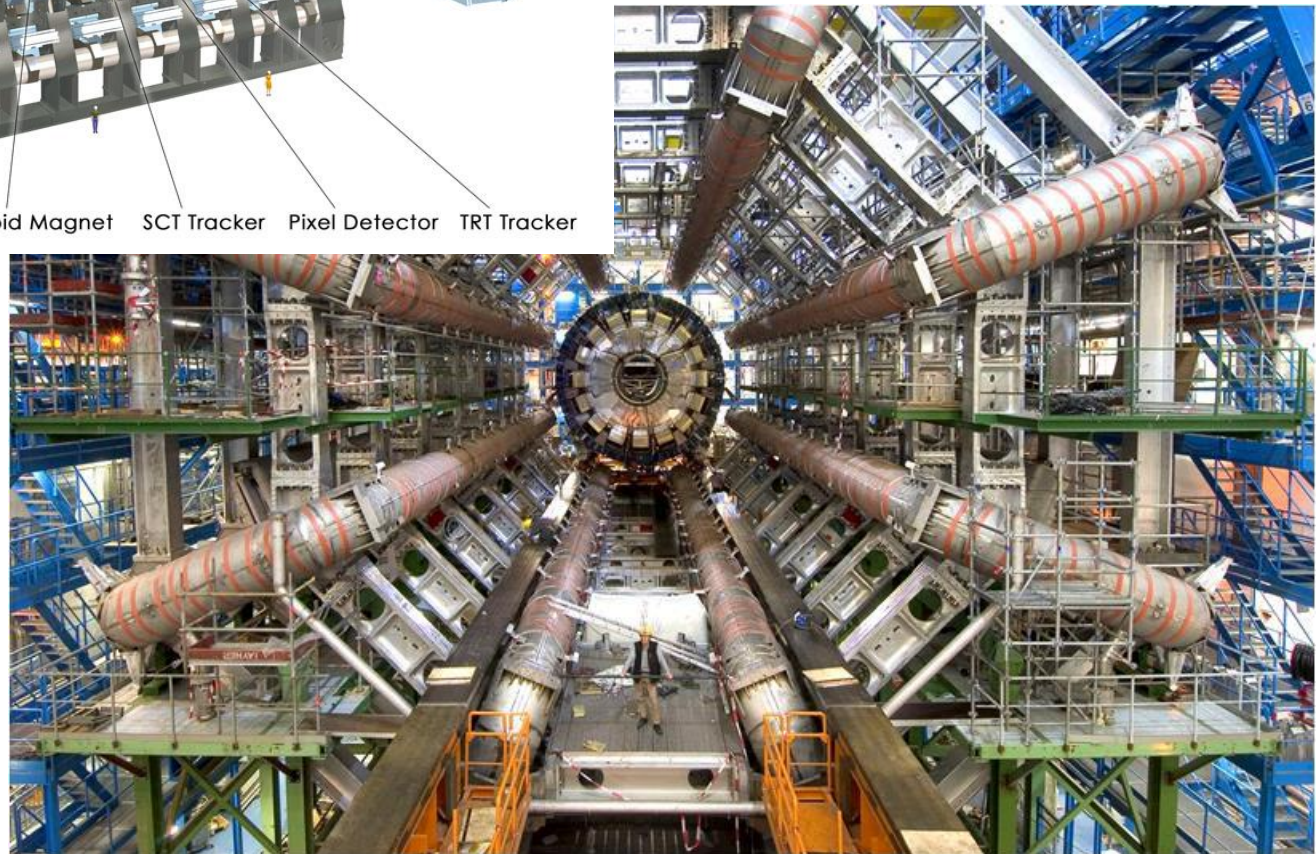


**CMS**  
**Compact**  
**Muon**  
**Solenoid**



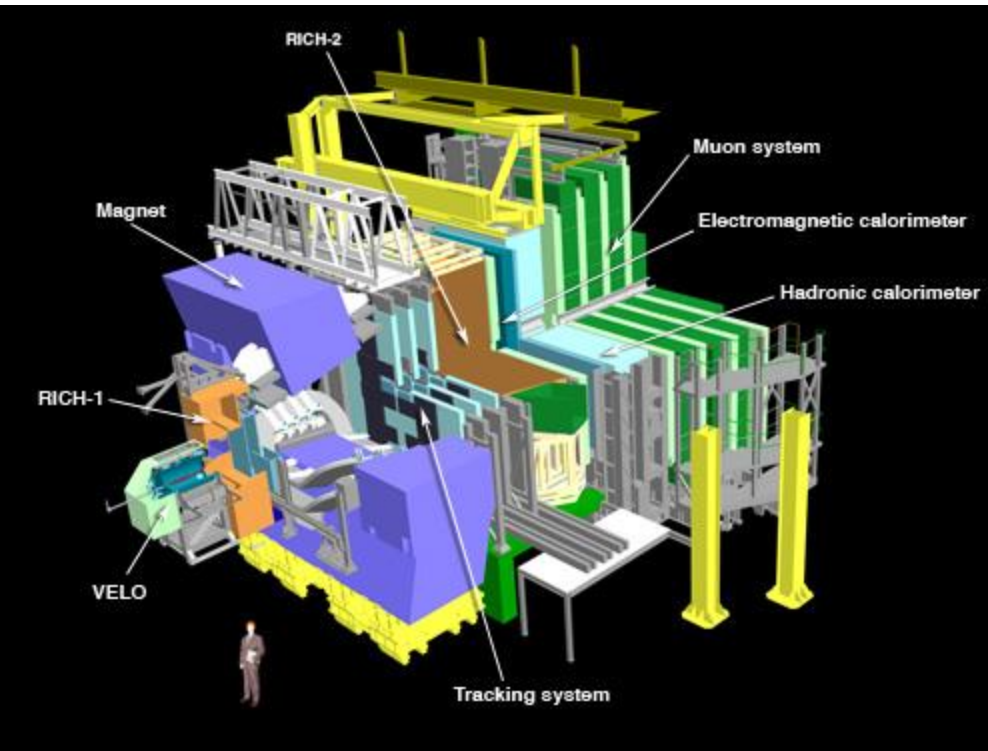


**ATLAS**  
**A**  
**Toroidal**  
**LHC**  
**ApparatuS**



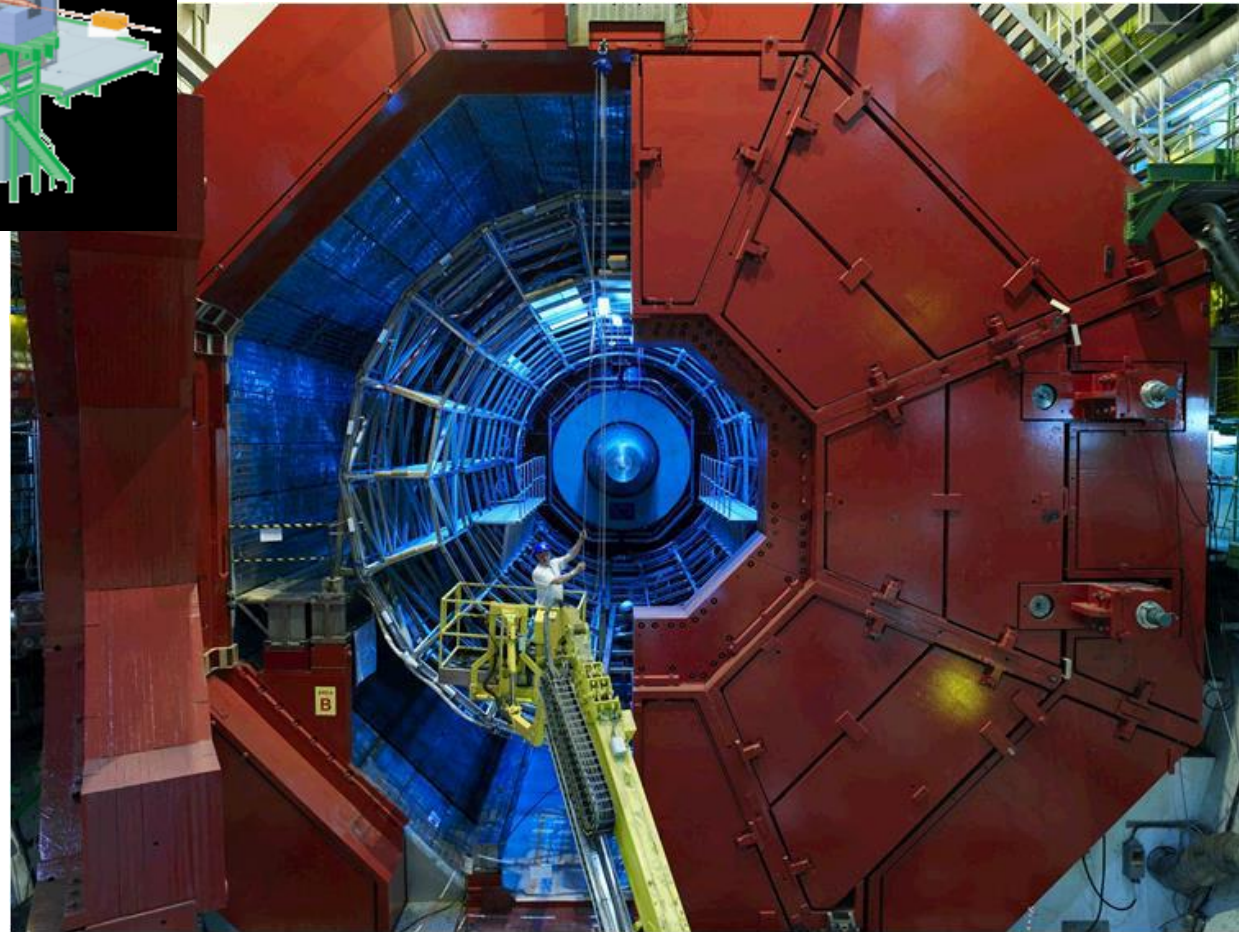
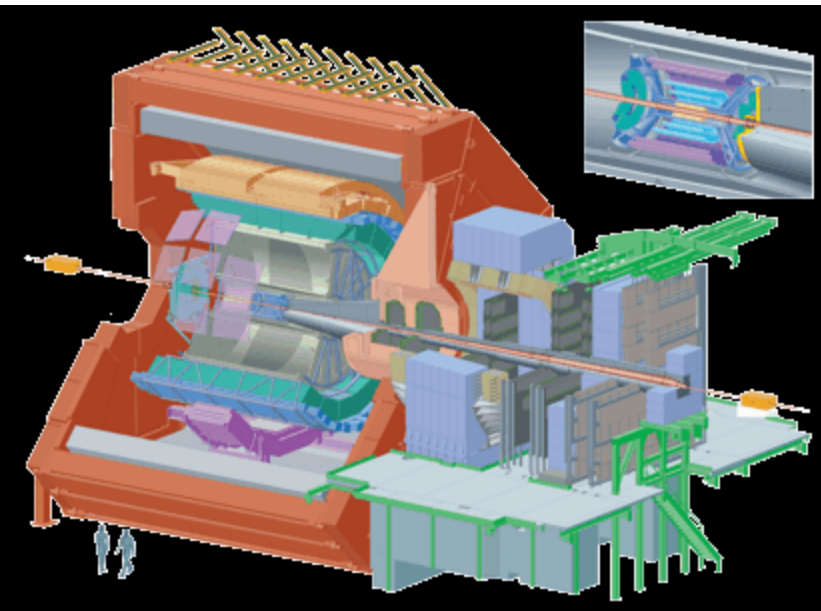


LHCb  
Large  
Hadron  
Collider  
beauty

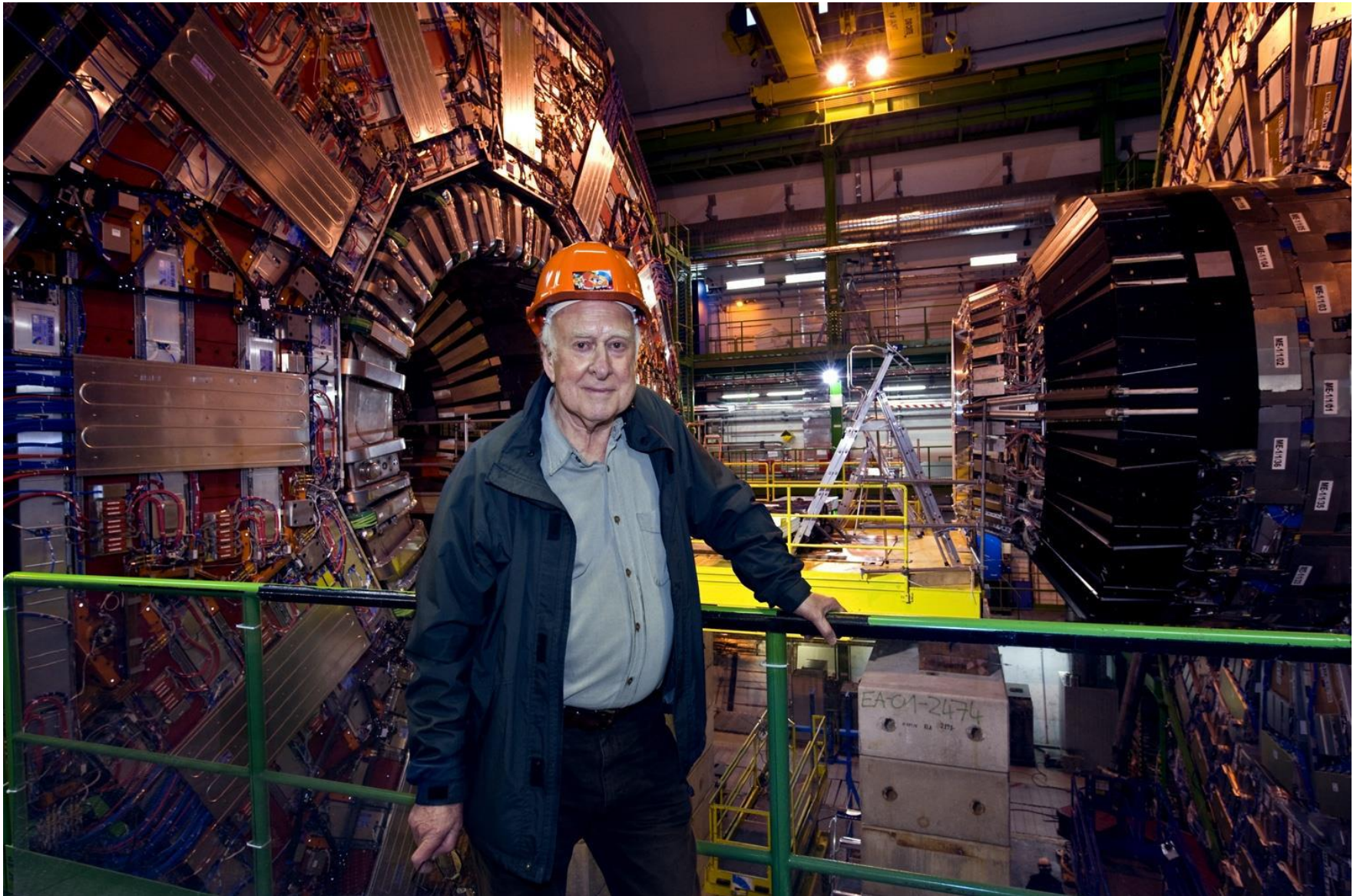


# ALICE

**A**  
**Large**  
**Ion**  
**Collider**  
**Experiment**



## 2010 - Higgs на CMS









*Pieter Bruegel de Oude "Babylon tower" 1563*