Въведение във физиката на елементарните частици
П.Яйджиев, ИЯИЯЕ - БАН

A small fraction of the CMS Collaboration: June 2012

1.Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частици

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?

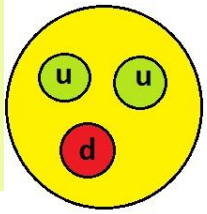
Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?

От какво е съставена "тъмната материя" и "тъмната енергия" във Вселената?

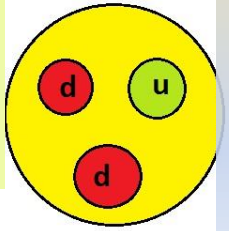
3. Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC

Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частици - (СМ)

Протон
Маса 1.7×10^{-27}кг.
Заряд +1



Неутрон
Маса 1.7×10^{-27}кг.
Заряд 0



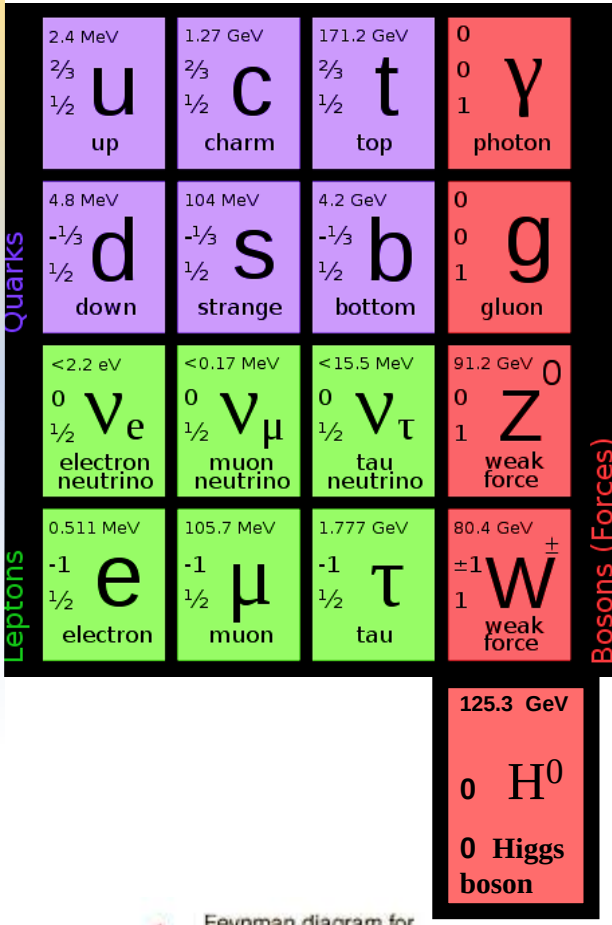
Електрон
Маса 0.0005 от масата на протона,
Заряд –1

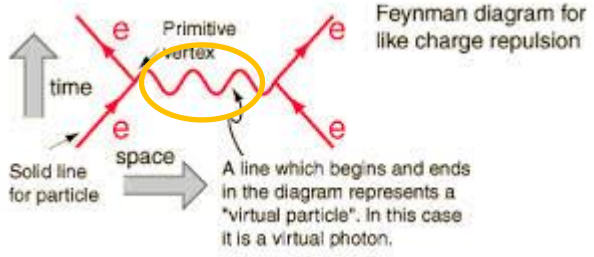
e

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

ν

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





Елементарните Частици в нашето всекидневие

Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частици - Симетрията като обединяващ принцип

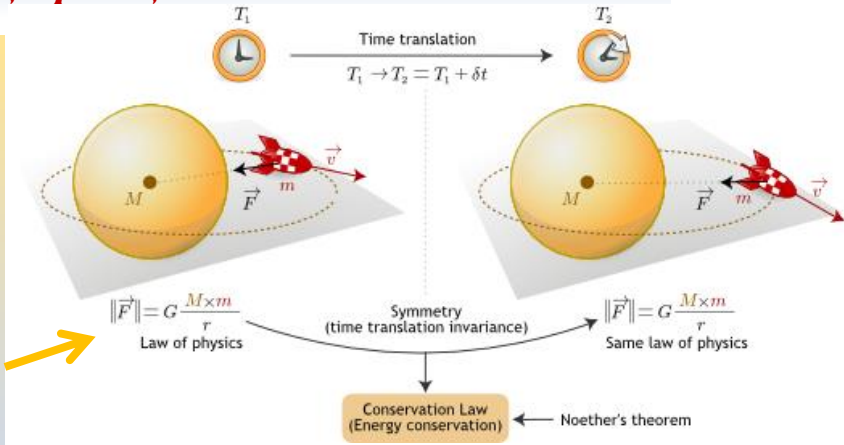
Симетрията е водещ принцип във физиката на елементарните частици – през 1918 г. беше показана връзката на всяка симетрия със закон за запазване (E.Noether).

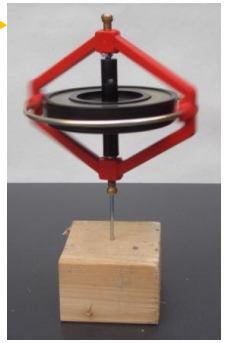
Глобални симетрии:

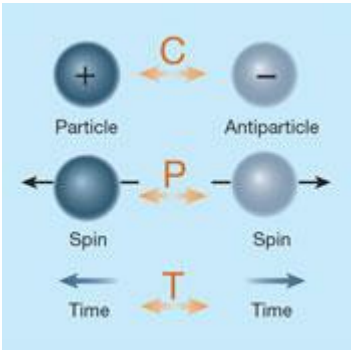
- Транслация във времето – Запазване на енергията
- Транслация в пространството – Запазване на момент на количеството на движение
- Ротация в пространството – Запазване на Ъгловия момент

Дискретни симетрии:

- Координати – „P" - запазване на пространствена четност
- Заряд – „C" - запазване на зарядова четност
- Време – „T" – запазване на времена четност







Вътрешни симетрии

- Съответствие частица – вълна от квантовата механика
- Позиция на частицата ~ $|\Psi|^2$
- Калибровъчна симетрия U(1)

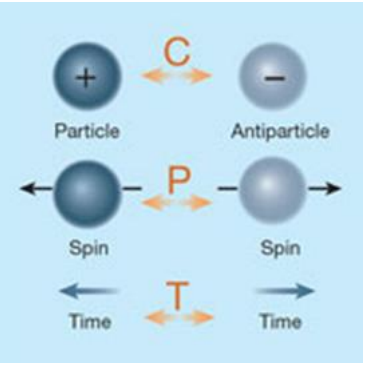
.....

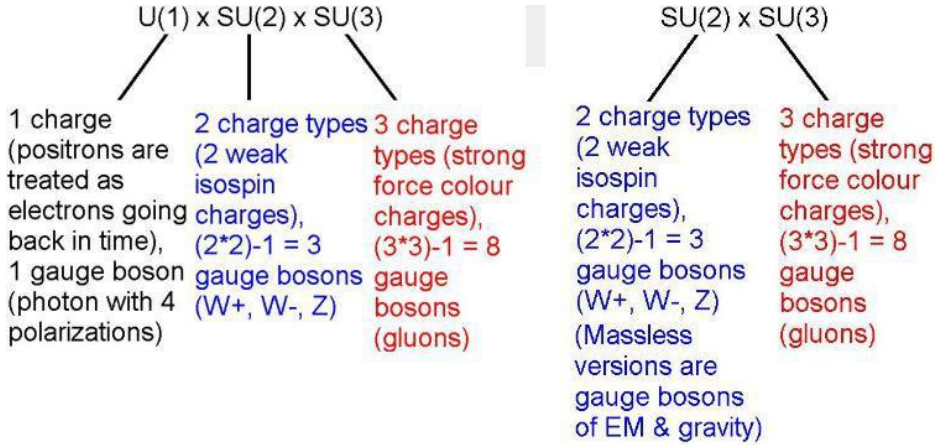
Във физиката на елементарните частици симетрията определя структурата на модела – Видовете частици и тип на силата на взаимодействие.

Симетрия на стандартния модел:

SU(3) x SU(2) x U(1)

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

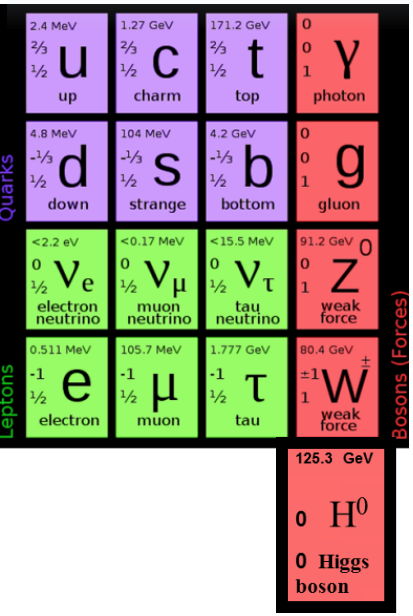




Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частици - Симетрията като обединяващ принцип

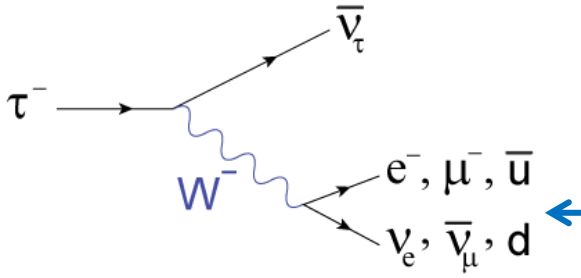
Симетрии
- Глобални – транслации и ротации в пространството и времето
- Дискретни – C,P,T
- Вътрешни – симетрия на Стандартния Модел
  SU(3) x SU(2) x U(1)

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

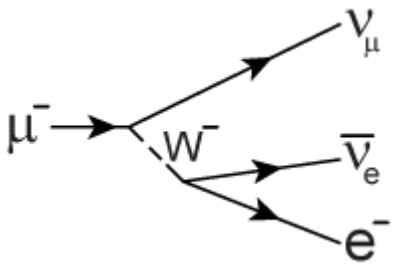


Тежките частици се разпадат на по-леки и в детекторите на елементарни частици се наблюдават крайните продукти. Мюонът може да бъде регистриран директно поради по-дълго време на живот.

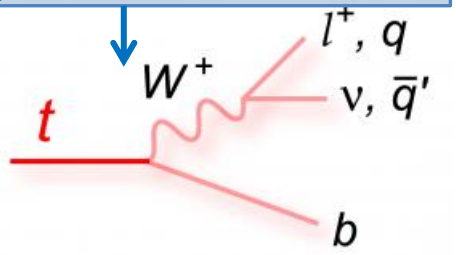
1 протон = 1 GeV $E=mc^2$



2.9×10^{-13} s



2.1969811±0.0000022 μs



5×10^{-25} s

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

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	−1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	−1

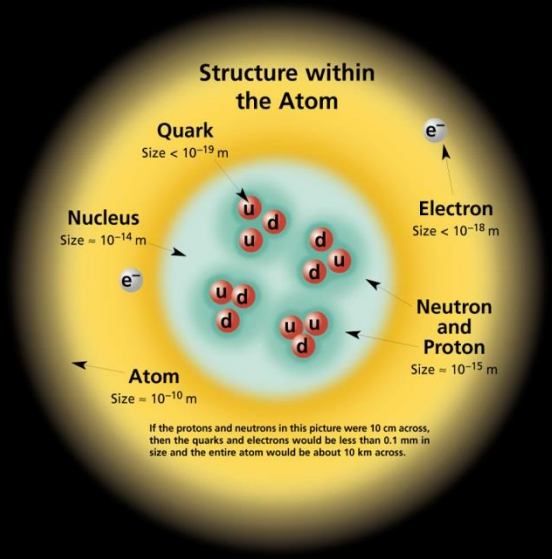
Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	−1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-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 GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.



BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	−1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	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 electrically-charged particles 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.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

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

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^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	−1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	−1	1.672	3/2

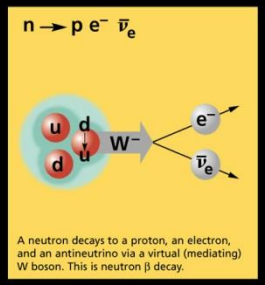
Mesons $q\bar{q}$

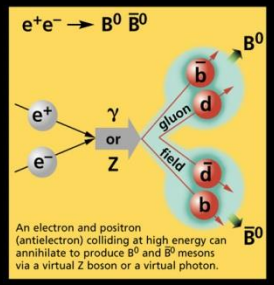
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

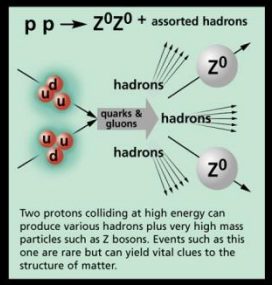
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	−1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

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, γ, 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. ?

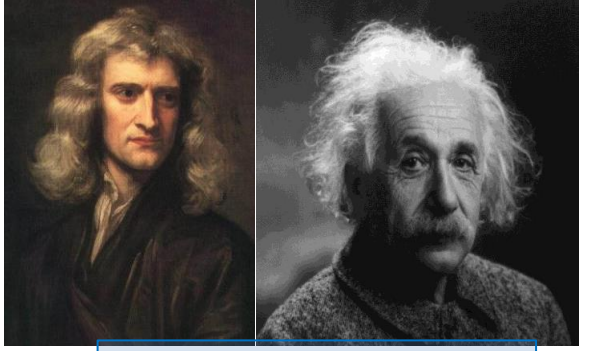
Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?

От какво е съставена "тъмната материя" и "тъмната енергия" във Вселената?

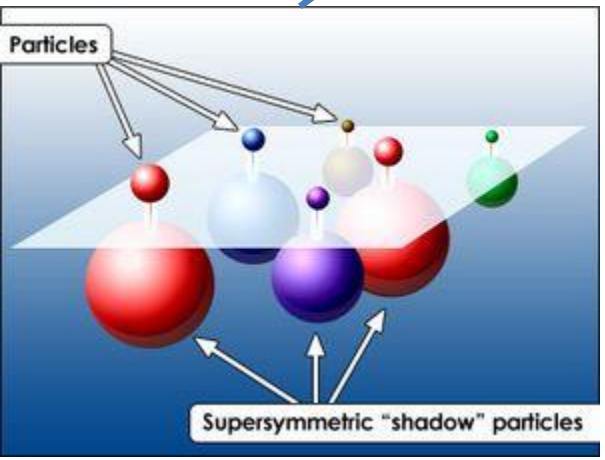
На какво е приличала материята в първите мигове на Вселената? (кварк-глюонна плазма?)

Възможни ли са повече размерности?

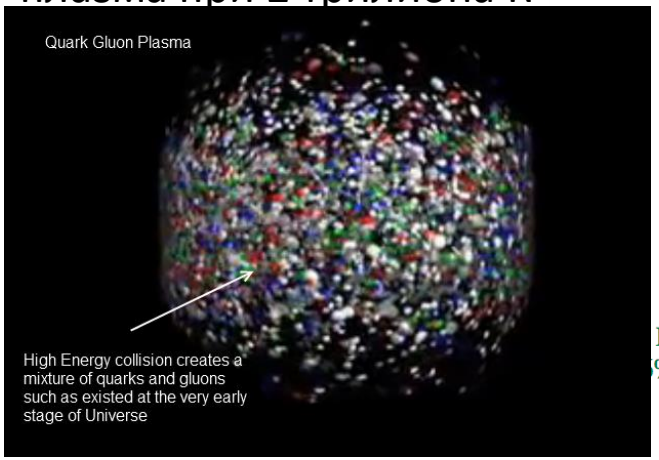
Има ли нова симетрия? SUSY?

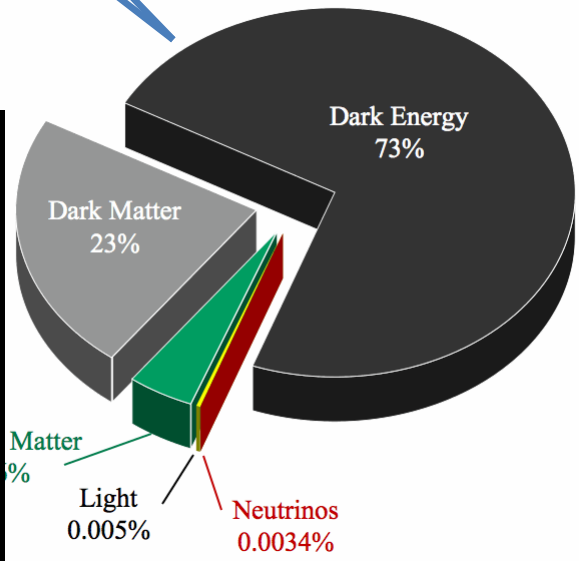


F= ma E = mc2
Всичко това е правилно.
Но как един обект става масивен?

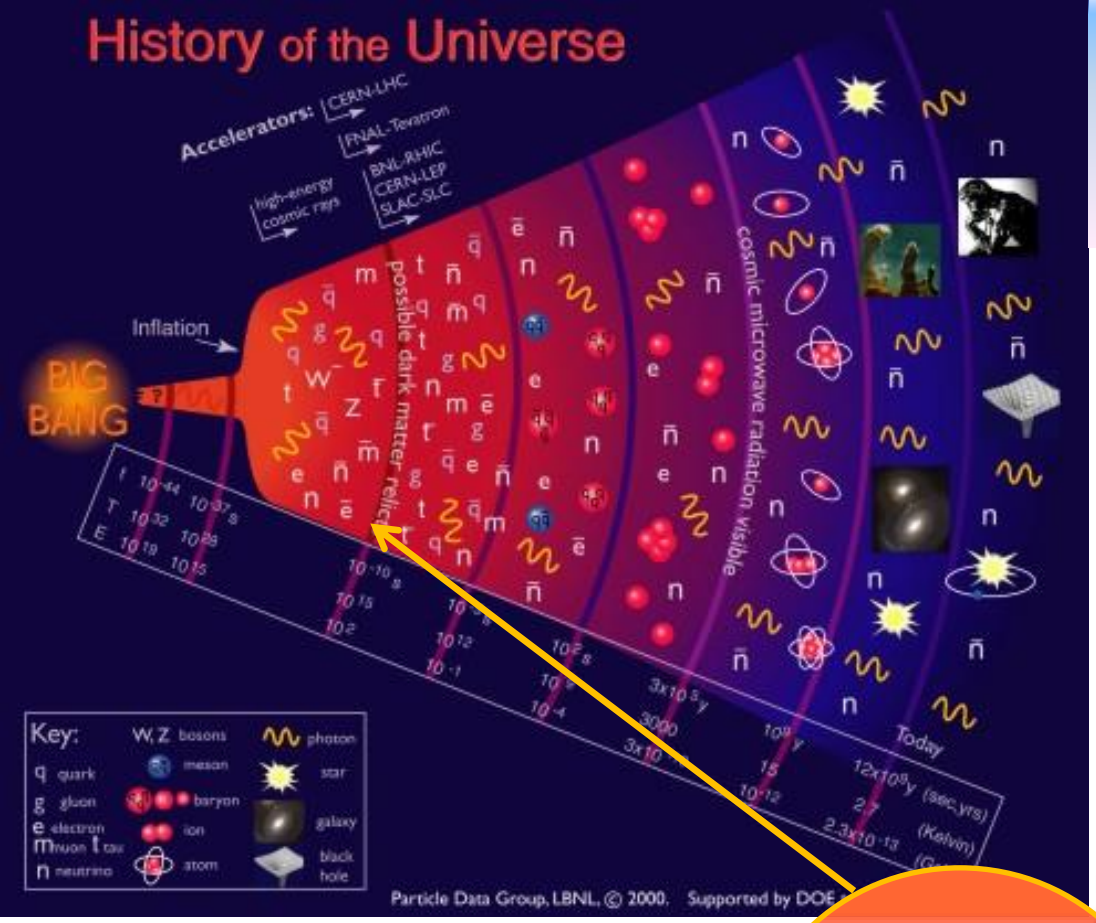


Симулация на кварк глюонна плазма при 2 трилиона К

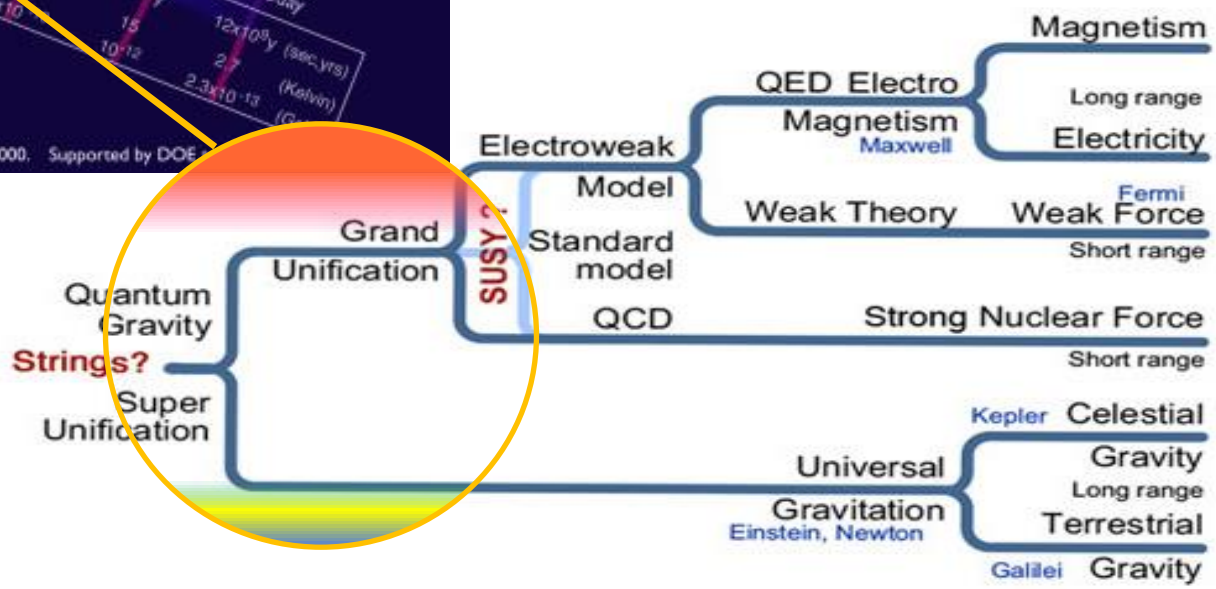




3. Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC



Граница на нашето познание до днес



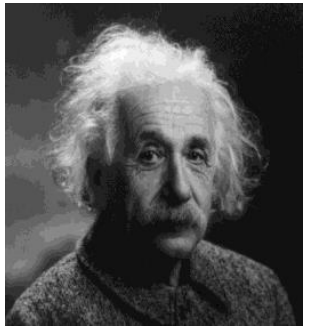
Цел на физиката на високите енергии

1. Да се надникне дълбоко в Природата (E ~ 1/размера) (мощен микроскоп)

de Broglie

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

Einstein

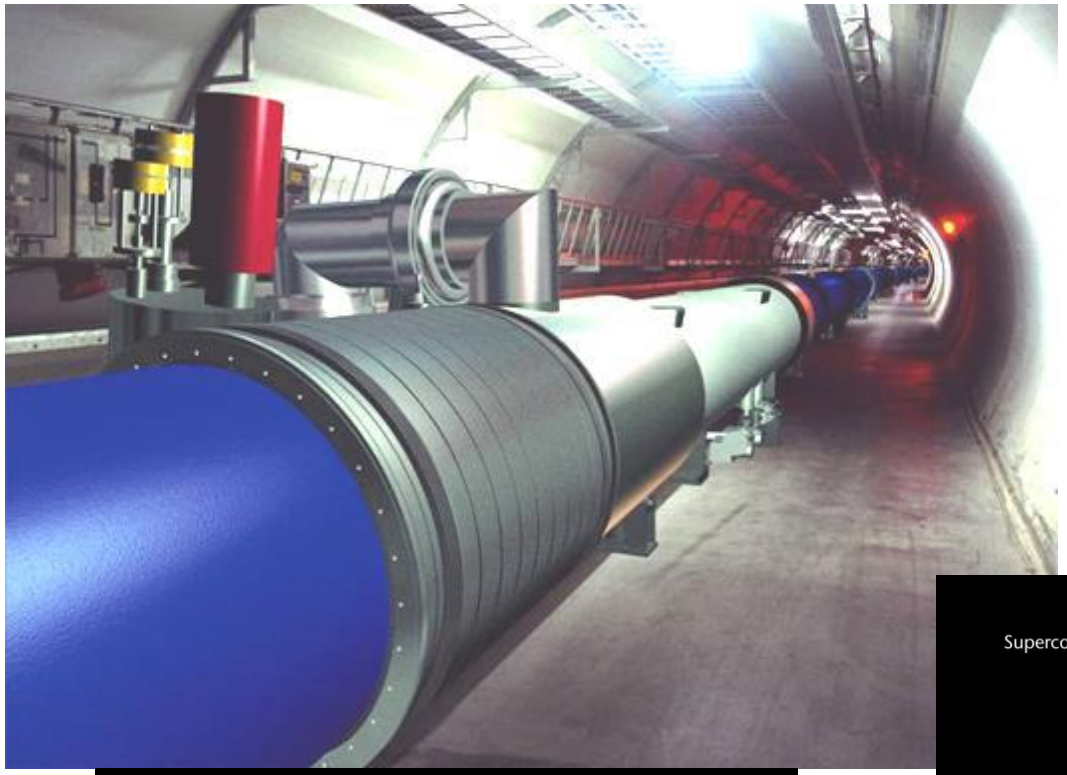


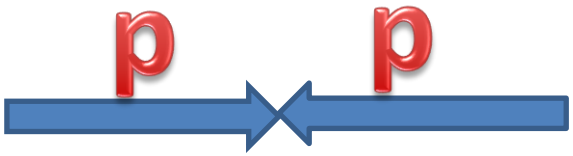
3. Да се изучи младата Вселена ($E = кT$)

Boltzmann

И всичко това в Лаборатория – LHC-CERN

LHC





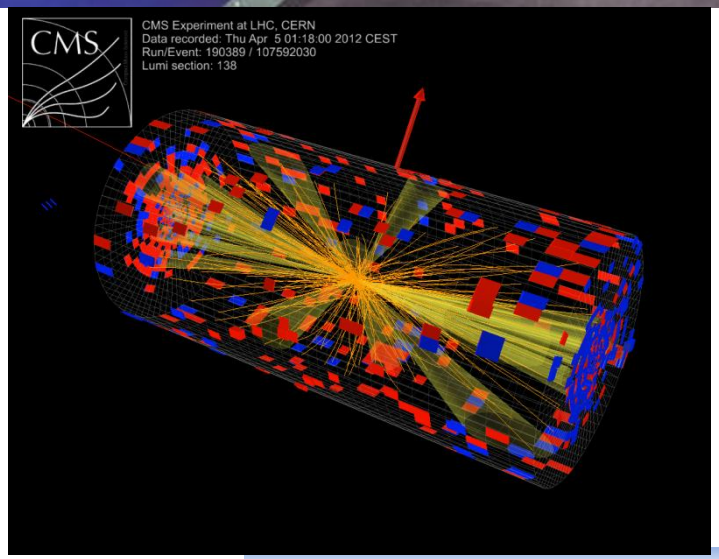
7 TeV + 7 TeV

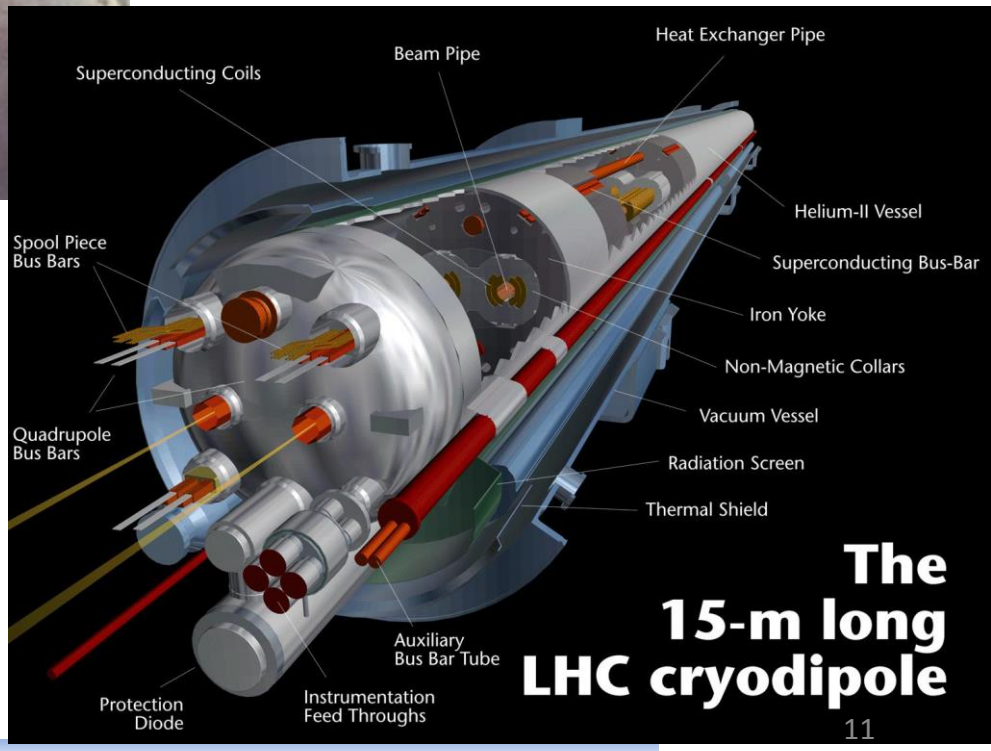
P(TeV) = 0.3 B(T) R(km)

12 kA

Светимост

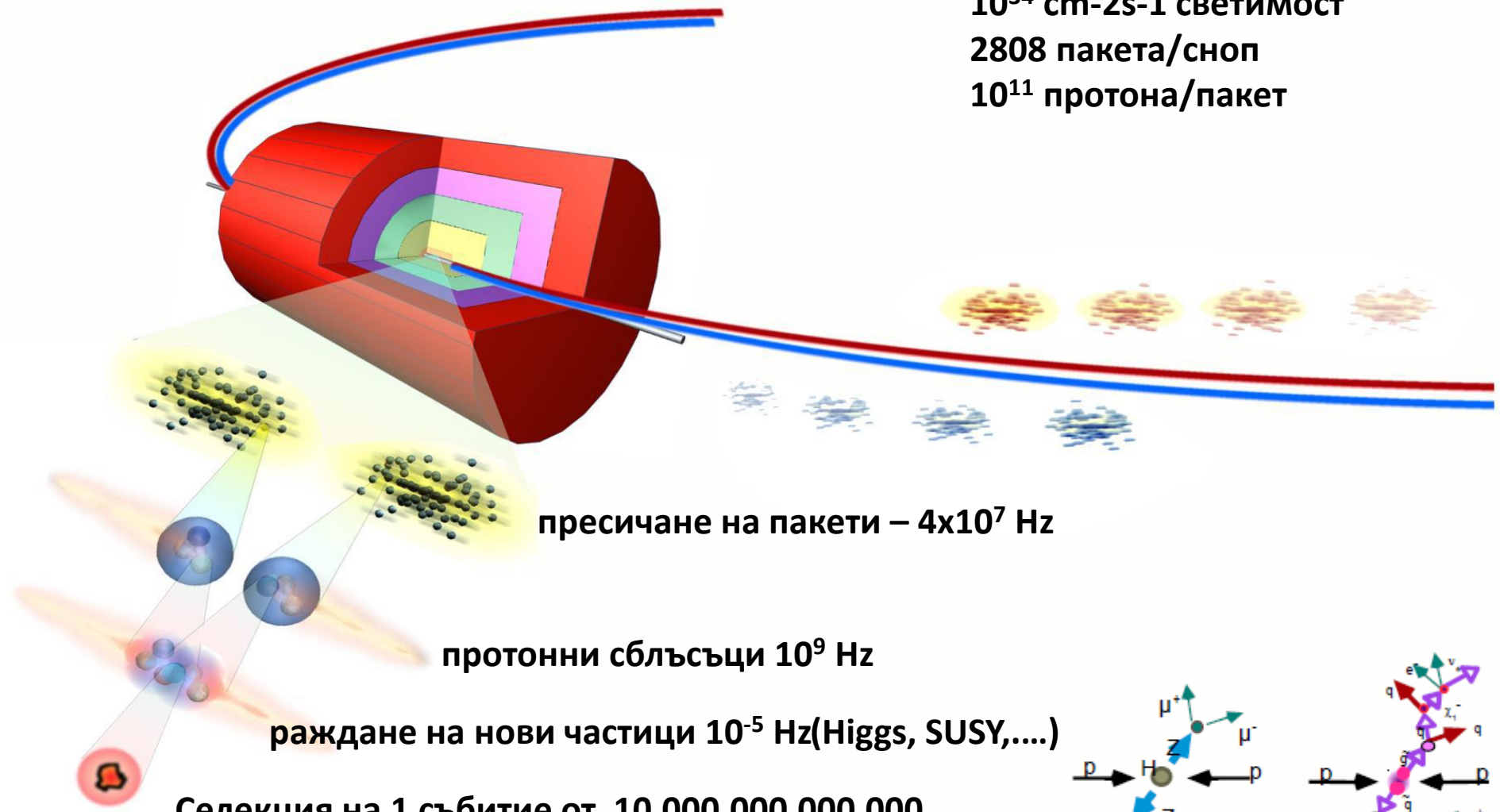
$L=N2kf\gamma/4\pi\varepsilon\beta = 10^{34}cm^{-2}s^{-1}$





LHC

$7x10^{12}$ eV енергия на снопа
10^{34} cm-2s-1 светимост
2808 пакета/сноп
10^{11} протона/пакет

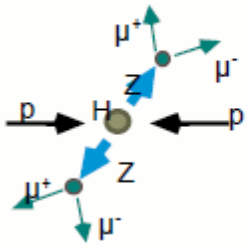


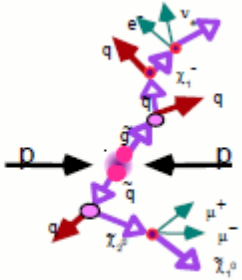
пресичане на пакети – $4x10^{7}$ Hz

протонни сблъсъци 10^{9} Hz

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

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



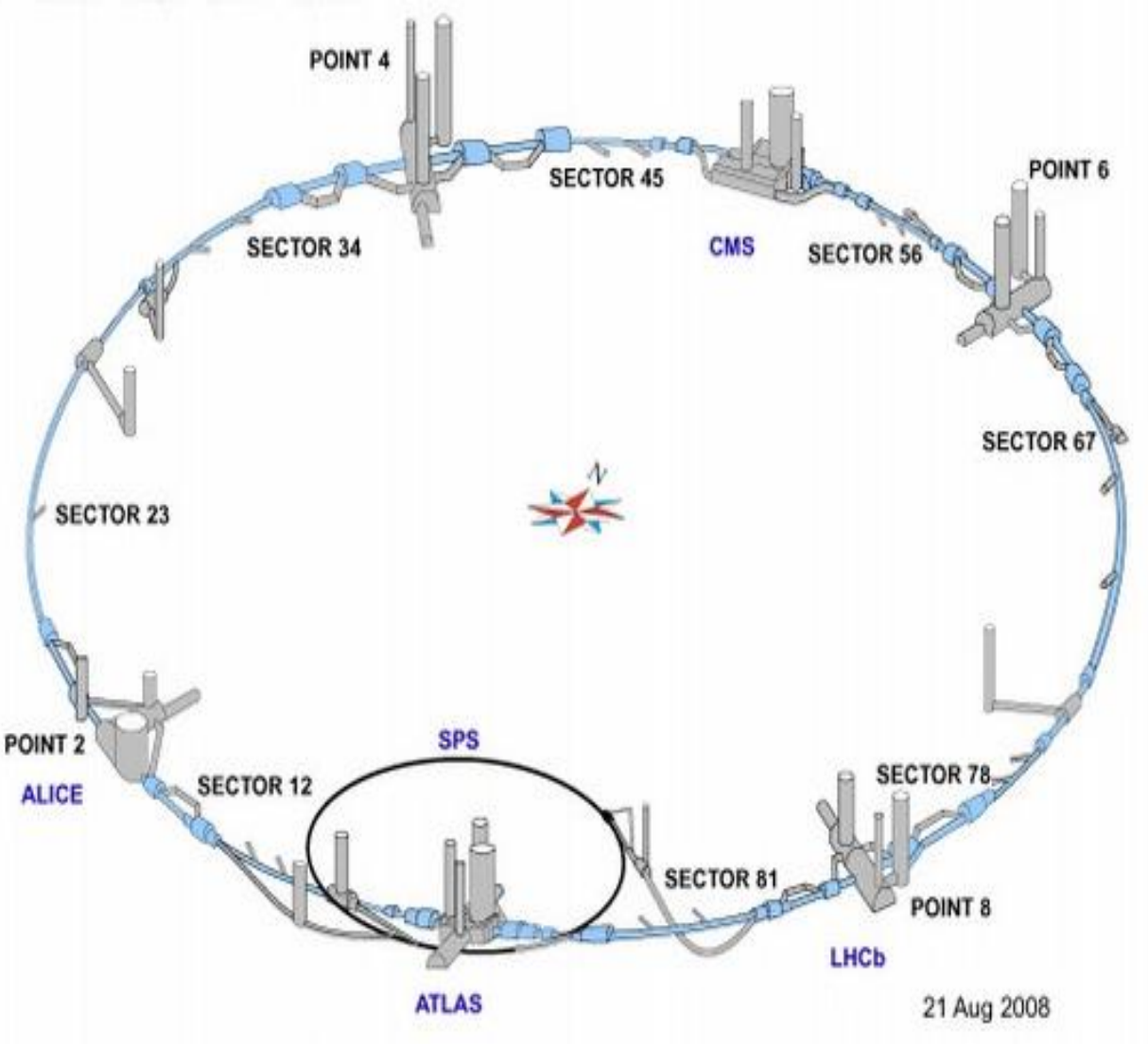


LHC :

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

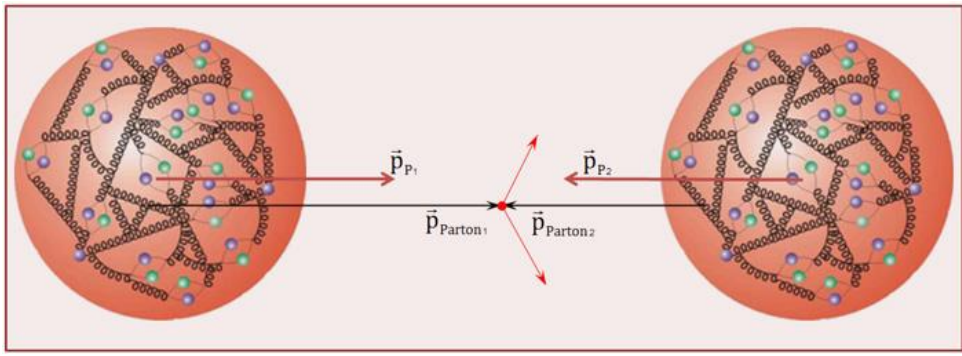
…за да се ускорят протони близо до скоростта на светлината се изисква вакуум по-дълбок от междузвездното пространство. Има 10 пъти по-голяма атмосфера на Луната, отколкото в LHC.

…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.

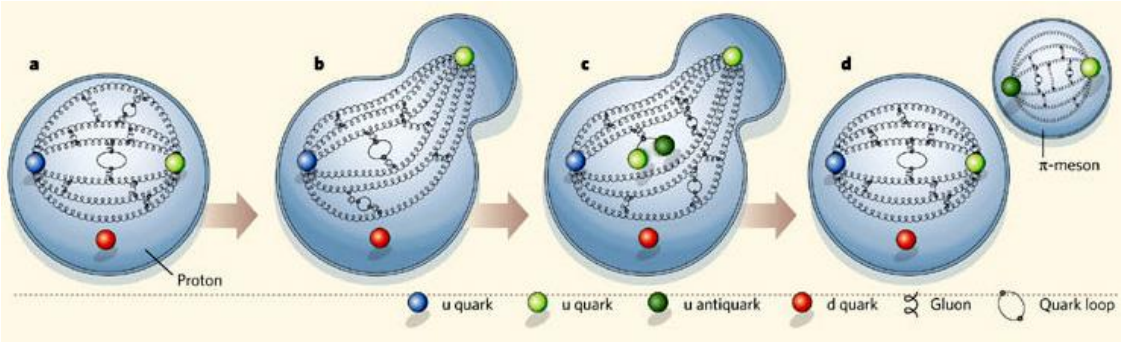


Пример на основни процеси при взаимодействието на протоните в LHC

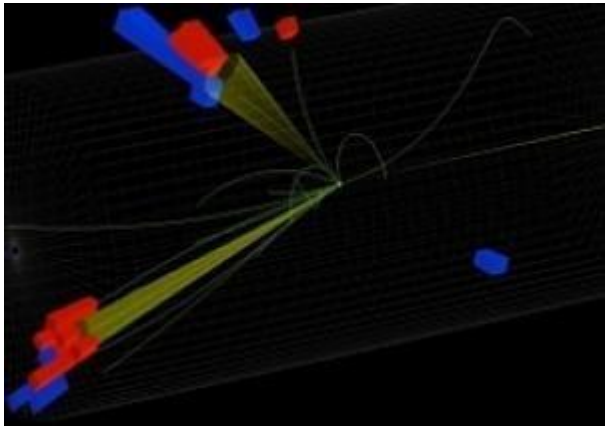
Протонът се състои от 3 кварка и глюонно поле което ги задържа – това твардение е в сила за протон с ниска енергия. При скорост близка до скоростта на светлината, в протона се появяват множество частици – кварки, антикварки и глюони – „партони“.

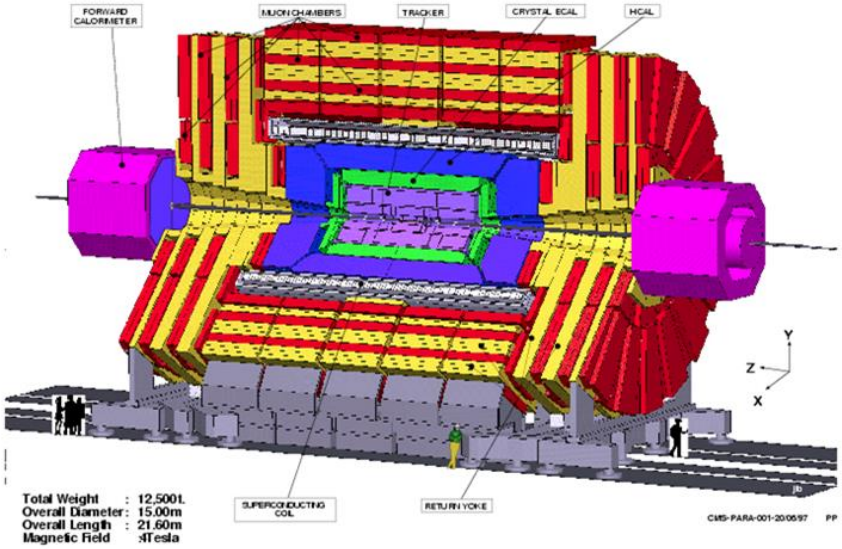


При достатъчно висок импулс един отделен кварк може да се отдели от протона, при това силата на привличане нараства с разстоянието и глюонното поле ражда допълнителни кварк-антикваркови двойки – ражда се пион или различни видове адрони /пиони, каони и др./ при многократното разкъсване на струната свързваща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

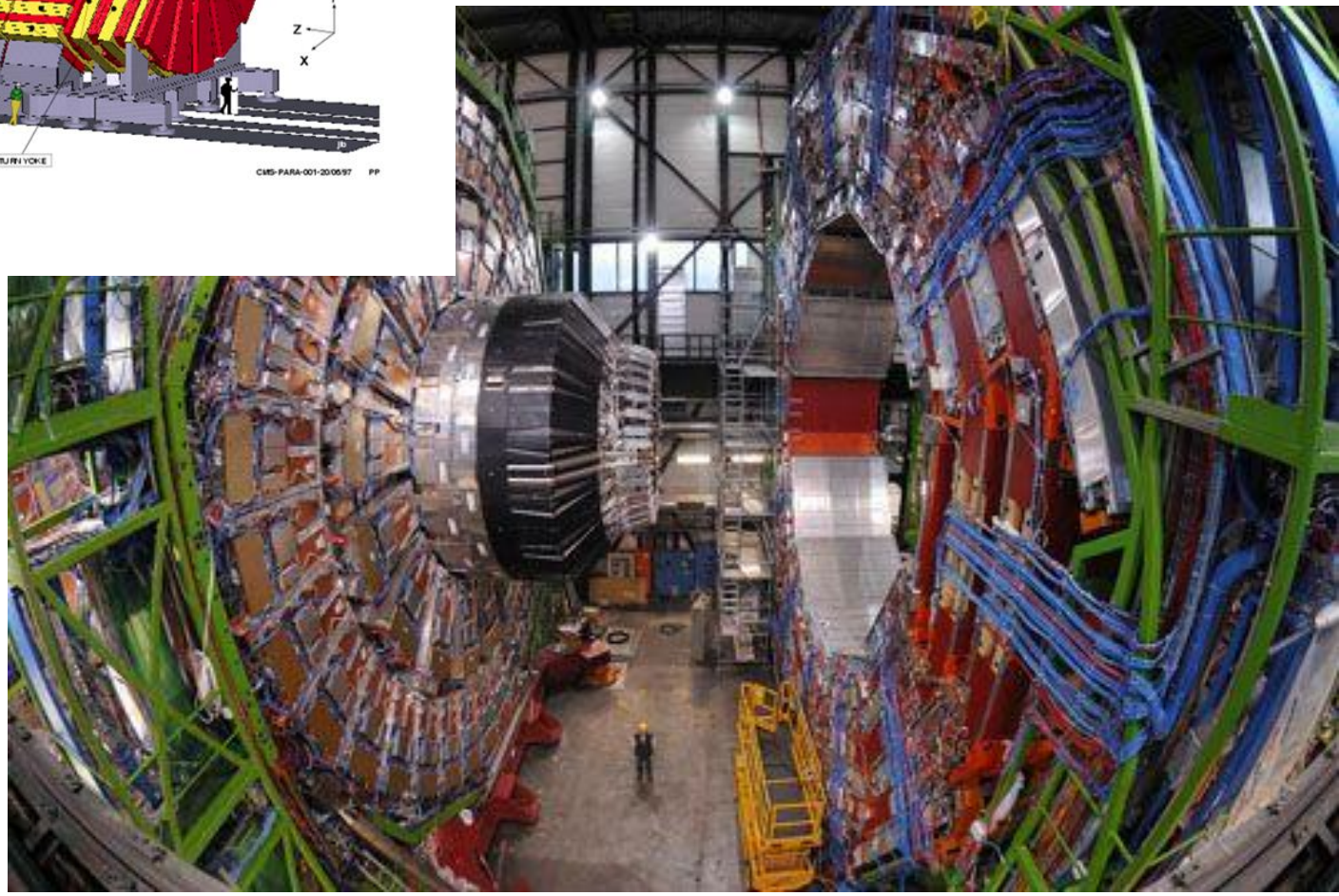


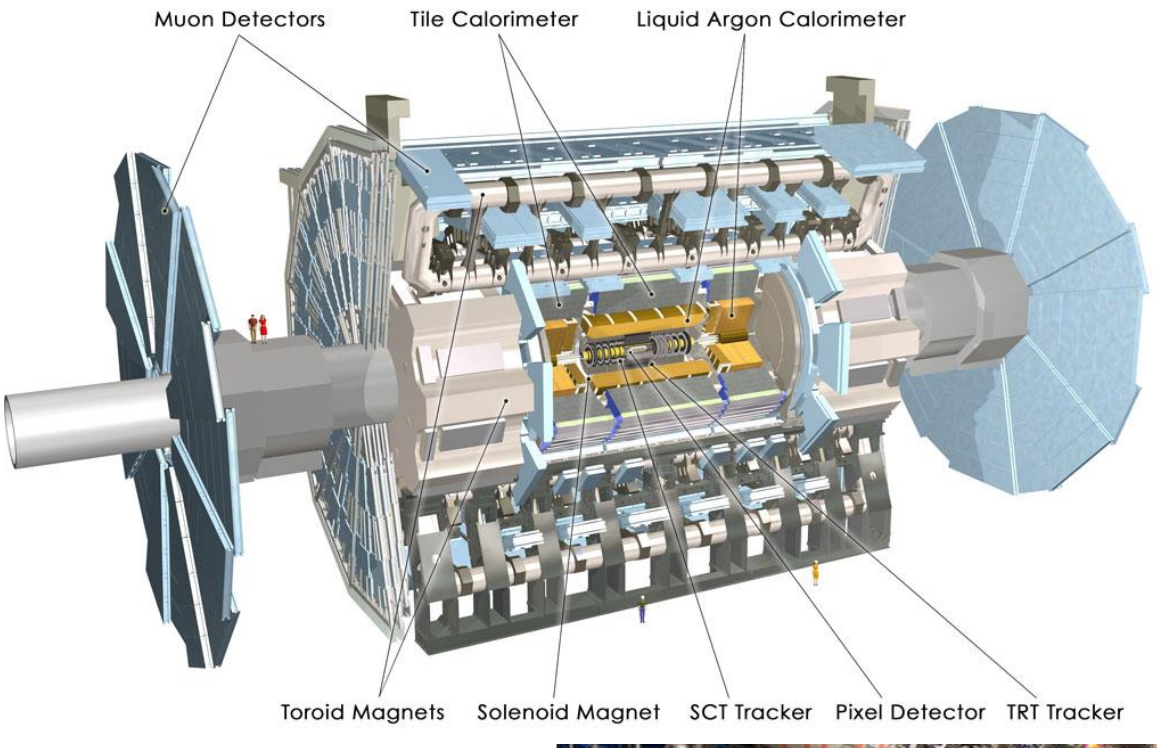
Адроните предпочитат да се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“ които се регистрират в детектора



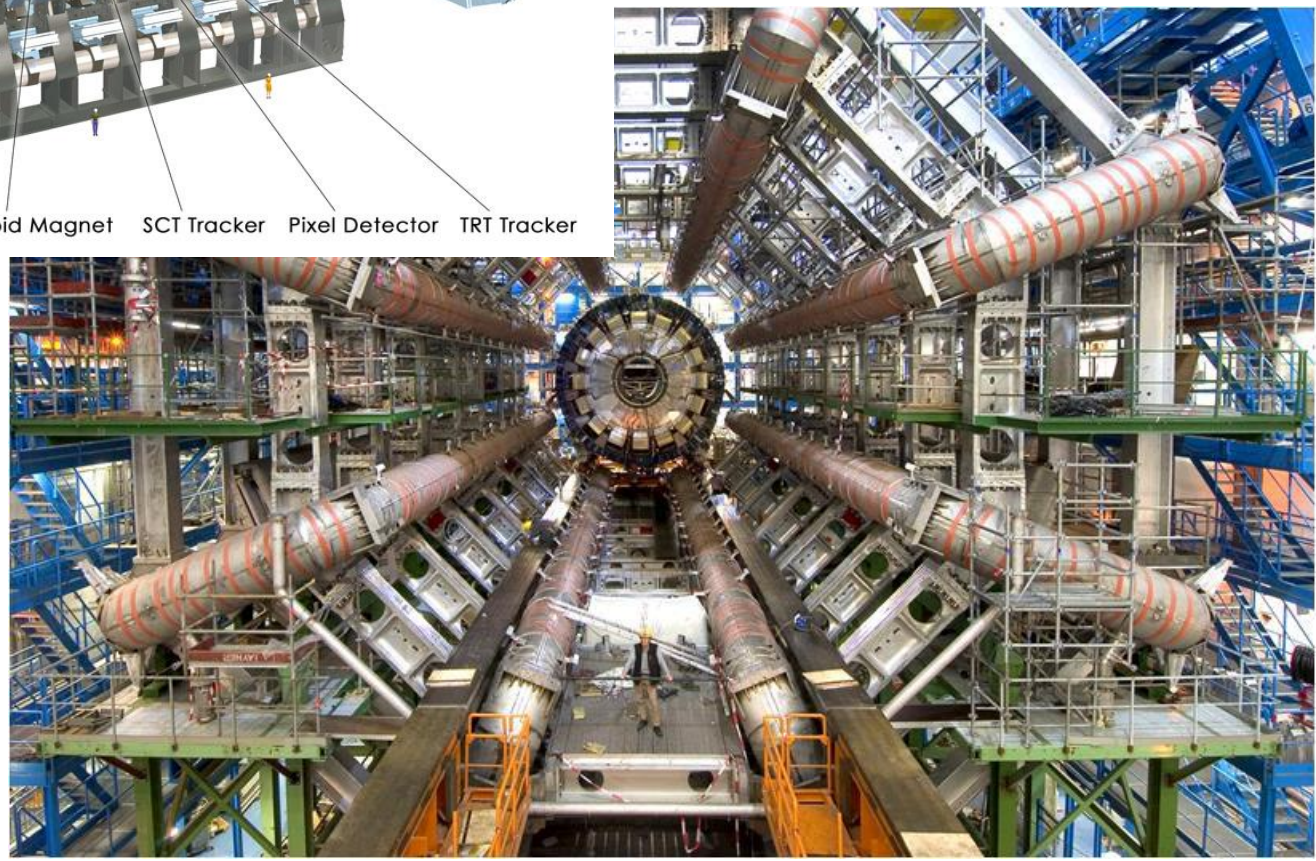

FORWARD CALORIMETER
MUON CHAMBERS
TRACKER
CRYSTAL ECAL
HCAL
Y
Z
X
Total Weight : 12,500t.
Overall Diameter : 15.00m
Overall Length : 21.60m
Magnetic Field : 4Tesla
SUPERCONDUCTING COIL
RETURN YOKE
CMS-PARA-001-20/05/97 PP

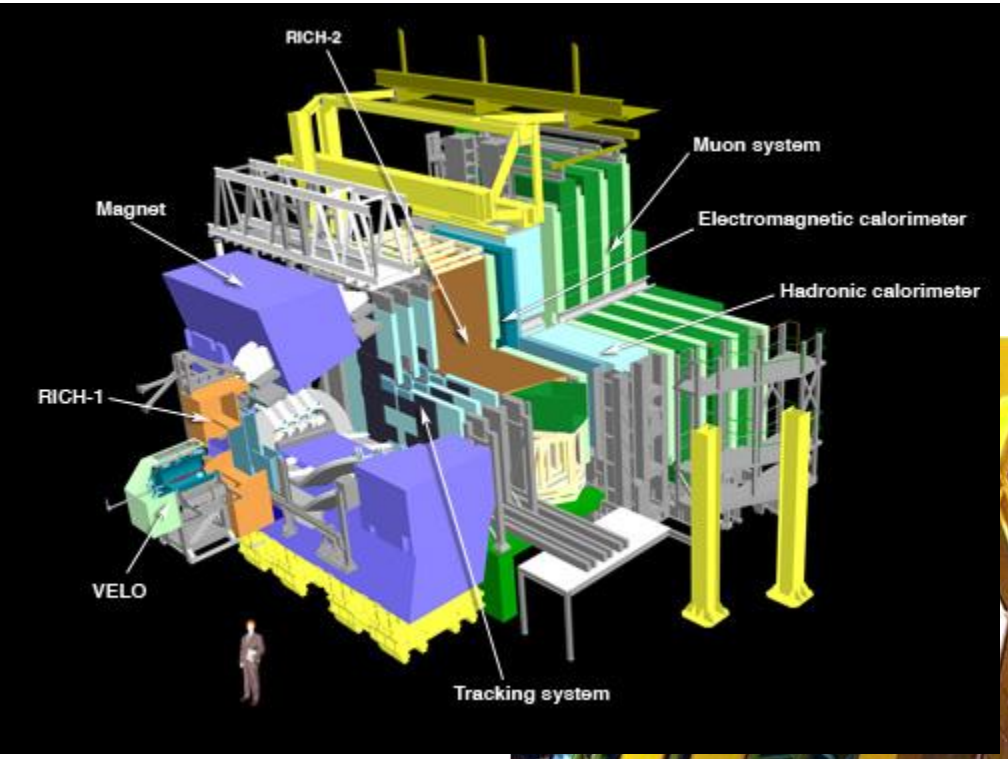
CMS



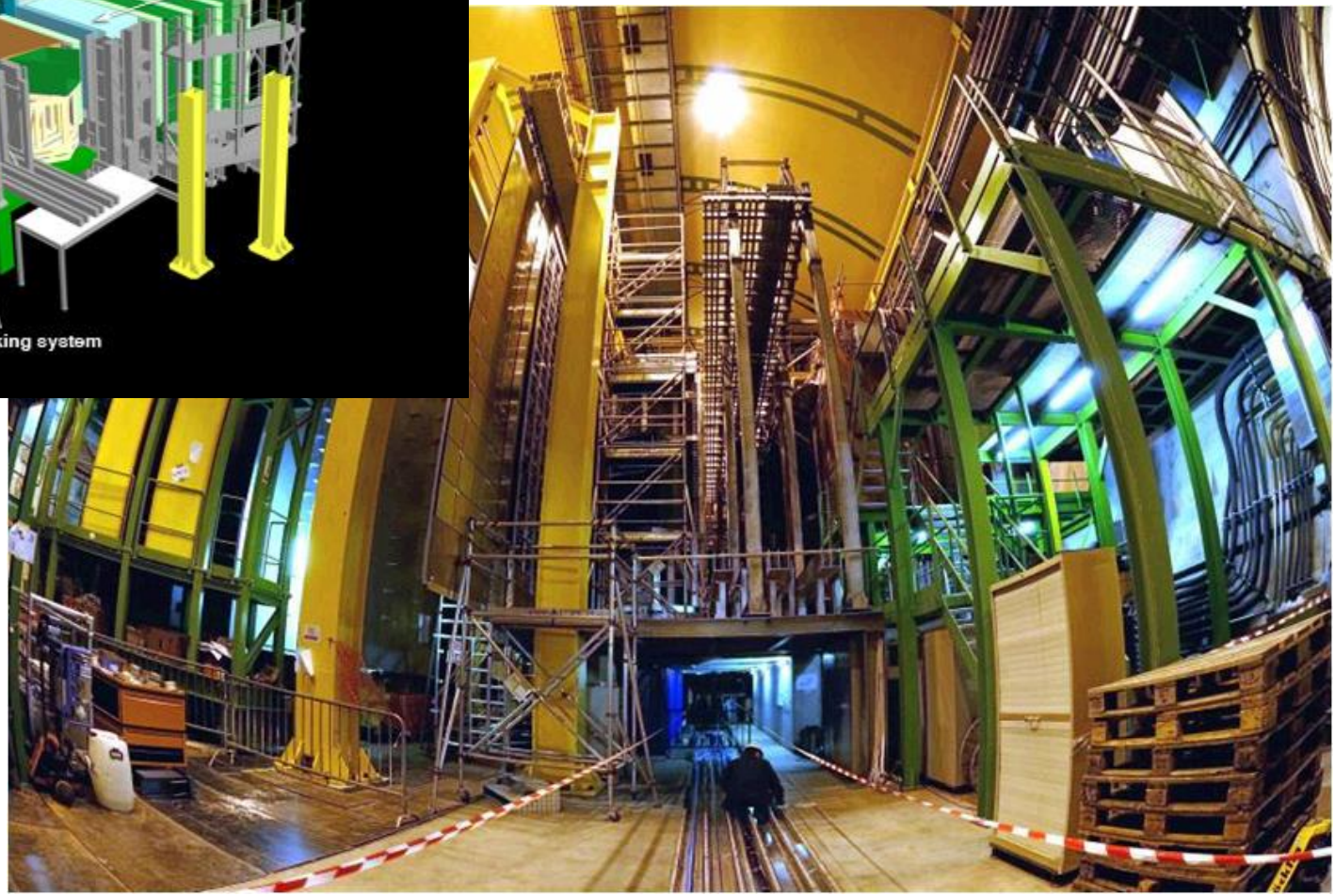

Muon Detectors
Tile Calorimeter
Liquid Argon Calorimeter
Toroid Magnets
Solenoid Magnet
SCT Tracker
Pixel Detector
TRT Tracker

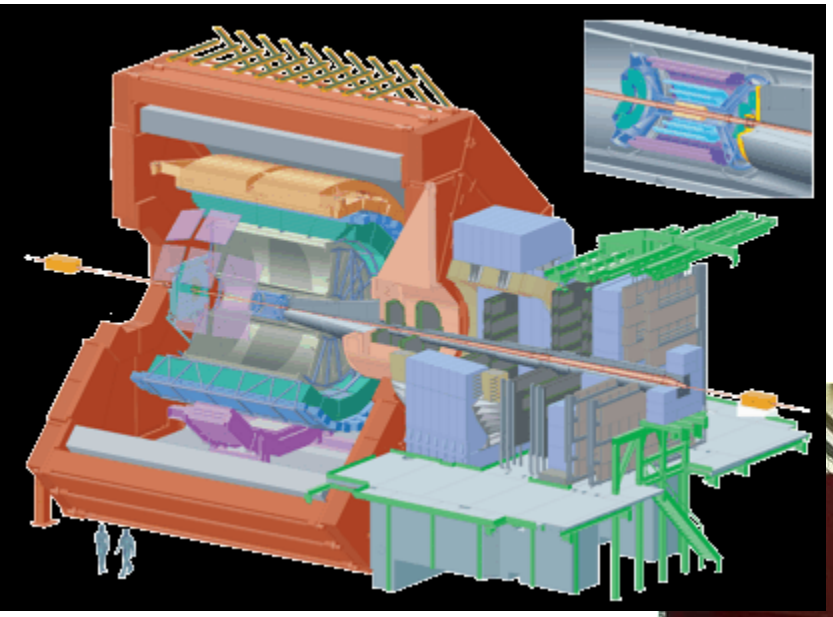
ATLAS



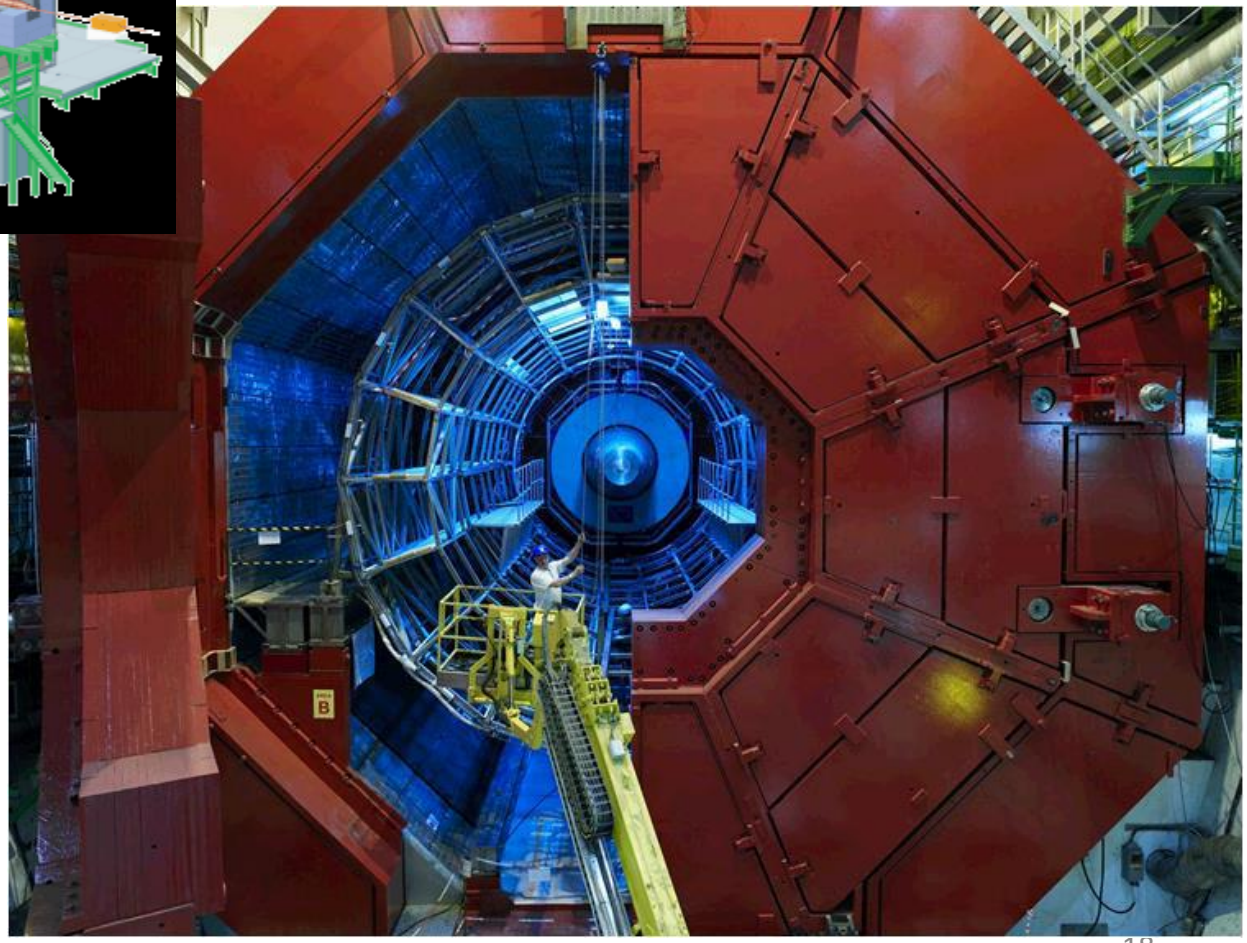

RICH-2
Muon system
Magnet
Electromagnetic calorimeter
Hadronic calorimeter
RICH-1
VELO
Tracking system

LHCb

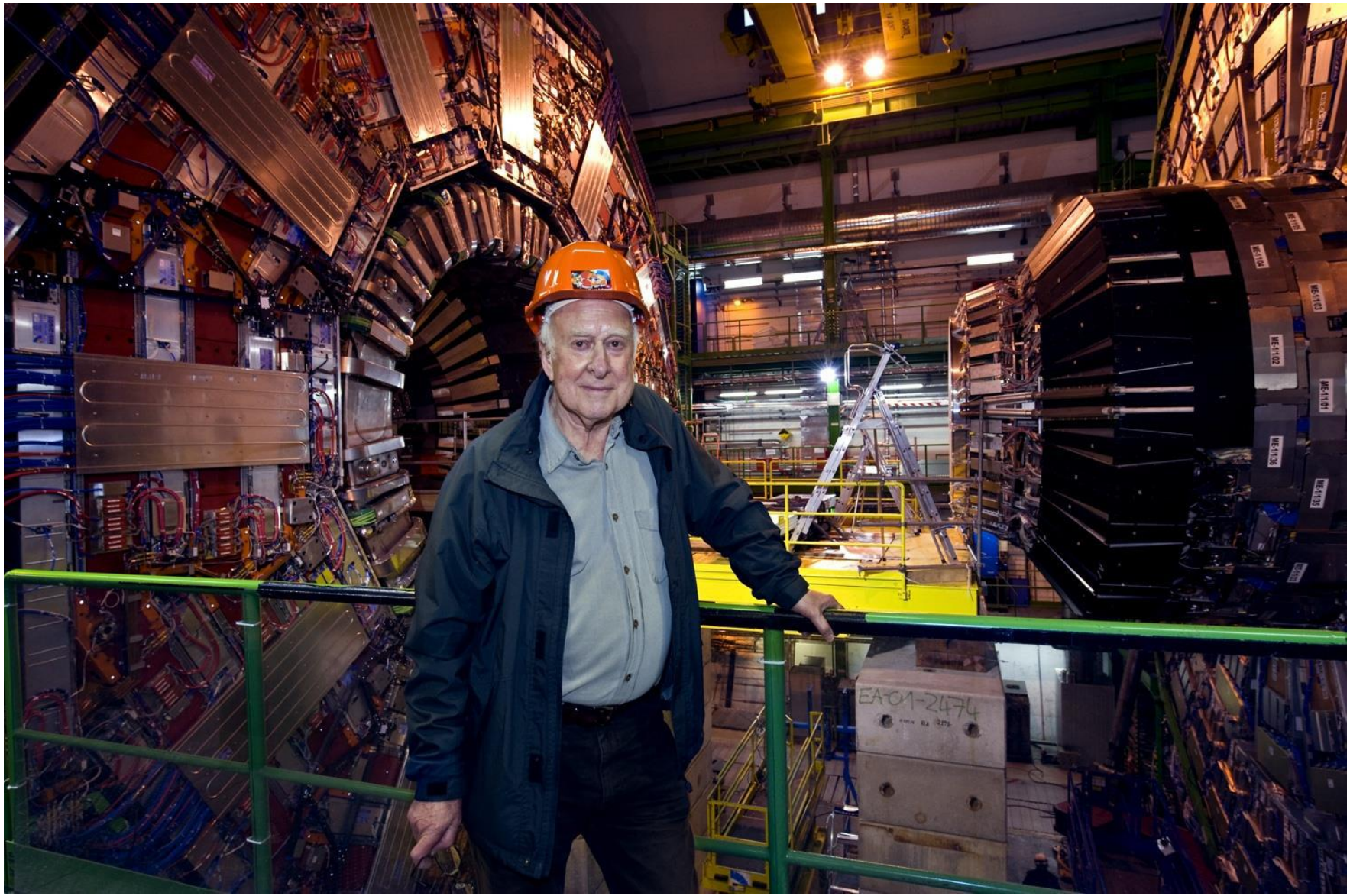




ALICE



2010 - Higgs на CMS



1.Стандартен Модел във Физиката на Елементарните Частици

Проверен много точно и в завършен вид с откриването на Хигс бозона.

2. Отворени въпроси пред Стандартния Модел – развитие на физиката на елементарните частици и космологията – историята на Вселената.

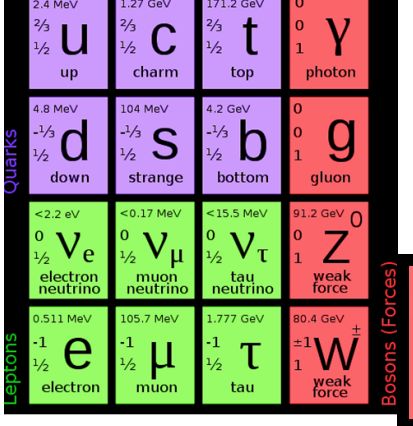
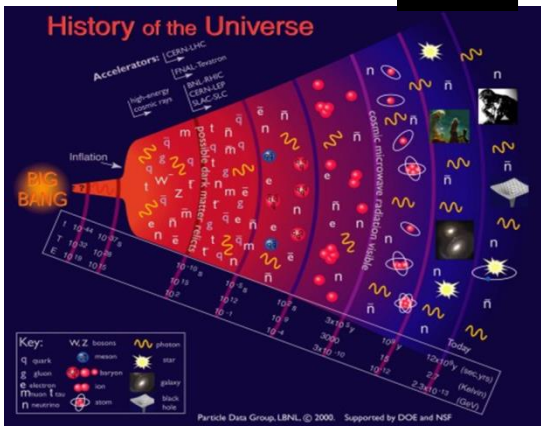
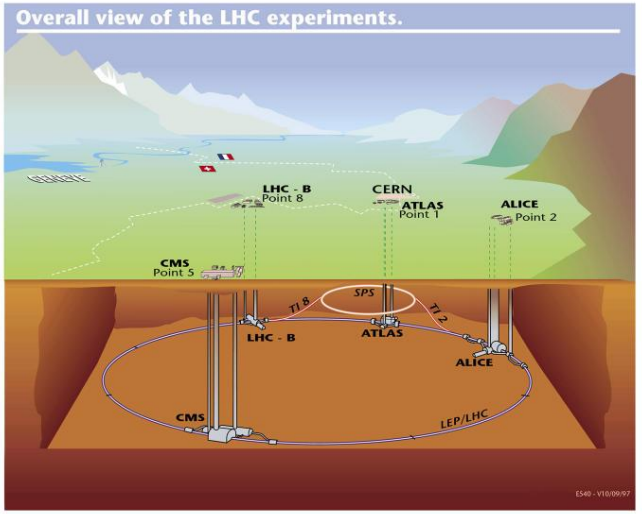
Как се определят масите на е.ч.?

Защо имаме 3 генерации на е.ч.?

Съотношение материя/антиматерия във Вселената?

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 на LHC