

სამყაროს შესწავლა მაღალი ენერგიების ექსპერიმენტით

ქეთი ქააძე

ketino.kaadze@cern.ch

კანზასის სახელმწიფო

უნივერსიტეტი

ნოემბერი 29, 2022





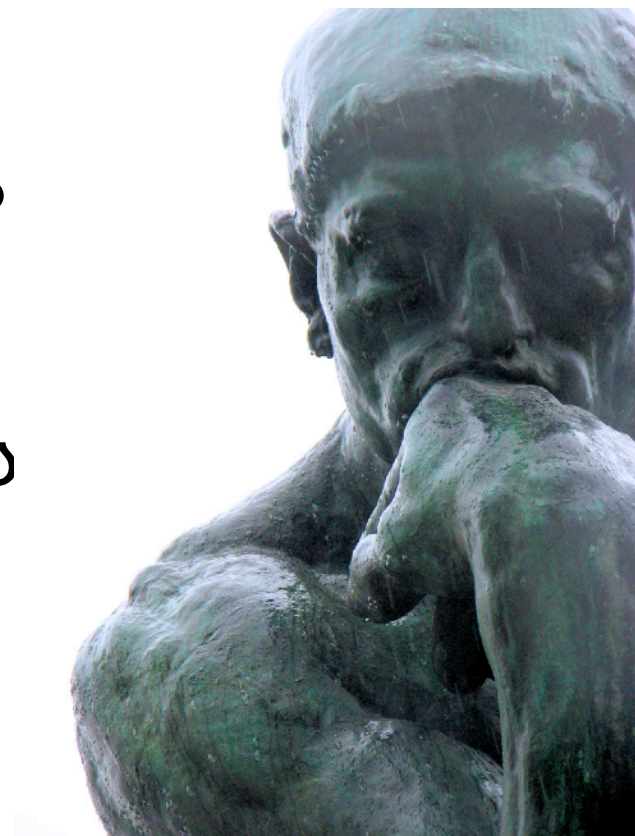
ნაწილაკთა ფიზიკა



ნაწილაკთა ფიზიკა ცდილობს უპასუხოს
შემდეგ შეკითხვებს

რისგან შედგება ყველაფერი?

რა აკავშირებს ამ ყველაფერს
ერთმანეთთან?





ნაწილაკთა ფიზიკა



ნაწილაკთა ფიზიკა ცდილობს უპასუხოს შემდეგ შეკითხვებს

რა არის მატერიის შემადგენელი
ელემენტარული ნაწილები?

რა **ძალებით** ურთიერთქმედებებენ ეს
ელემენტარული ნაწილები ერთმანეთთან?



ელემენტარული ნაწილები?



მე-18/მე-19 საუკუნე

The Periodic Table

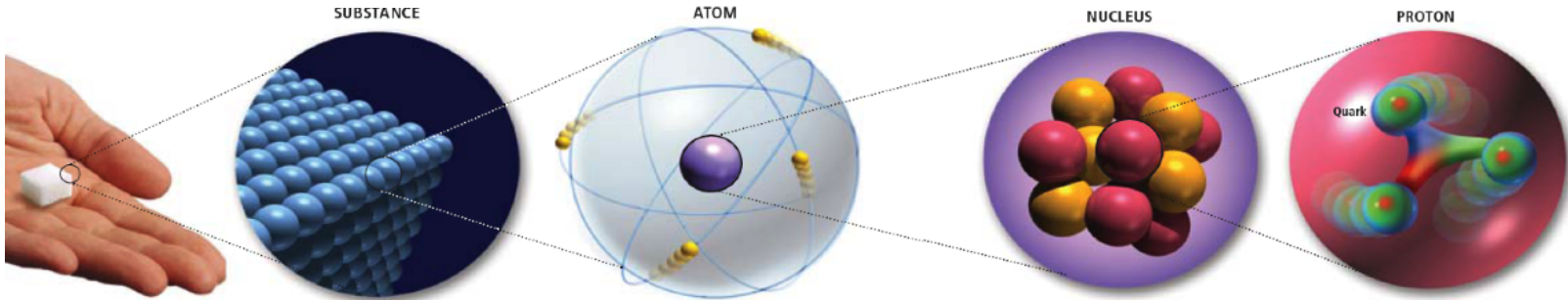
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	



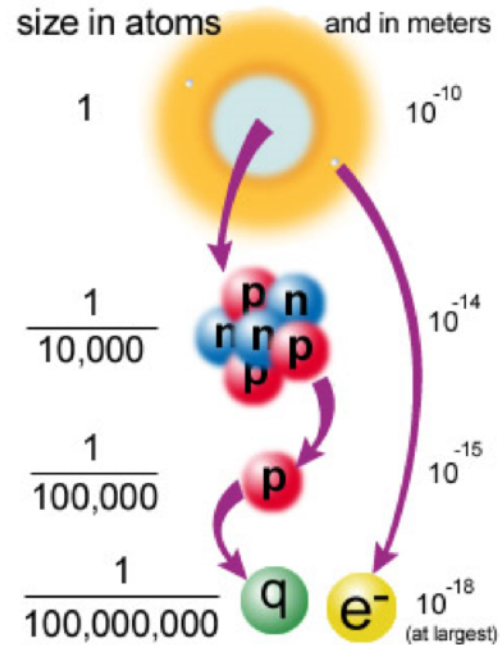
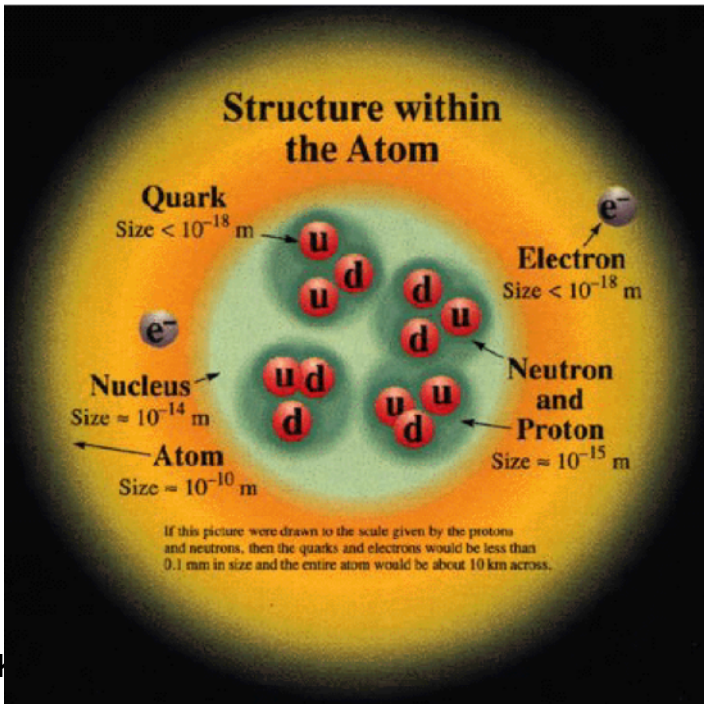
ელემენტარული ნაწილები?



მე-20 საუკუნე



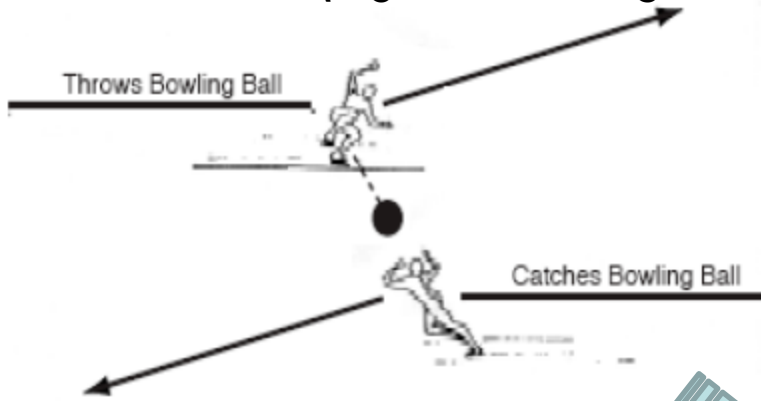
ამჟამინდელი წარმოდგენა მატერიაზე



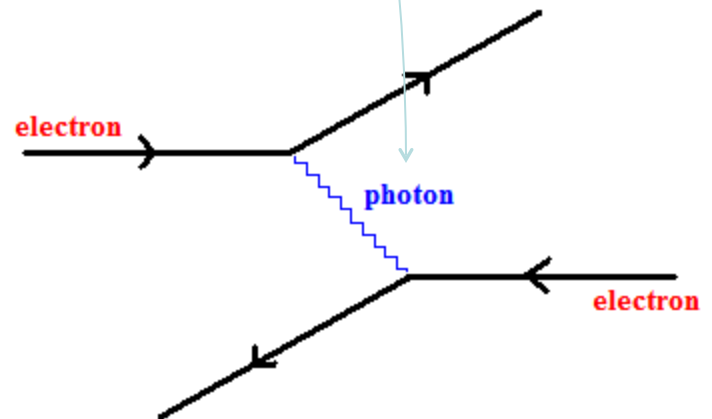
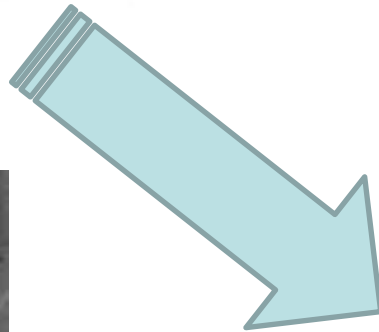


ძალა როგორც ურთიერთქმედება

ყველა ძალა წარმოდგინდება როგორც ელემენტარულ ნაწილაკთა შორის ურთიერთქმედება

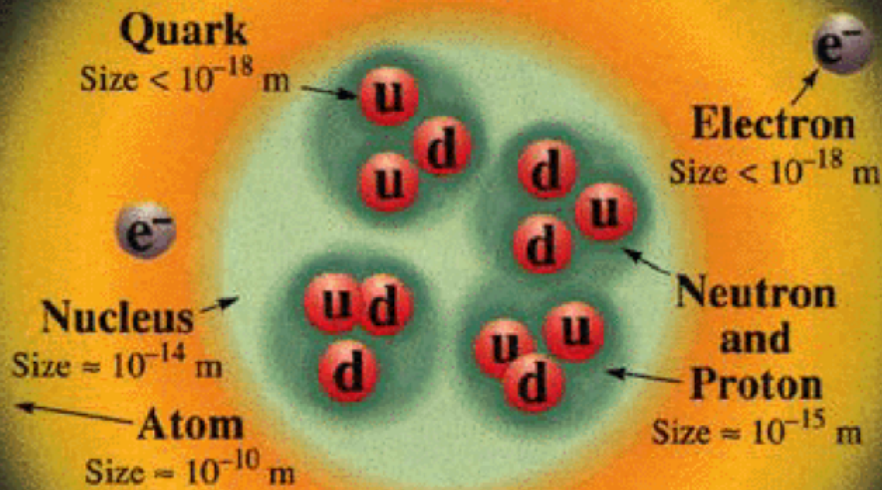


ძალის მედიატორი არის **ძალის გადამტანი** ნაწილაკი



სამი ძირითადი ურთიერთქმედება

Structure within the Atom

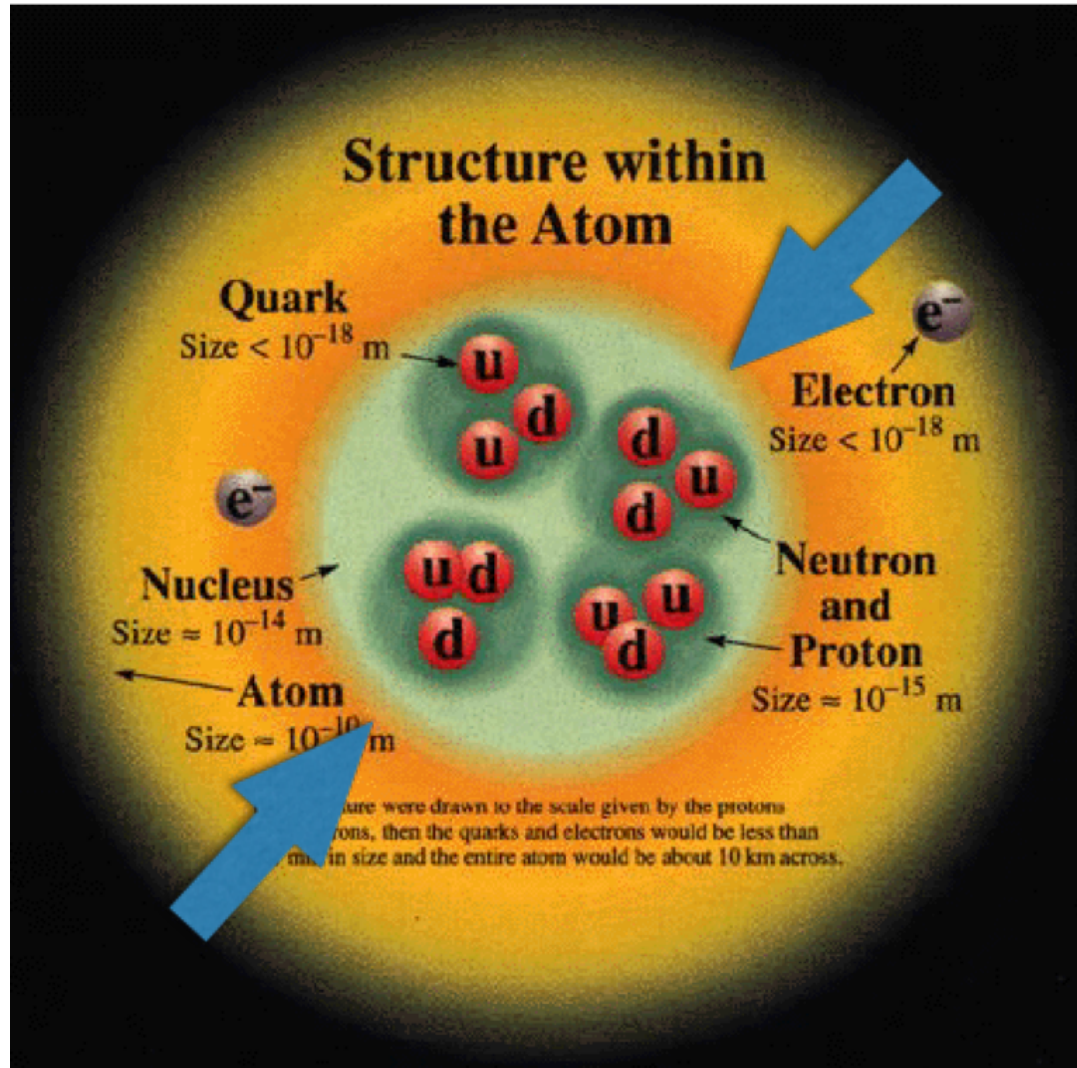


If this picture were drawn to the scale given by the protons and neutrons, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

ელექტრომაგნიტური ძალა

აკავშირებს ელექტრონებს ბირთვთან, ქმნის ატომს

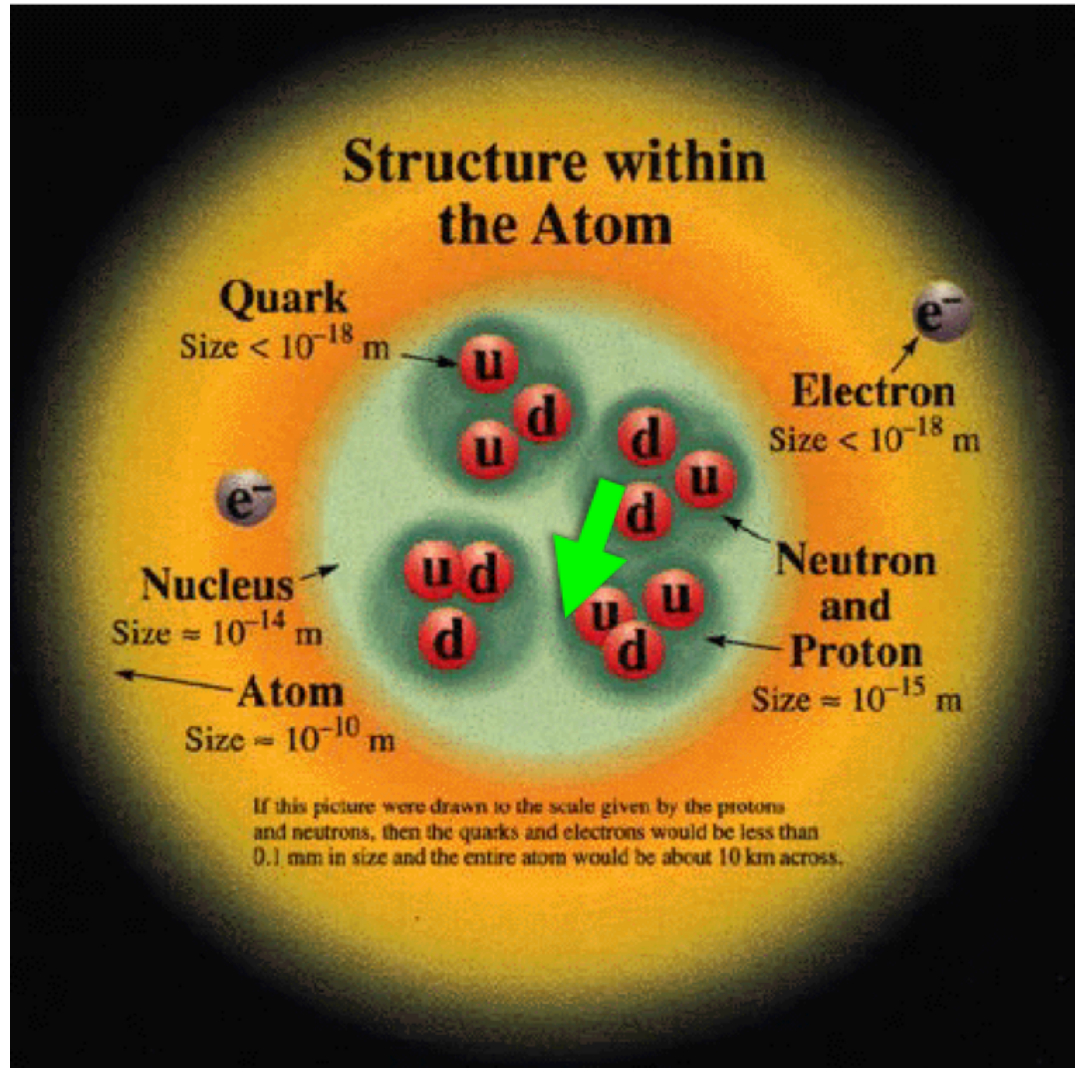
ელექტრომაგნიტური ძალის გადამტანია ფოტონი γ



ძლიერი ბირთვული ძალა

ურთიერთქმედებს კვარკებს შორის, და შესაბამისად პროტონებს და ნეიტრონებს შორის, რაც თავისთავად ქმნის ბირთვს

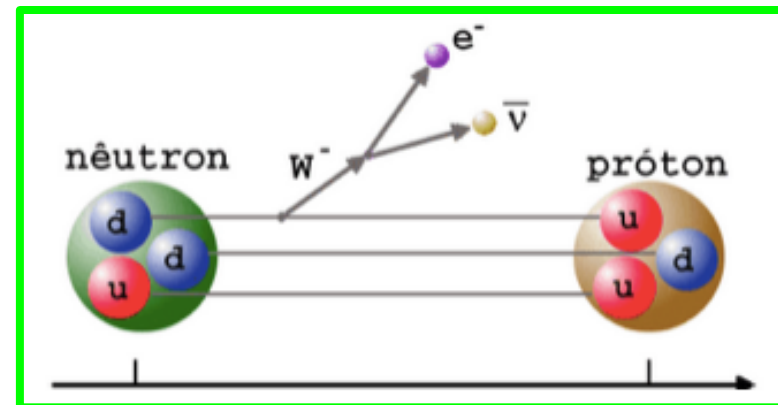
ძლიერი ძალის გადამტანია **გლუონი g**



სუსტი ბირთვული ძალა

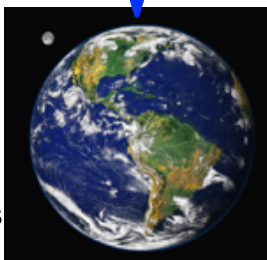
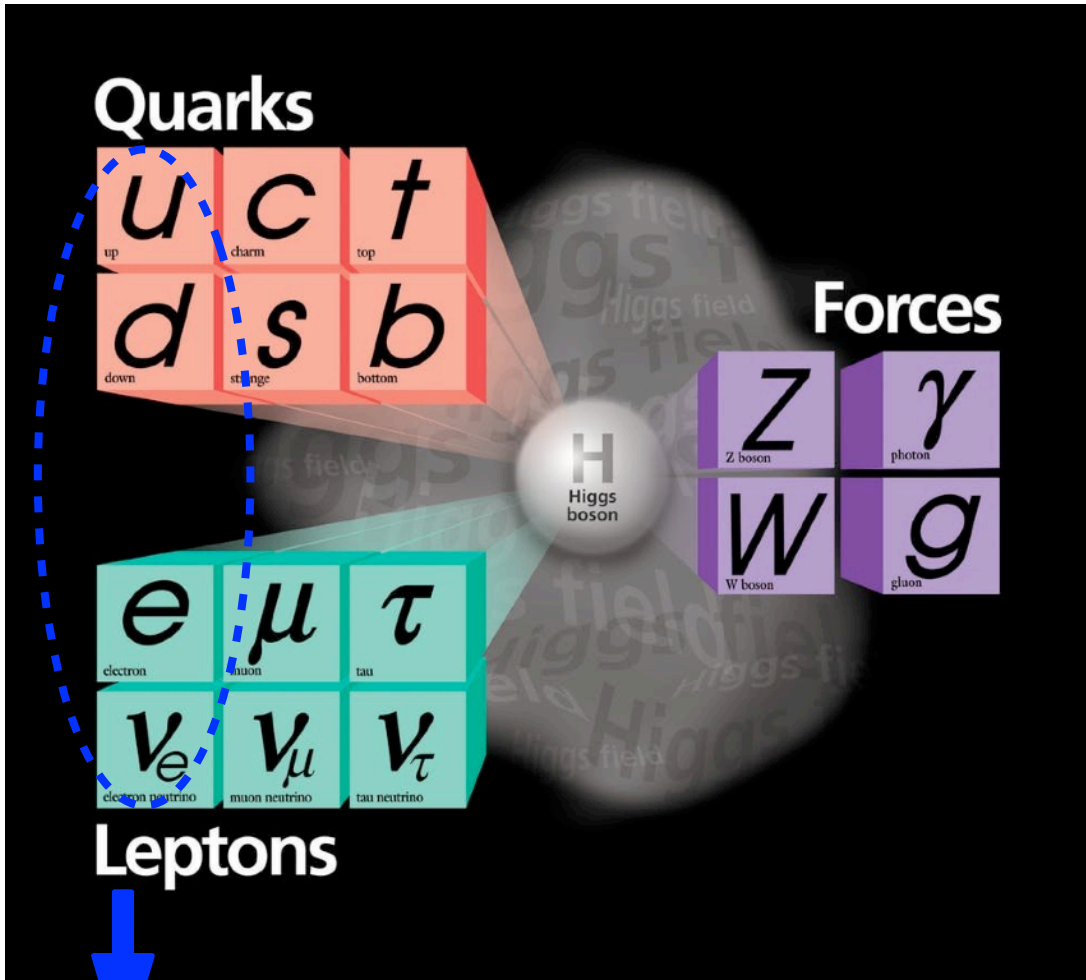
უზრუნველყოფს ბირთვულ დაშლას, უზრუნველყოფს მზეში მიმდინარე პროცესებს

სუსტი ძალის გადამტანია **Z and W± ბოზონი**





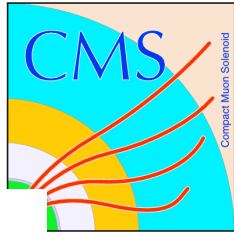
ელემენტარული ნაწილაკები დღეს



ეს არის რასაც ჩვენ “ვხედავთ” ჩვენს გარშემო მაგრამ დანარჩენებზე აუცილებელია ჩვენი სამყაროს განსაზღვრისთვის



ერთეულები



SI სისტემაში:

$$\begin{aligned}
m_e &= 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \\
e &= -1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\
s_z &= \pm \hbar/2 = \pm(1/2) \times 1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}
\end{aligned}$$

ნაწილაკთა ფიზიკაში:

$$\begin{aligned}
\hbar &= 1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 1 \\
m_e &= 0.51 \text{ MeV}/c^2 \\
e &= -1 \text{ proton charge} \\
s_z &= \pm 1/2
\end{aligned}$$

რამდენადაც ჩვენ ურთიერთობა გვაქვს სინათლის სიჩქარით მოძრავ ნაწილაკებთან ($c=3000000000$ მ/წმ), ხელსაყრელია გამოვიყენოთ სისტემა სადაც $c=1$.

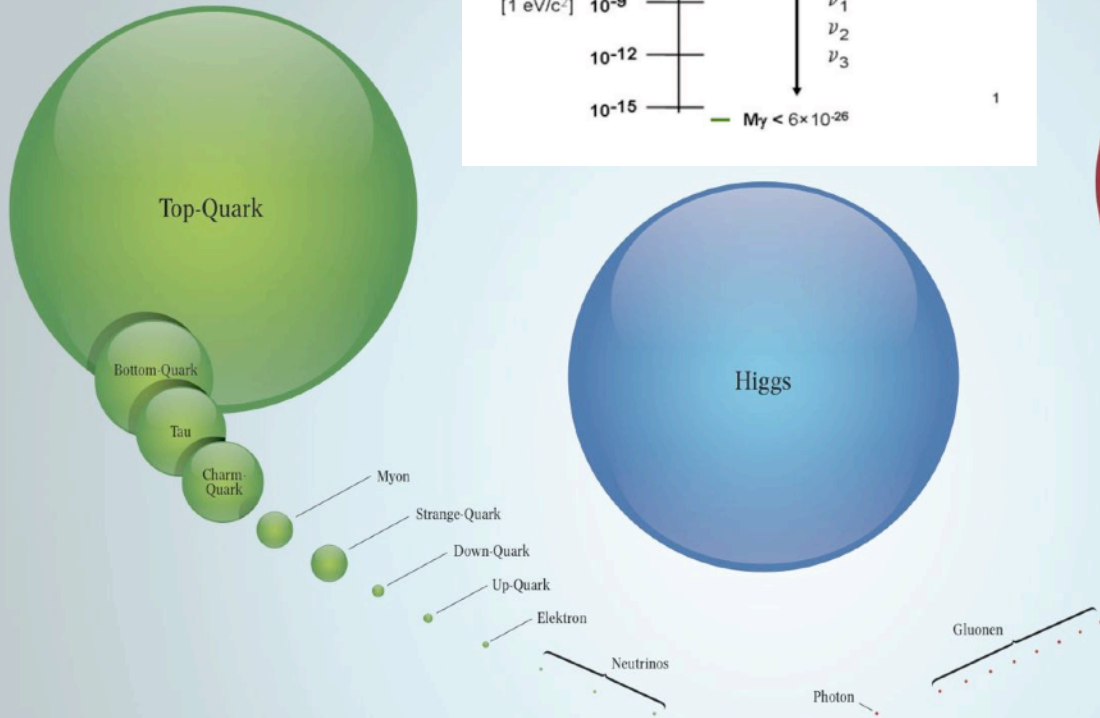
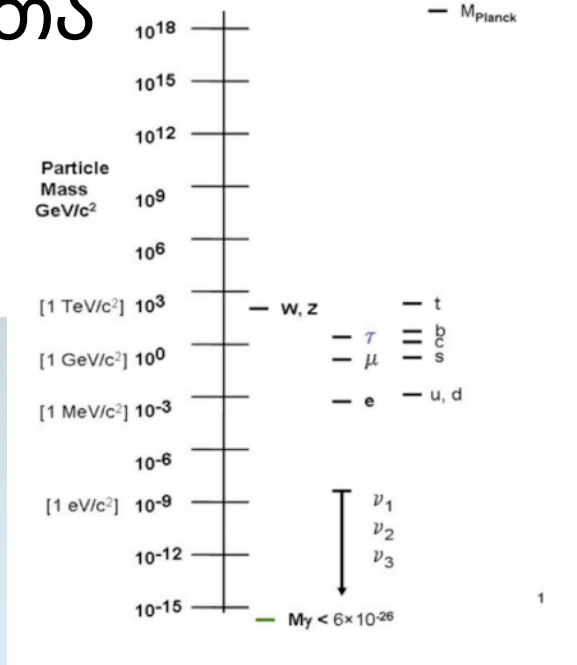
ყველაზე მთავარი ერთეული არის ენერჯიის ერთეული (eV, MeV, **GeV**, TeV, და ა.შ.) და ყველა სხვა ფიზიკური სიდიდე გამოიხატება ამ ერთეულში:

The system of units with $\hbar = 1$ and $c = 1$ is called the Natural system:

$$\begin{aligned}
1 \text{ unit of length} &= 1 \text{ GeV}^{-1} \simeq 0.1978 \text{ fm} \\
1 \text{ unit of time} &= 1 \text{ GeV}^{-1} \simeq 0.6588 \cdot 10^{-24} \text{ s} \\
1 \text{ unit of energy} &= 1 \text{ GeV} \\
1 \text{ unit of momentum} &= 1 \text{ GeV} \quad \text{sometimes GeV}/c \\
1 \text{ unit of mass} &= 1 \text{ GeV} \quad \text{sometimes GeV}/c^2
\end{aligned}$$



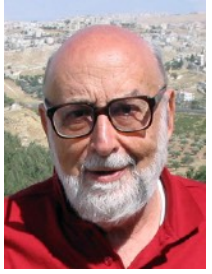
ნაწილაკთა მასები



In 1964



R. Brout



F. Englert



P. Higgs



G. Guralnik



C. Hagen

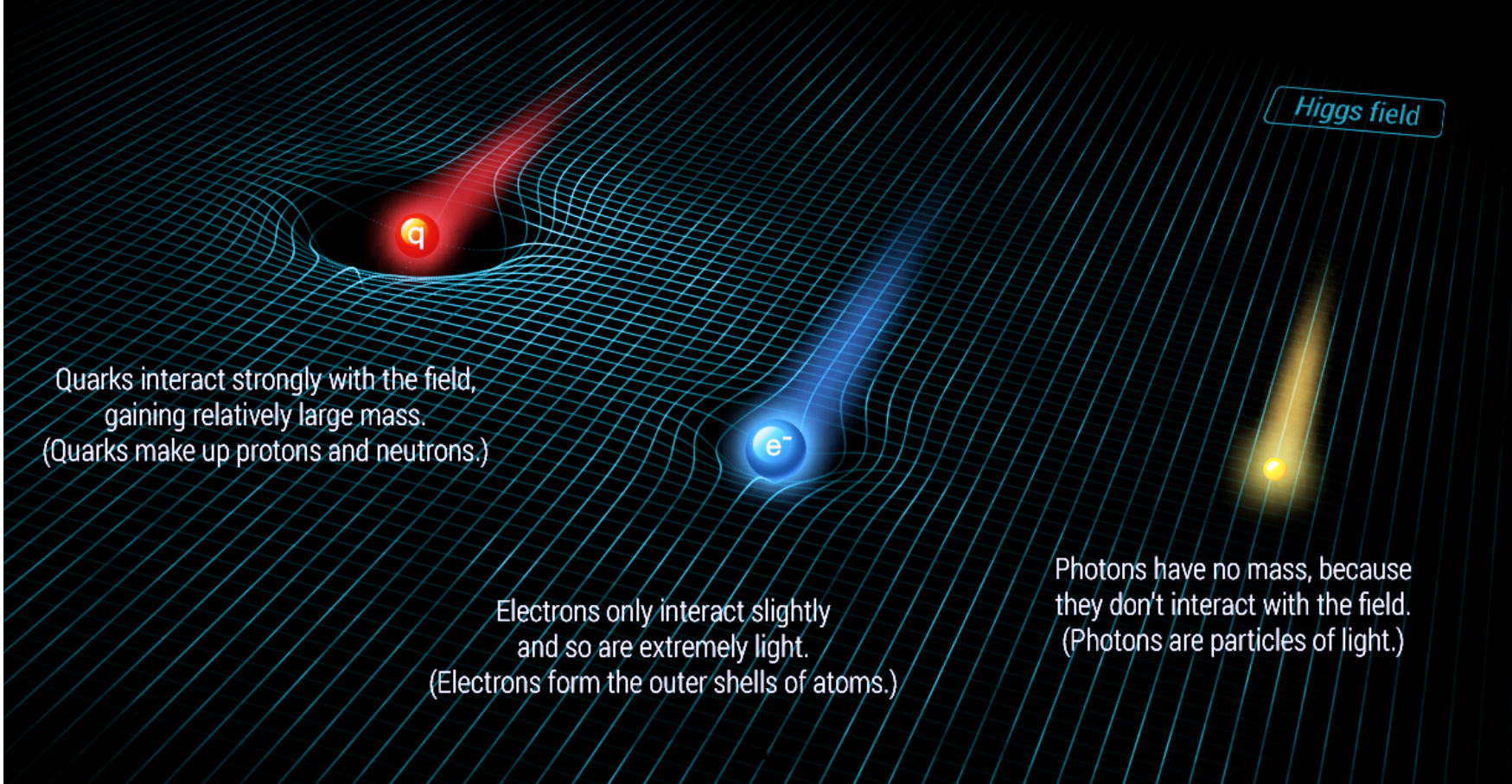


T. Kibble

at rest: $E=mc^2$
with momentum p : $E^2=(mc^2)^2 + (pc)^2$
massless: $E^2=(pc)^2$

The Higgs Field

Existing everywhere, the Higgs field gives particles their mass.



Quarks interact strongly with the field, gaining relatively large mass. (Quarks make up protons and neutrons.)

Electrons only interact slightly and so are extremely light. (Electrons form the outer shells of atoms.)

Photons have no mass, because they don't interact with the field. (Photons are particles of light.)



ჰიგისის ველის ანალოგია



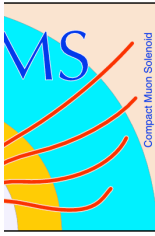


ONE OF THE THINGS PEOPLE PREDICT WILL COME OUT IS

THE HIGGS BOSON

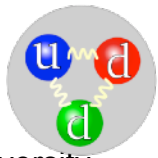
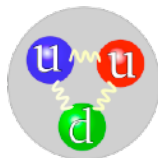
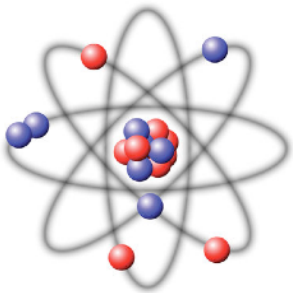


THE HIGGS IS THE PARTICLE RESPONSIBLE FOR GIVING MASS TO OTHER PARTICLES.



ჰიგსის ნაწილაკი პასუხისმგებელია ჩვენს აქ ყოფნაზე.

მაგრამ ის არაა პასუხისმგებელი ჩვენს მასაზე. ჩვენი მასა განპირობებულია ატომური მასით, ანუ ძირითადად ბირთვული მასით, ანუ პროტონების და ნეიტრონების დამაკავშირებელი ძლიერი ურთიერთქმედების ენერჯით: $E=mc^2$



პროტონების და ნეიტრონების მასა გაცილებით აღემატება სამი კვარკის მასას ერთად აღებულს

Mass of proton \gg 3*mass of quark



ნანილაკთა ფიზიკა



ექსპერიმენტულად...

მიზანია:

* გამოიწვიო ნანილაკების ურთიერთქმედება და შეისწავლო წარმოქმნილი ნანილაკების თვისებები.

* გაზომო წარმოქმნილი ნანილაკების ენერგია, მიმართულება, მუხტი რაც შეიძლება მეტი სიზუსტით

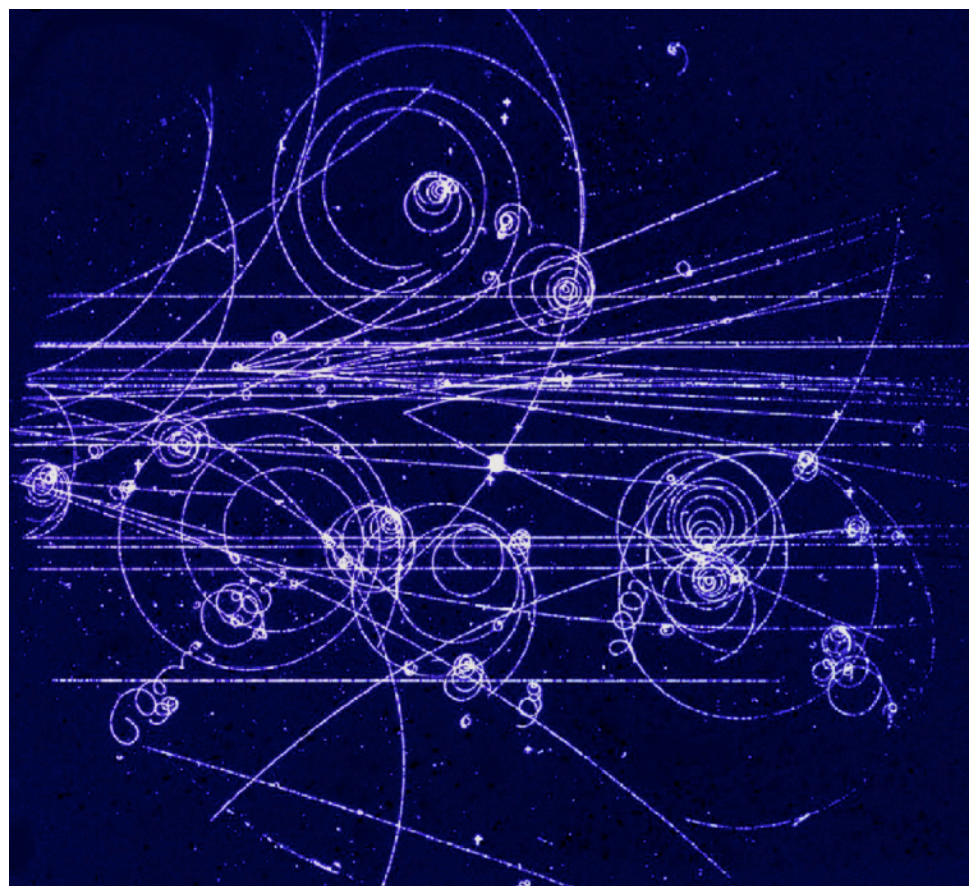
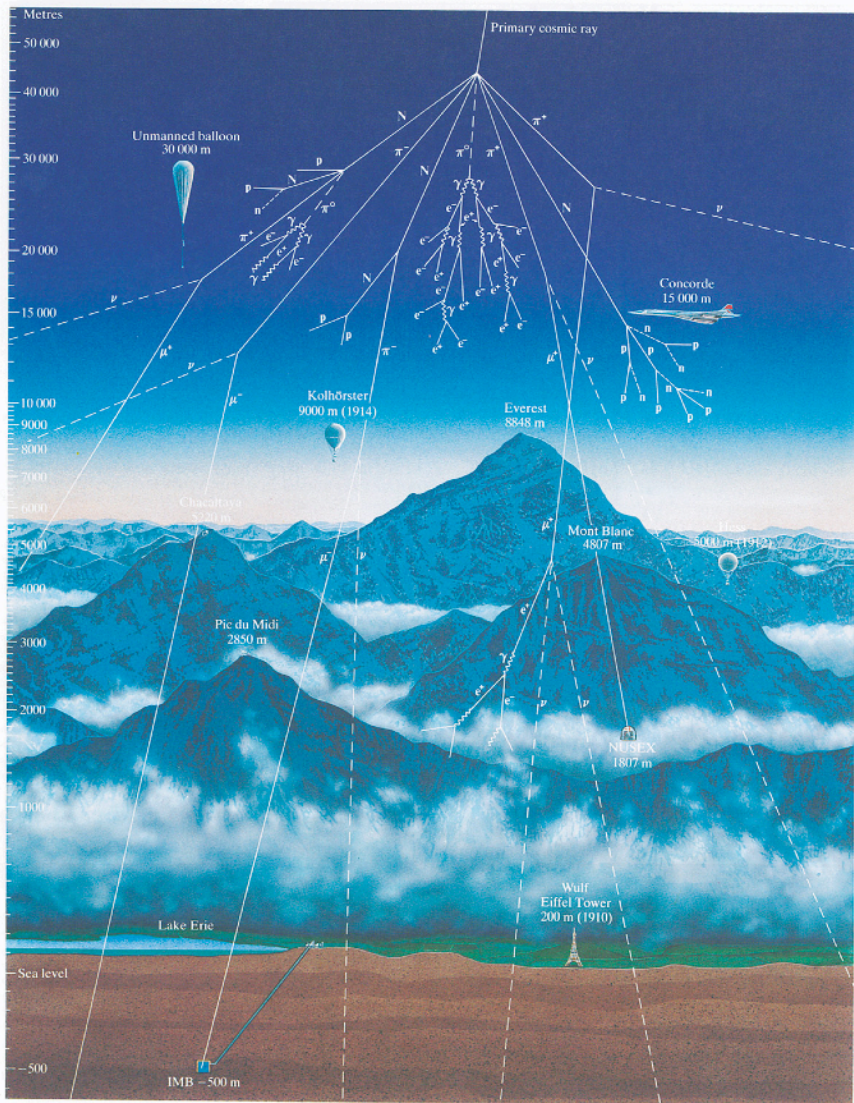


გარკვეული ხნის წინ



ნაწილაკების წყარო

ნაწილაკების ტრაექტორიები ღრუბელის კამერაში



როგორ ვსწავლობთ ნაწილაკებს?



კოსმოსურ სხივებზე დაკვირვების ნაკლი:

- საინტერესო მოვლენები ხდება იშვიათად
- რთულია მათი დეტექტორებში დაფიქსირება

ამან გამოიწვია ამარქარებლების განვითარება

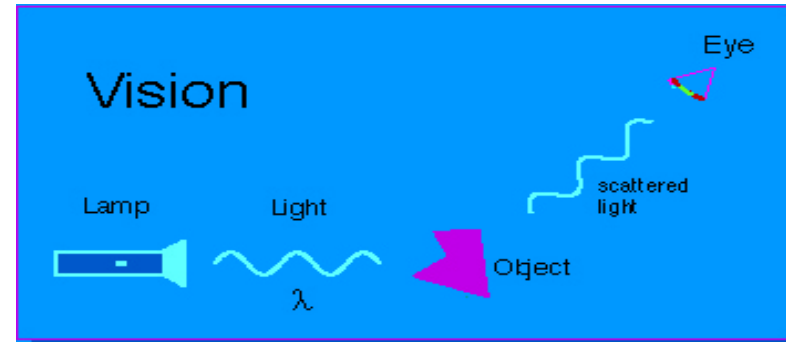
შეაჯახე ნაწილაკები და დააკვირდი რა მოხდება!



რამდენად მცირე ზომების გარჩევაა შესაძლებელი?

- რა არის ყველაზე მცირე ზომა რისი დანახვაც შეიძლება მიკროსკოპში?

- სინათლის სხივი არის ჩვენი სინჯი, ამიტომ მიკროსკოპში ვერ შეისწავლი უფრო მცირეს ვიდრე სინათლის ტალღის სიგრძეა, ანუ ~ 500 ნანო-მ ან 5×10^{-5} სმ



- ბუნებაში არსებული უფრო მცირე ნაწილაკების შესასწავლად საჭიროა სხვა სინჯი (სინათლე არ გამოდგება). აქ გვადგება ტალღურ-ნაწილაკობრივი დუალიზმი

- ტალღის სიგრძე უკუპროპორციულია ნაწილაკის იმპულსის
- ენერჯიის გაზრდით შესაძლებელია უფრო მცირე ობიექტების გარჩევა

ნაწილაკი \longleftrightarrow $\lambda = h/P$



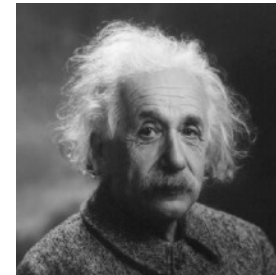
ამარქარებლების ენერჯის მნიშვნელობა



- მაღალი ენერჯია საშუალებას გვაძლევს
 - შევისწავლოთ მატერიის უმცირესი ნაწილები ($E \sim 1/\text{size}$)
ანუ “ძლიერი მიკროსკოპი”
 - აღმოვაჩინოთ უფრო მასიური ნაწილაკები ($E = mc^2$)
 - შევისწავლოთ ადრეული სამყაროს (უფრო მაღალი ტემპერატურის) პროცესები ($E = kT$)



de Broglie



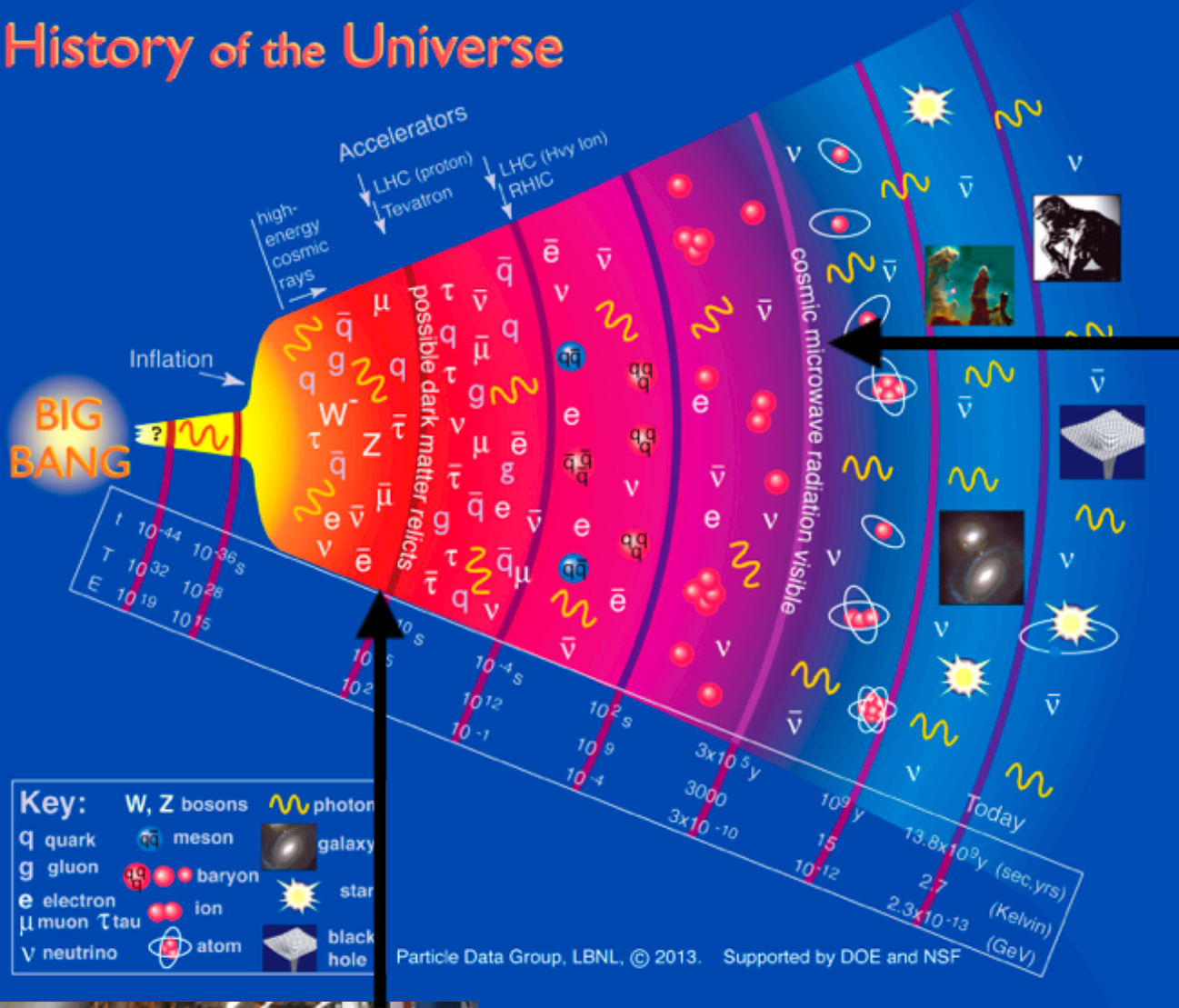
Einstein



Boltzmann

ეს ყველაფერი ხდება კონტროლირებად გარემოში

History of the Universe



ტელესკოპები აკვირდებიან დიდ მასშტაბებს (კოსმოსს, გალაქტიკებს, და ა.შ.), ამით უყურებენ მოვლენებს კოსმოსური მიკროტალღური გამოსხივების ეტაპზე და მის შემდგომ.

ჩვენი მიზანია სამყაროს სანყისი პროცესების შეცნობა



ამარქარებლები აკვირდებიან უმცირეს ობიექტებს, ამით ქმნიან იმ კონდიციას რაც იყო დიდი აფეთქებიდან 10^{-12} წმ-ში



CERN –

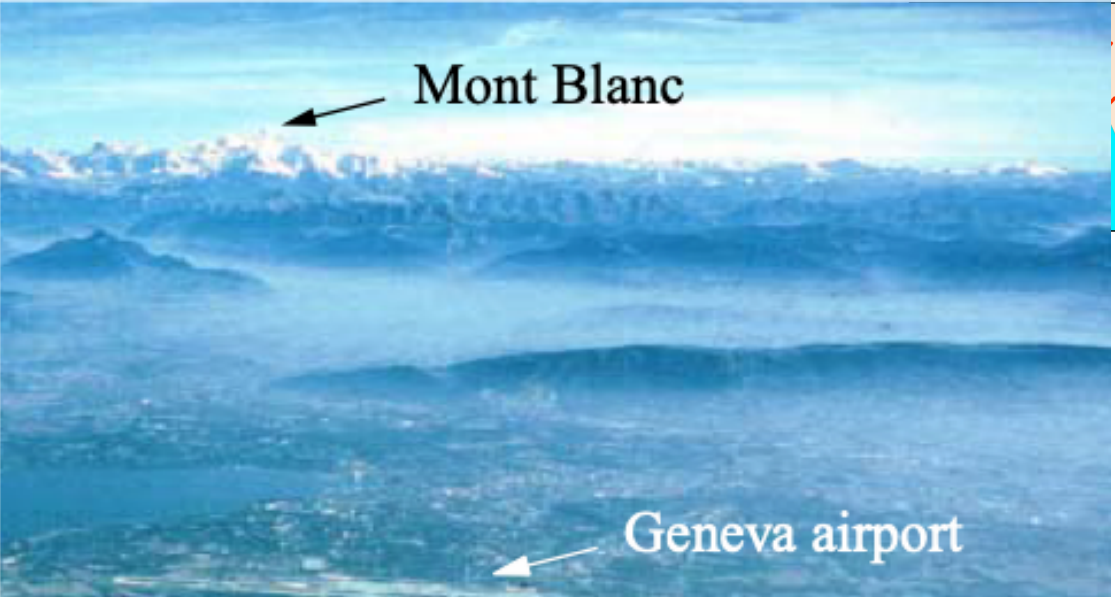
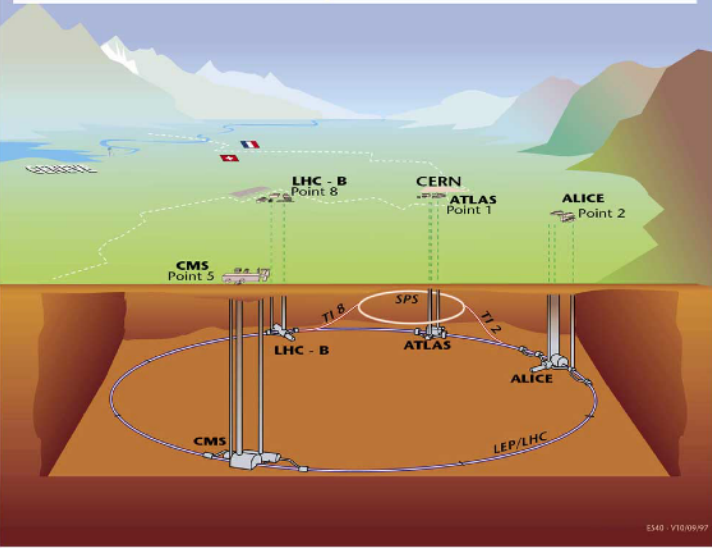


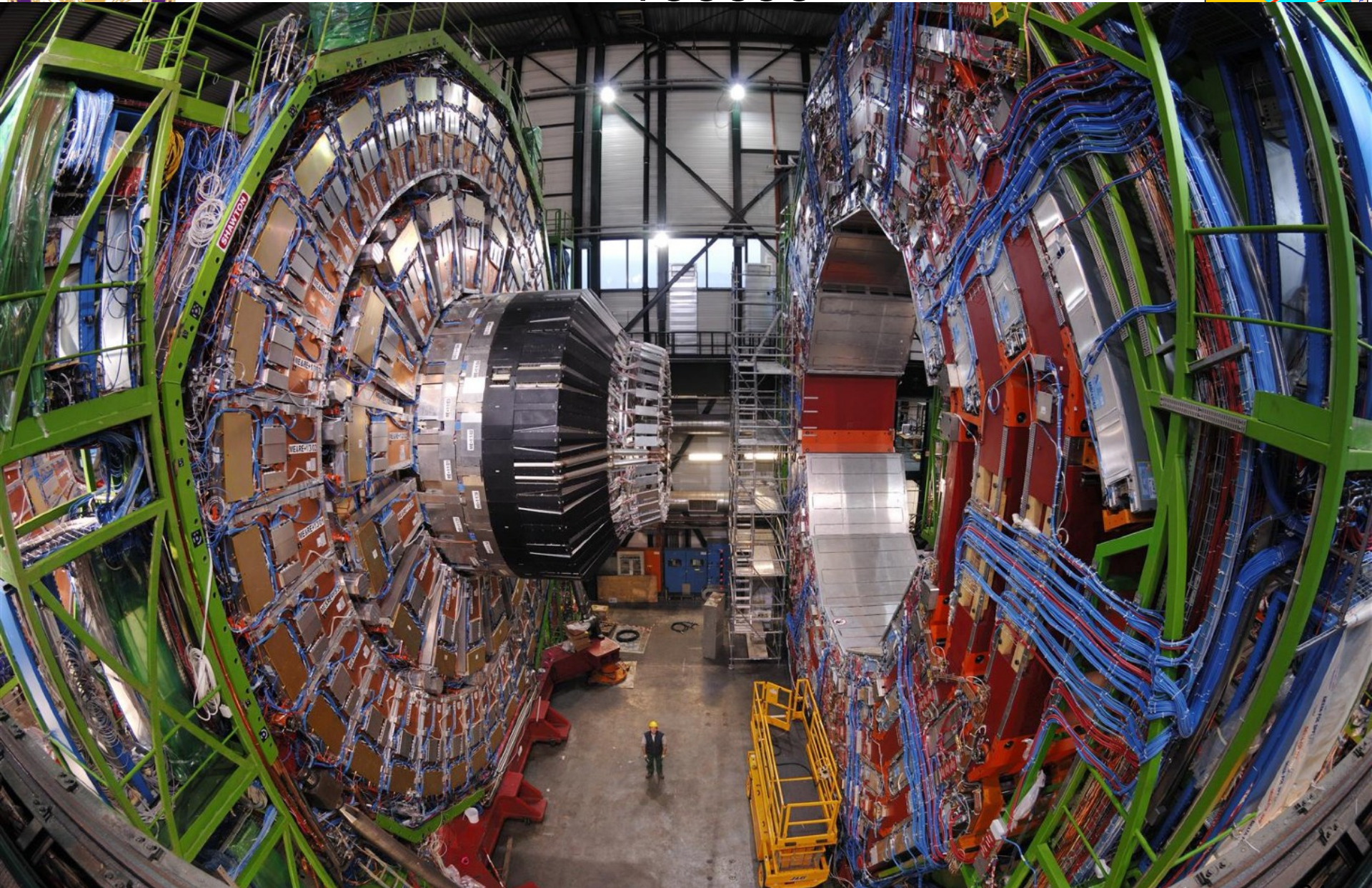
ბირთვული კვლევის ევროპული ცენტრი

In one of the world's **biggest** laboratories...



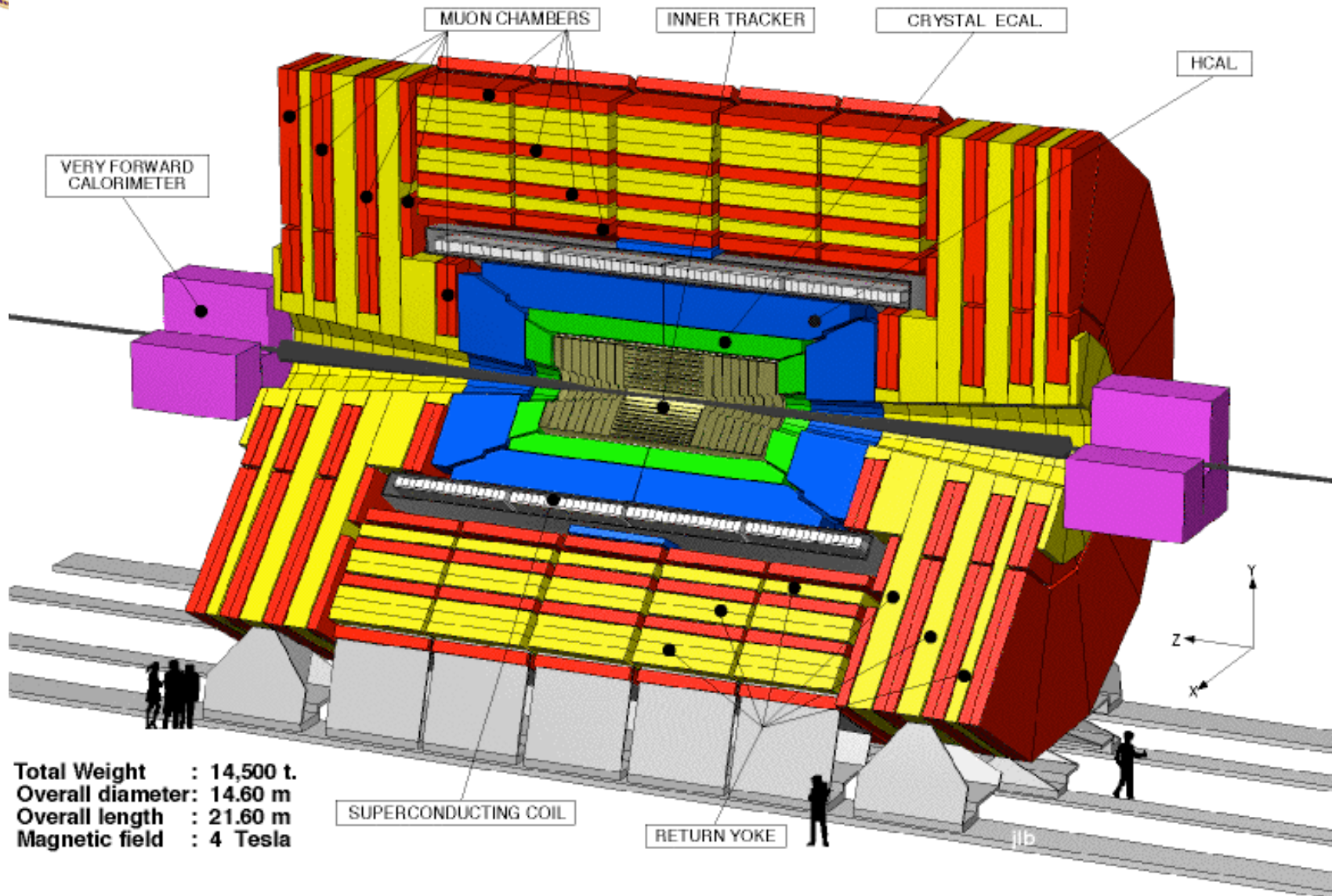
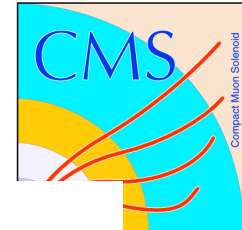
Overall view of the LHC experiments.







CMS დეტექტორი



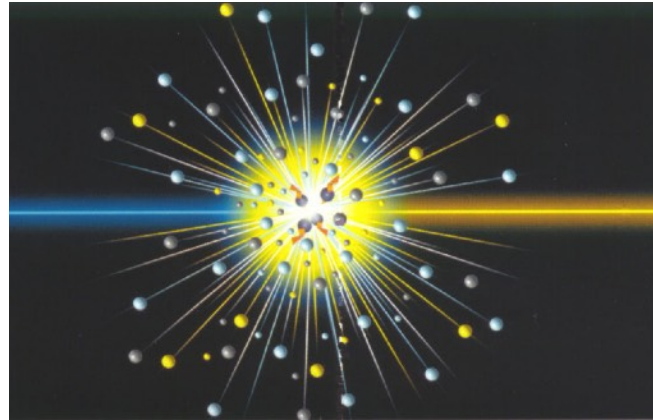
Total Weight : 14,500 t.
 Overall diameter: 14.60 m
 Overall length : 21.60 m
 Magnetic field : 4 Tesla



რა ხდება შეჯახებისას?

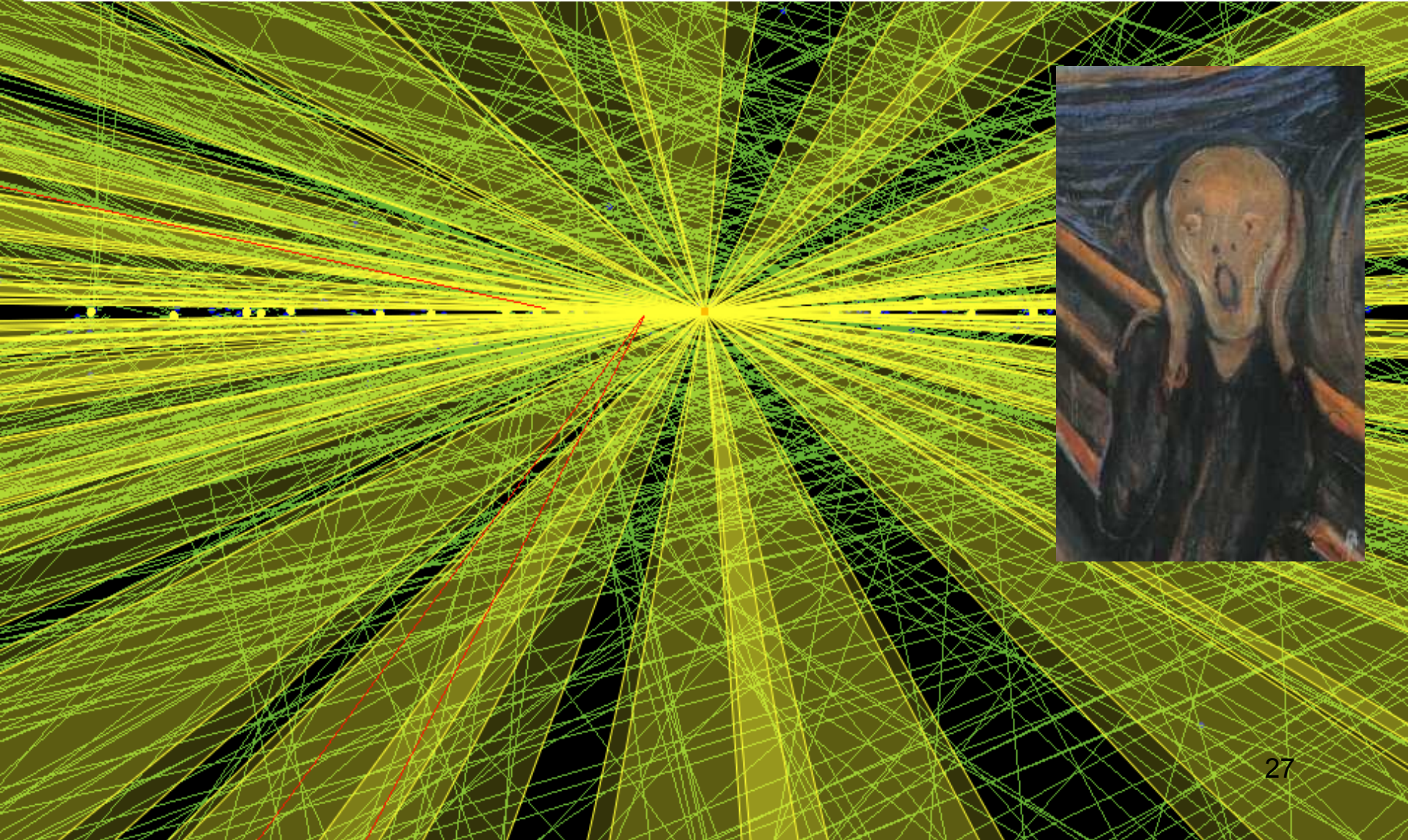


- შეჯახებისას გამოყოფილი ენერგია წარმოქმნის სხვა ნაწილაკებს $E = mc^2$

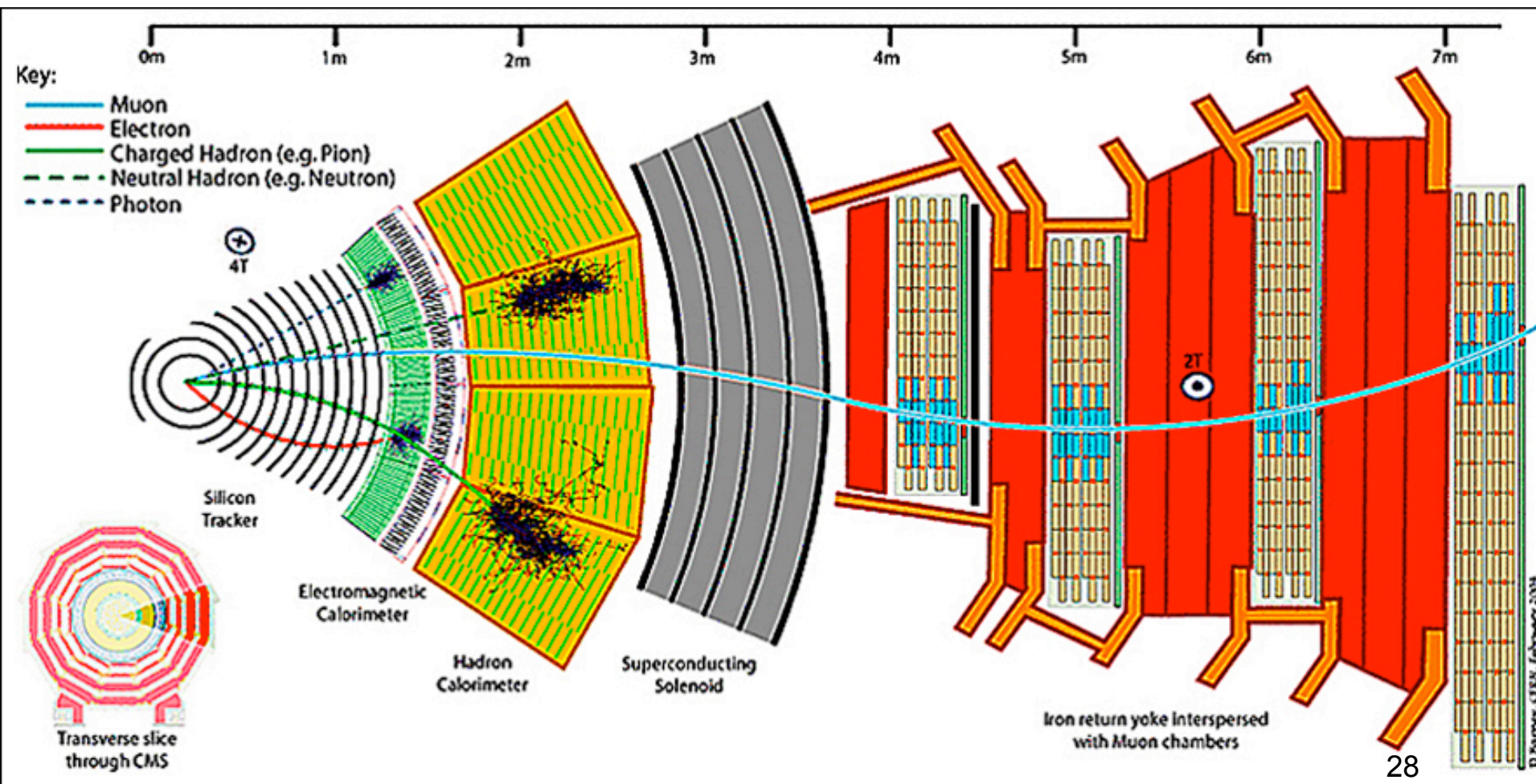


- ნაწილაკთა დეტექტორი აფიქსირებს წარმოქმნილ ნაწილაკებს
- წარმოქმნილი ნაწილაკების შესწავლა (რამდენია, რა არის მათი თვისებები) საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ რა მოხდა შეჯახებისას

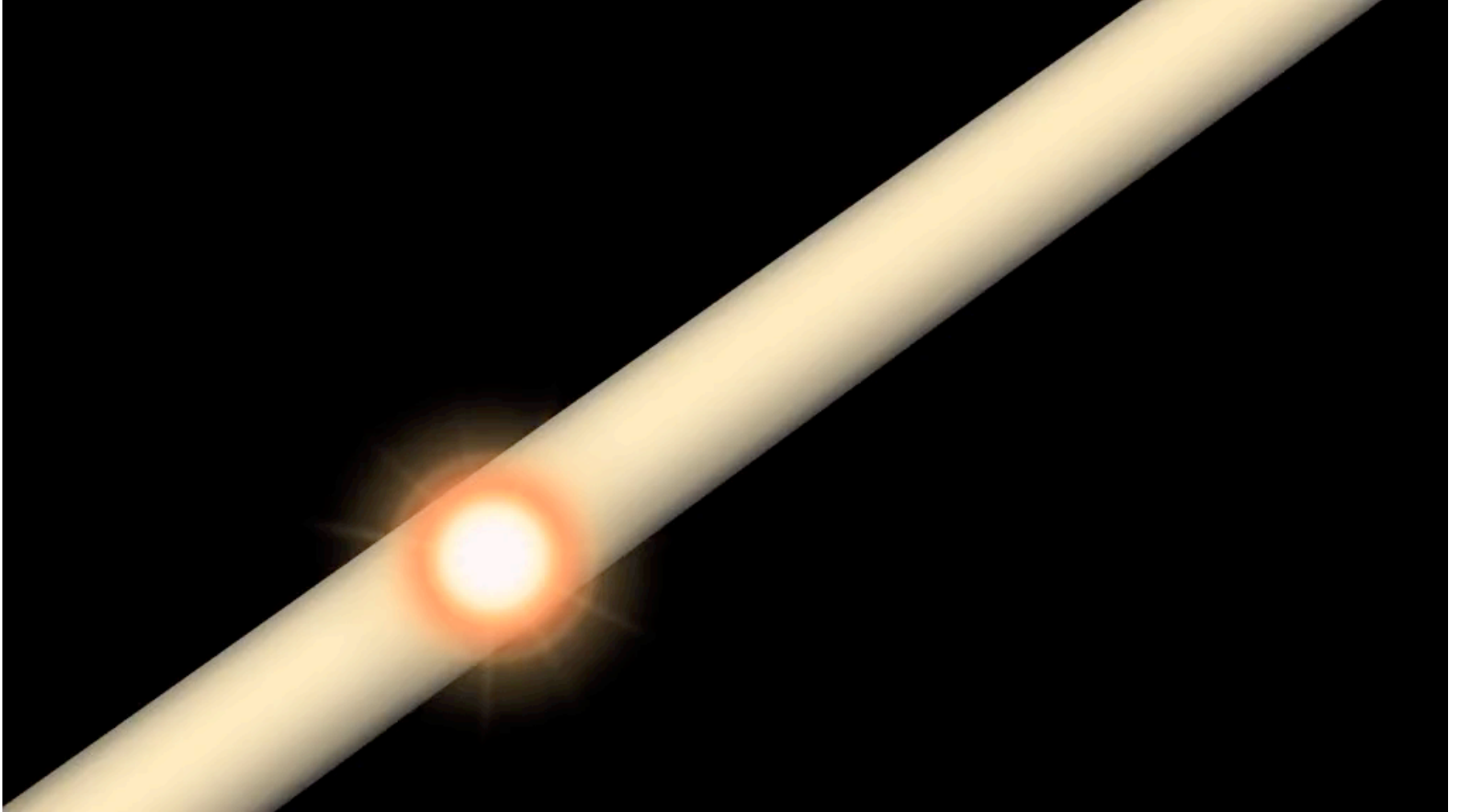
სინამდვილეში ხდება ეს. ძალიან ბევრი ნაწილაკი და მათი ტრეკი ფიქსირდება დეტექტორში. მათი გარჩევა მოითხოვს კომპლექსურ პროგრამებს



სხვადასხვა ნაწილაკის ურთიერთქმედება CMS დეტექტორთან



შეჯახება

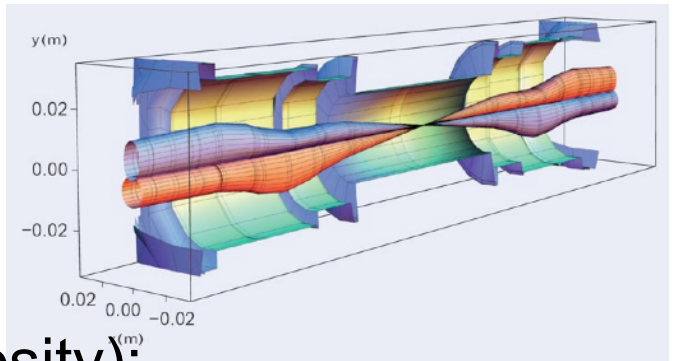


კვეთა (cross section):

აღბათობა რომ ორი ნაწილაკი შეეჯახება ერთმანეთს და მოხდება გარკვეული ურთიერთქმედება. პროცესის კვეთა დამოკიდებულია შეჯახების ენერგიაზე.

ერთეული: $[\sigma] = 1 \text{ ბარნი} = 10^{-24} \text{ სმ}^2$
 $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

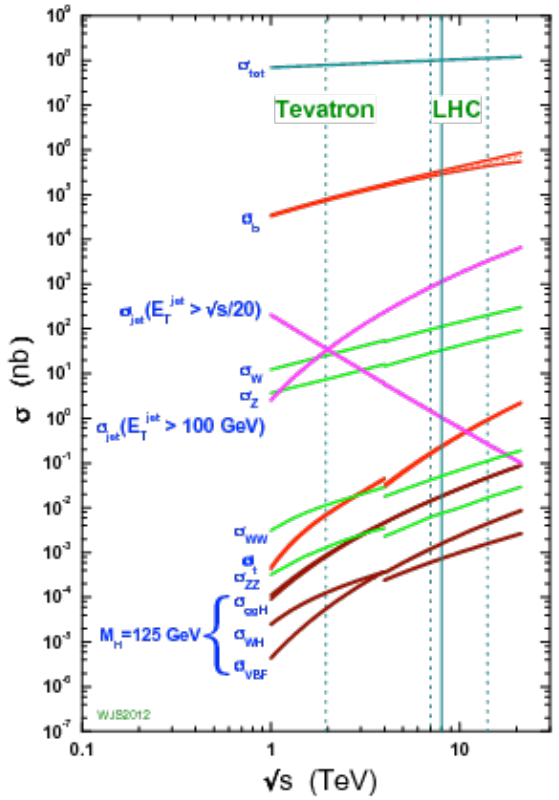
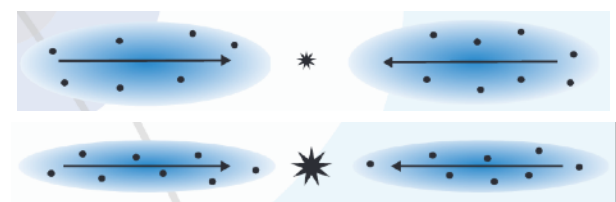
$1 \text{ nb} = 10^{-33} \text{ cm}^2$; $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$;
 $1 \text{ fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$



ნათება (luminosity):

უჩვენებს რამდენად მჭიდროდაა ნაწილაკები განლაგებული გარკვეულ სივრცეში. მაღალი ნათება ნიშნავს მეტ აღბათობას რომ ნაწილაკები დაეჯახებიან.
 ერთეული $[L] = 1/(s \cdot [\sigma]) = 1/(\text{ბარნი} \cdot \text{წმ})$ ($\text{barn}^{-1}\text{s}^{-1}$; $\text{pb}^{-1}\text{s}^{-1}$; $\text{fb}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ინტეგრირებული ნათება უჩვენებს მოვლენათა რაოდენობა გარკვეული პერიოდის განმავლობაში

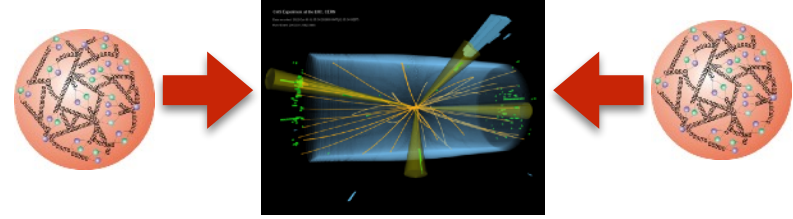


როგორაა დაკავშირებული კვეთა და ნათება:

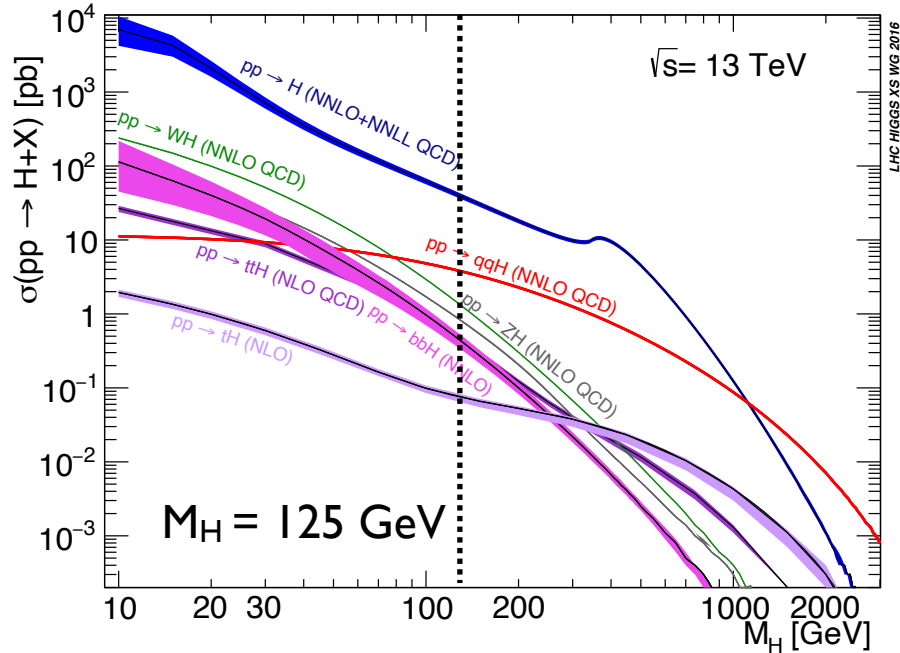
მოვლენათა რაოდენობა წამში = ნათება ($\text{pb}^{-1} \text{წმ}^{-1}$) x კვეთა (pb)
 მაგ.: 2016-2018 წწ ექსპერიმენტის დროს, პიკური ნათება იყო $L = 0.0206 \text{ pb}^{-1}\text{წმ}^{-1}$ და 125 GeV Higgs ბოზონის წარმოქმნის კვეთა არის $\sigma = 50 \text{ pb}$. მაშინ, წამში წარმოქმნილ მოვლენათა რაოდენობა გამოითვლება

$$N = L \times \sigma = 0.0206 \text{ pb}^{-1}\text{წმ}^{-1} \times 50 \text{ pb} = 1.05 \text{ Higgs ბოზონი/წმ}$$

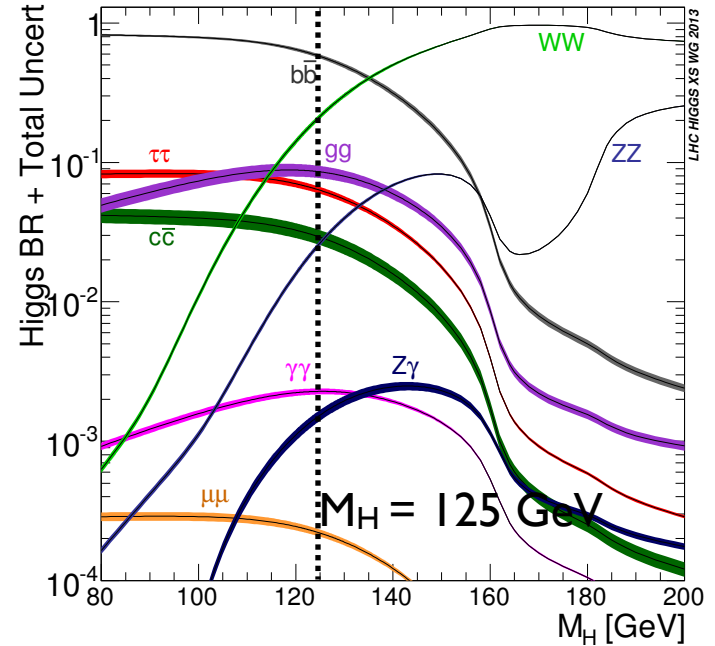
Higgs წარმოქმნის კვება და Higgs დაშლა



Higgs ბოზონის წარმოქმნა სხვადასხვა მექანიზმით



Higgs ბოზონის დაშლა სხვადასხვა ნაწილაკში



- Higgs ბოზონის წარმოქმნა შეიძლება სხვადასხვა გზით. ის იშლება წარმოქმნიდან ძალიან მალე. მისი დაშლა ასევე შეიძლება მოხდეს სხვადასხვა ნაწილაკში.
- ჩვენ ვზომავთ წარმოქმნის და დაშლის ერთობლიობას

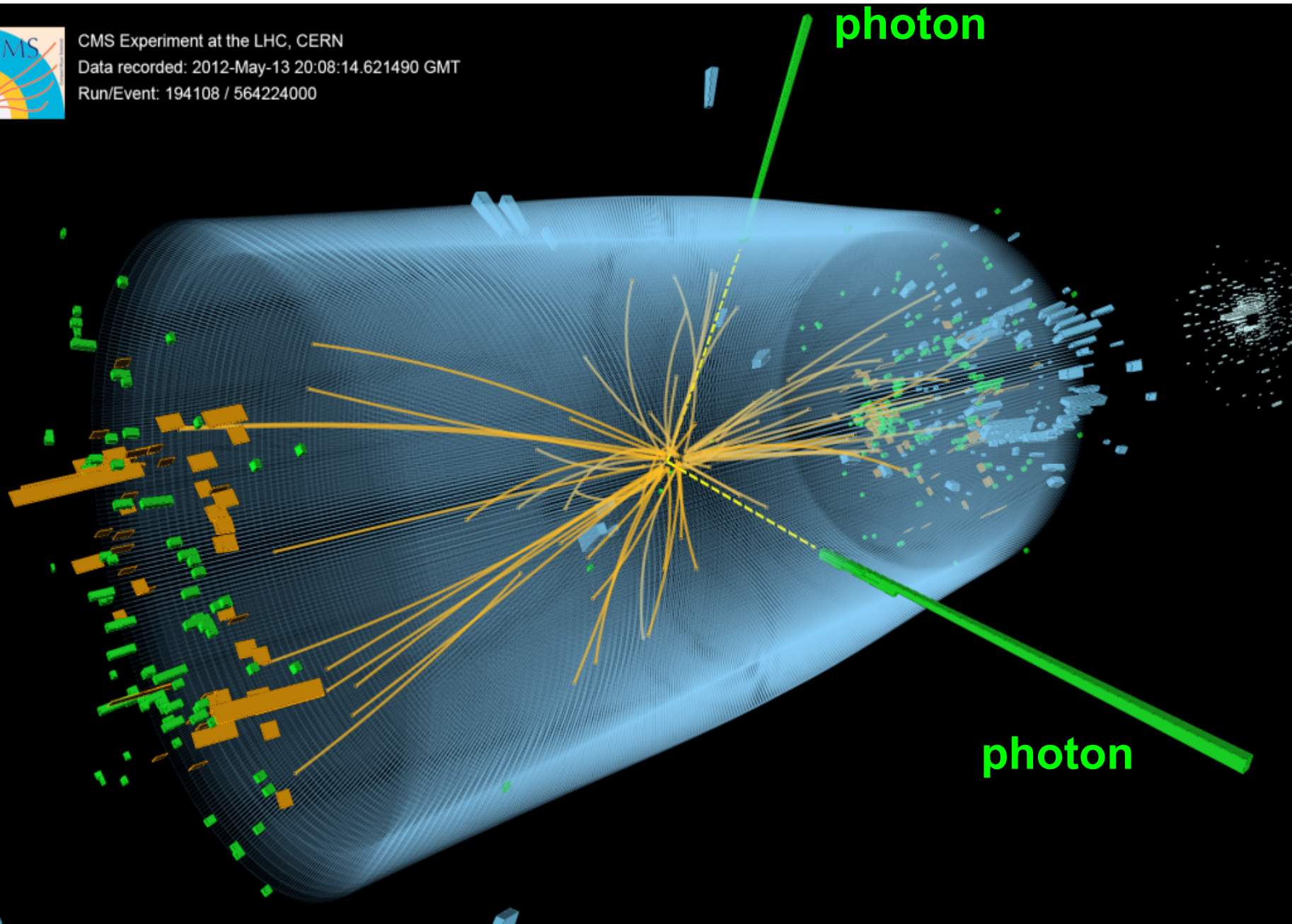
$H \rightarrow \gamma\gamma$ კანდიდატი მოვლენა



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000



$H \rightarrow ZZ \rightarrow e e \mu \mu$ კანდიდატი მოვლენა



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

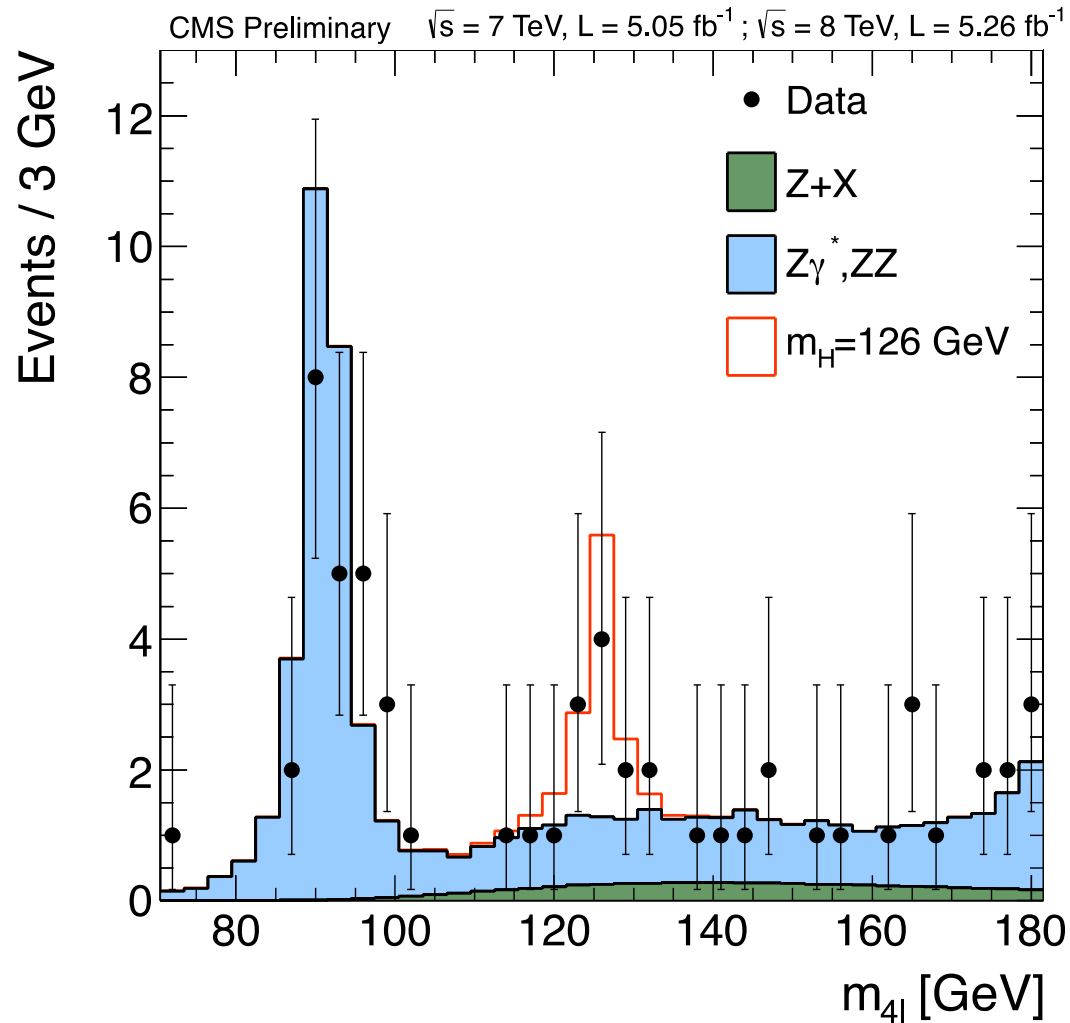
Electron

Muon

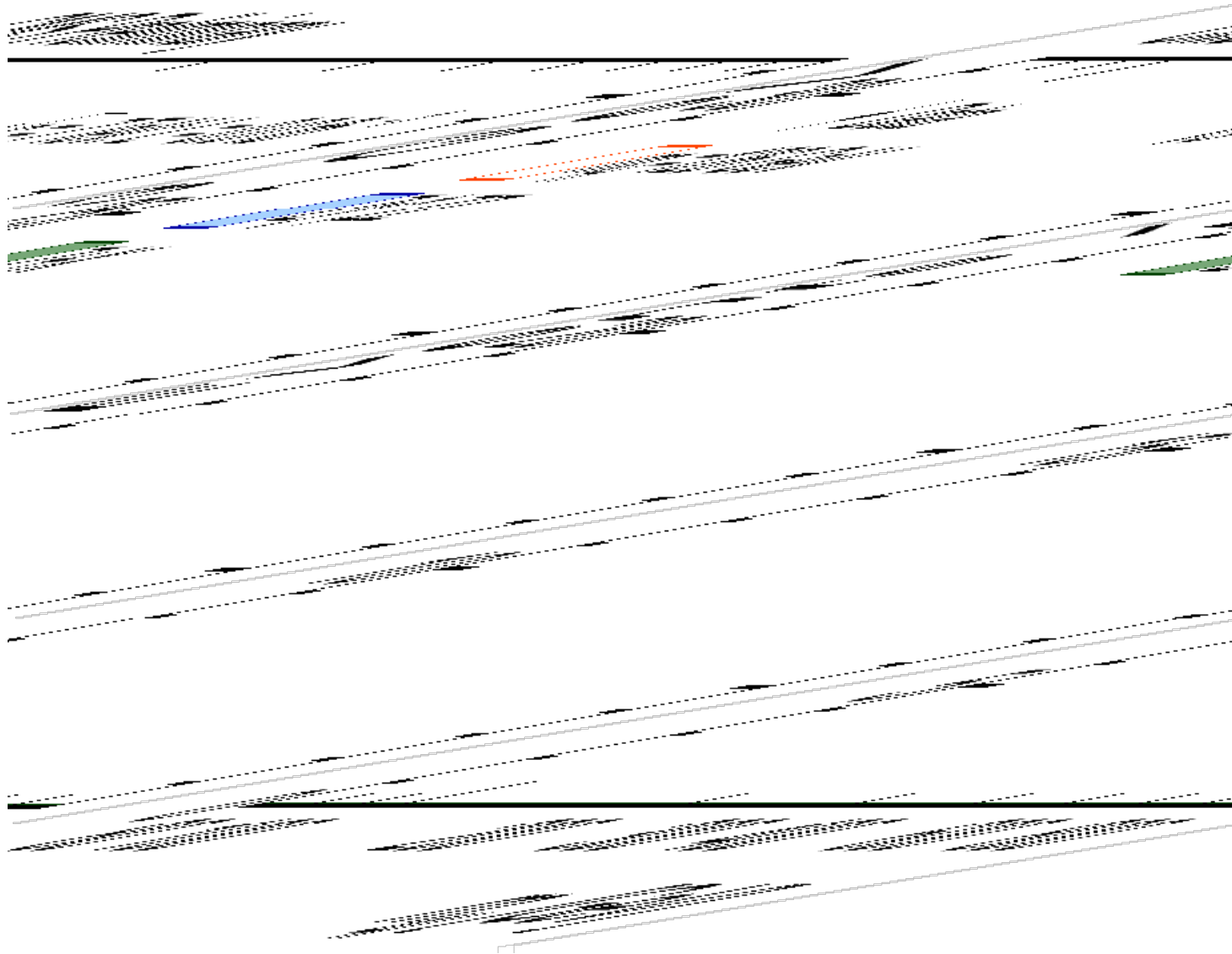
Electron

Muon

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ 2012წ ივლისში



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ 2012 წლის ბოლოს



For viewing Higgs mass with time, follow this link:

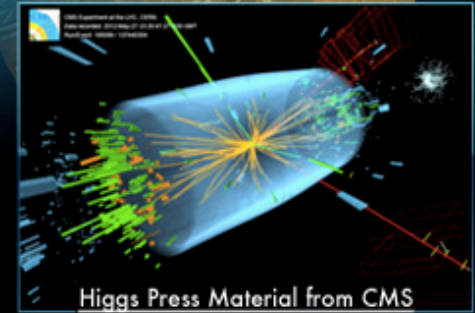
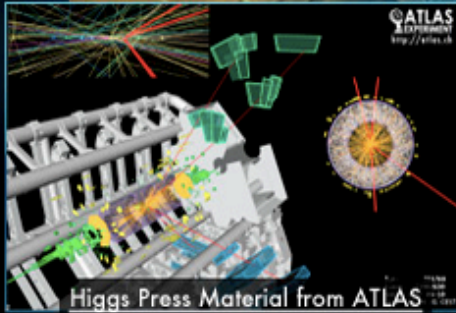
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/Hig13002TWiki/HZZ4l_animated_slower.gif

Congratulations to Professors

François Englert & Peter Higgs

for the

2013 Nobel Prize in Physics



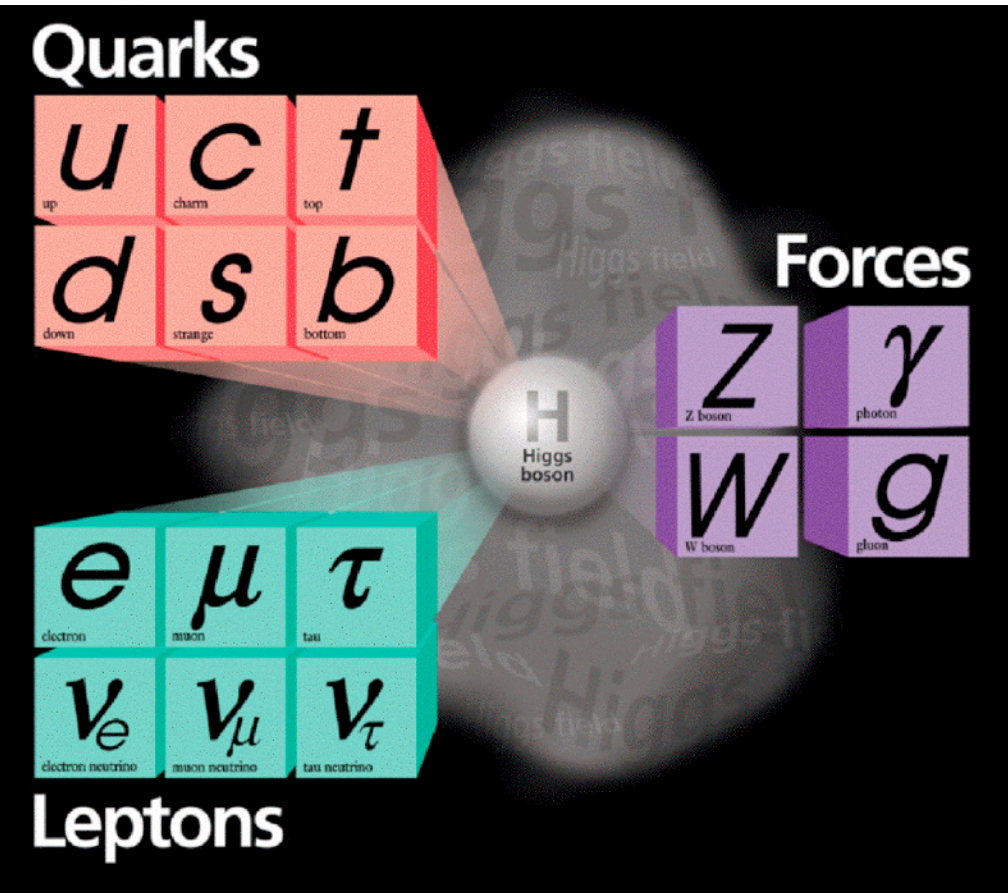
საწყისი თეორიის ნ ავტორთაგან, პირველ ორს მიენიჭა **ნობელის პრემია** იმ თეორიის პოსტულირებისთვის რაც ხსნის ელემენტარული ნაწილაკების მასის წარმოქმნის მექანიზმს.

“For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”





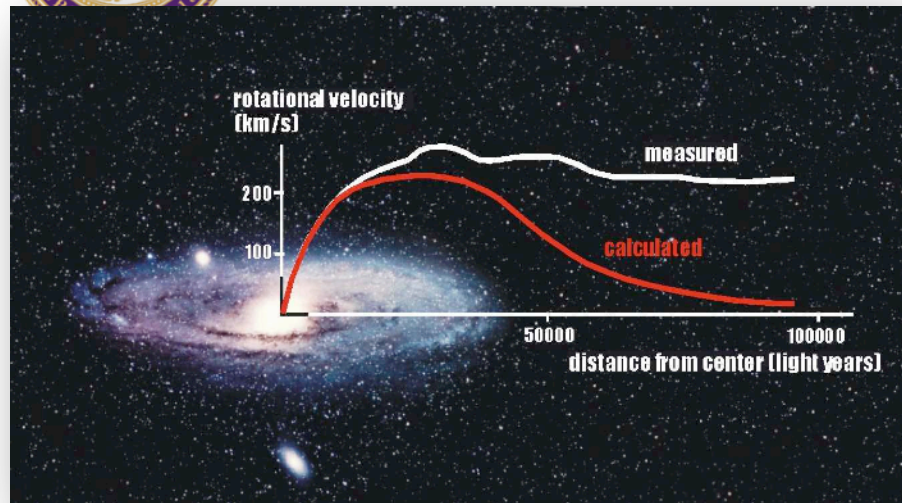
მოვრჩით თუ არა?



- რატომ გვაქვს ფერმიონების სამი თაობა სამყაროში?
- რატომაა გრავიტაცია ასეთი სუსტი?
- რა დაემართა ანტი-მატერიას?
- რა არის ბნელი მატერია?
- და ა.შ.



ბნელი მატერია

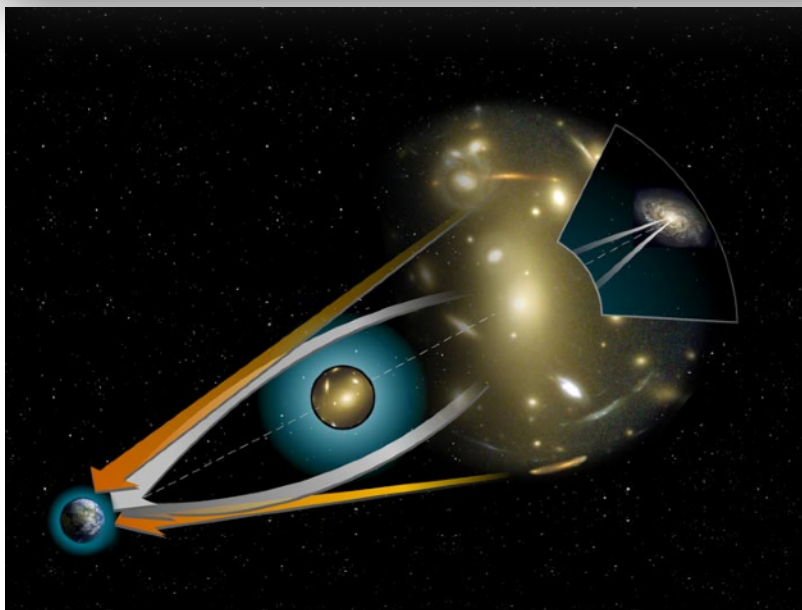


Fritz Zwicky



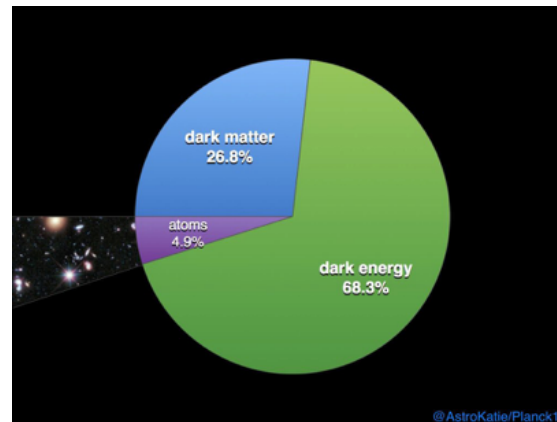
Vera Rubin

Higgs ბოზონის აღმოჩენით ჩვენ გავერკვიეთ სამყაროს მხოლოდ 5%-ში. დანარჩენი 95% არის ბნელი მატერია და ბნელი ენერჯია.



Gravitational lensing

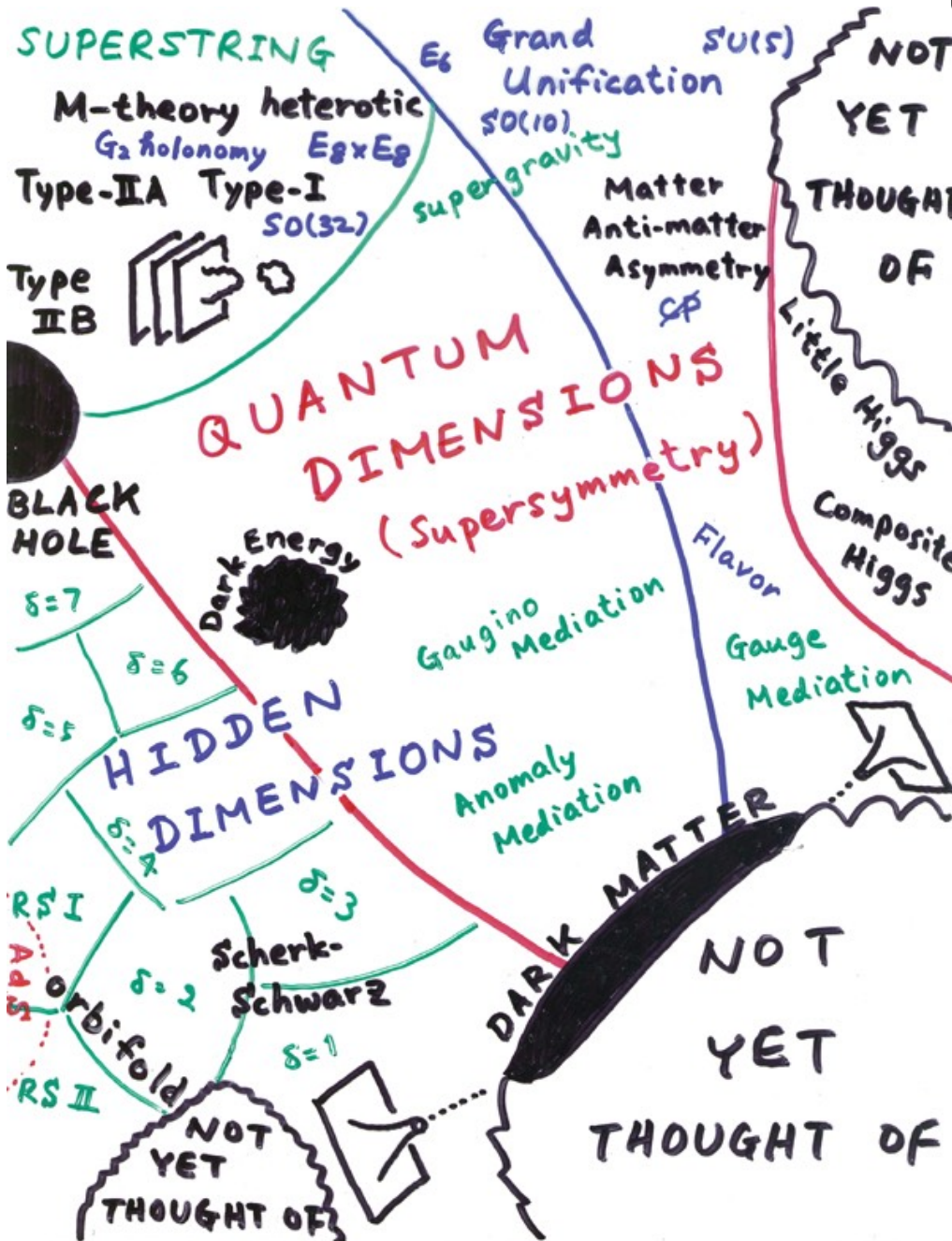
Keti Kaadze, Kansas State University



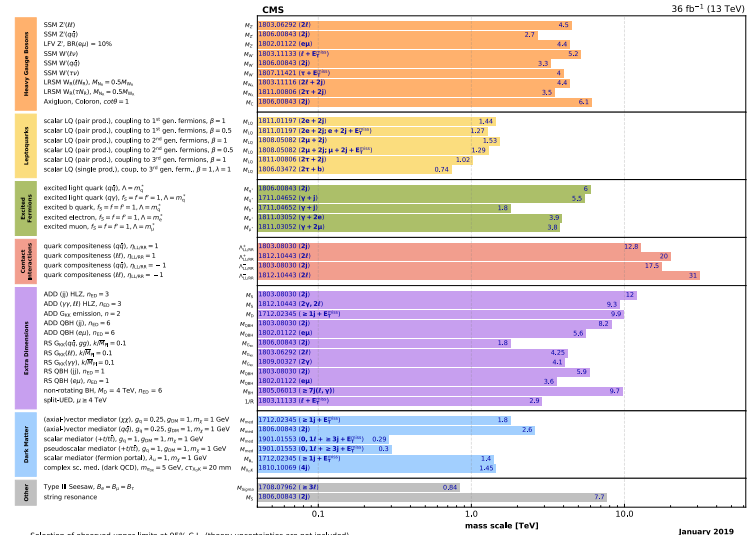
©AstroKatie/Planck13

არსებობს ბევრი თეორია

არსებობს ამ თეორიების ნიშნების ძიება ექსპერიმენტში



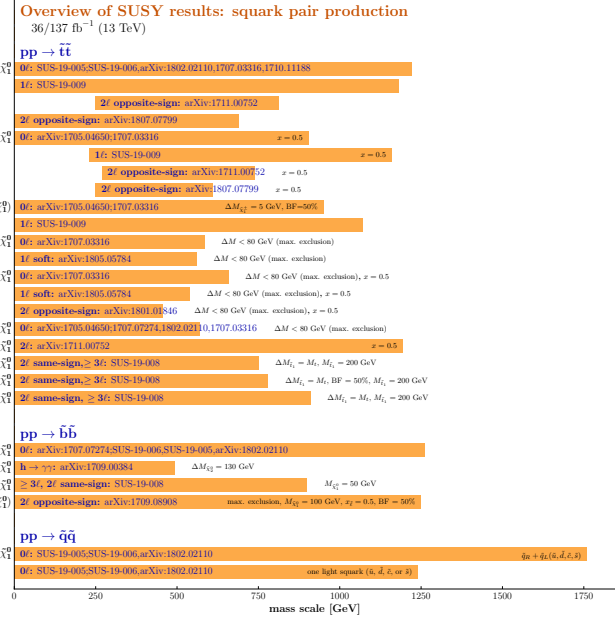
Overview of CMS EXO results



Selection of observed upper limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included).

CMS (preliminary)

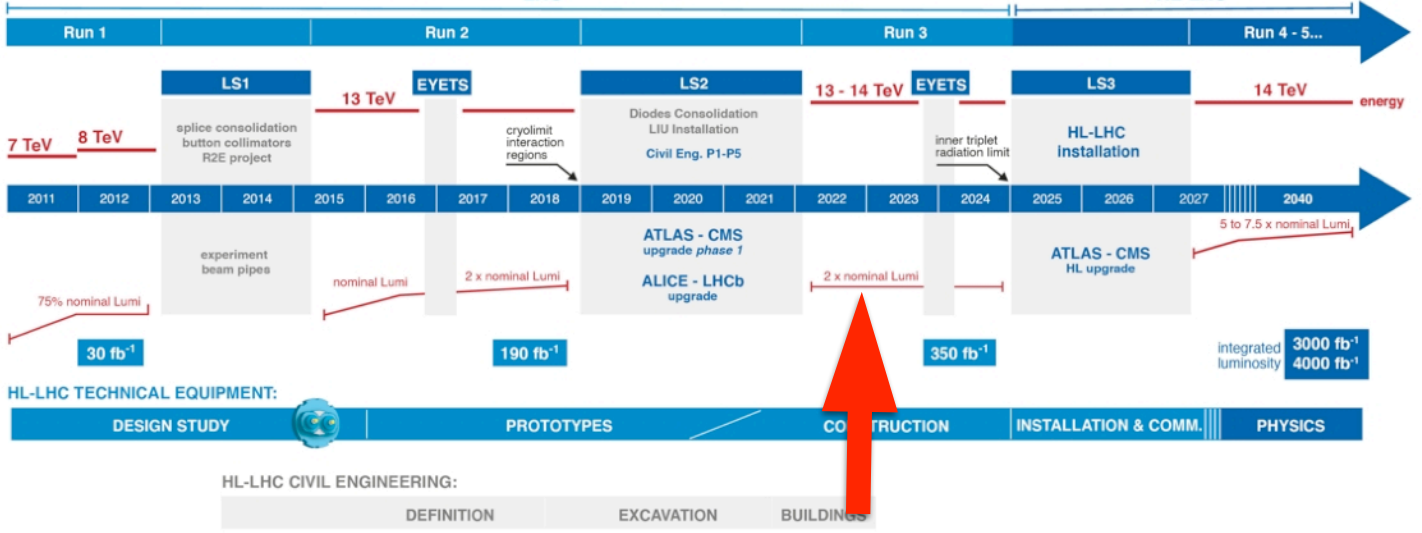
May 2019



Selection of observed limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). Probe up to the quoted mass limit for light LSPs unless stated otherwise. The quantities ΔM and x represent the absolute mass difference between the primary sparticle and the LSP, and the difference between the intermediate sparticle and the LSP relative to ΔM , respectively, unless indicated otherwise.



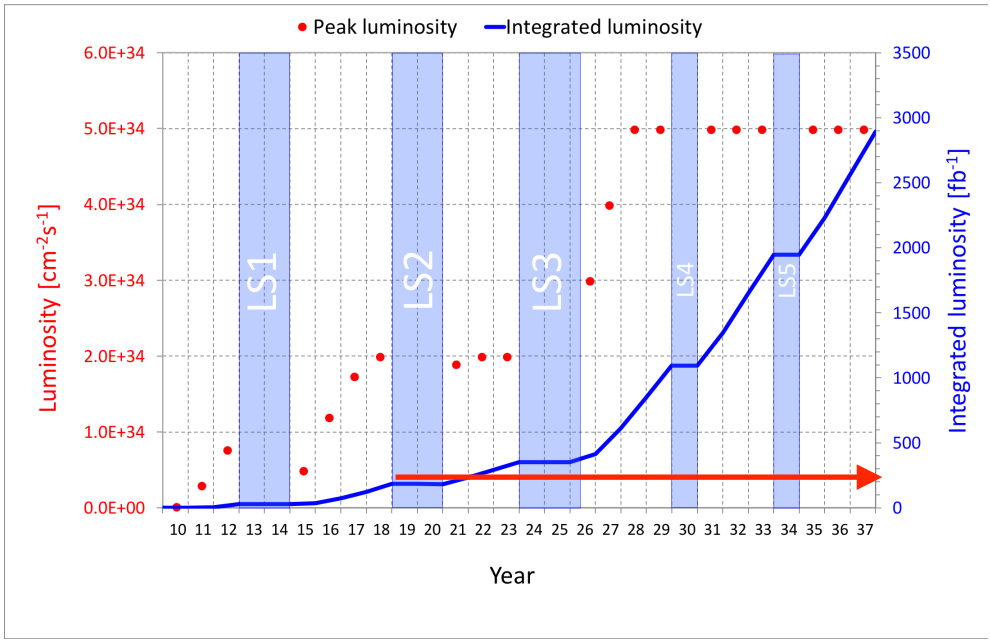
LHC პროგრამა



ახლა ვართ აქ.

დეტექტორები, რასაც ჩვენ ვიყენებთ აწყობილია 10-15 წლის წინ. მათი განახლება არის უმნიშვნელოვანესი.

მეტი ნათება (luminosity)
 → მეტი შეჯახება
 → მეტი Higgs ბოზონი ან მეტი სხვა ახალი ნაწილაკი





დასკვნა



- CERN LHC ამარქარებელი და არსებული ექსპერიმენტები არის დიდი წარმატება
- მოხრა სტანდარტული პროცესების წარმატებით გაზომვა.
- 2012-ში იყო Higgs ბოზონის აღმოჩენა
- ახალი, უცხო ნაწილაკების ძიება განუწყვეტლივ მიმდინარეობს
- LHC -ის სრული შესაძლებლობების სრულ რეალიზებას დაჭრდება მომდევნო 15-20 წელი
- Higgs აღმოჩენა არის ჩვენი მხრიდან სამყაროს შეცნობის მხოლოდ დასაწყისი და ველით რომ იქნება სხვა აღმოჩენები რაც ნათელს მოფენს ბუნებაში არსებულ კაზლებს!



BACKUP