

# სამყაროს შესწავლა მაღალი ენერგიების ექსპერიმენტით

ქეთი ქააძე

[ketino.kaadze@cern.ch](mailto:ketino.kaadze@cern.ch)

კანზასის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტი





# 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

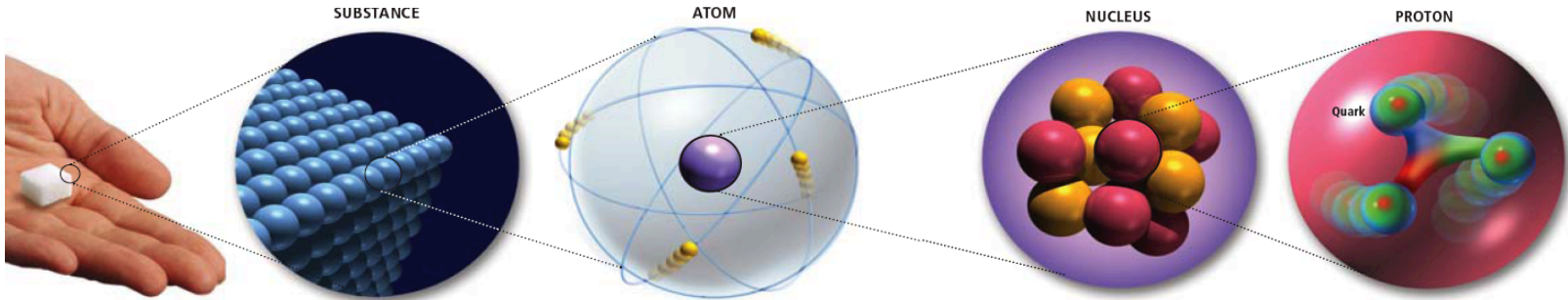
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 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	



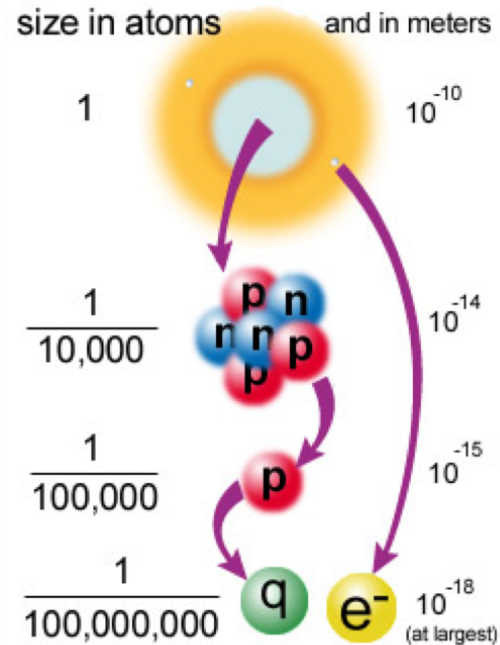
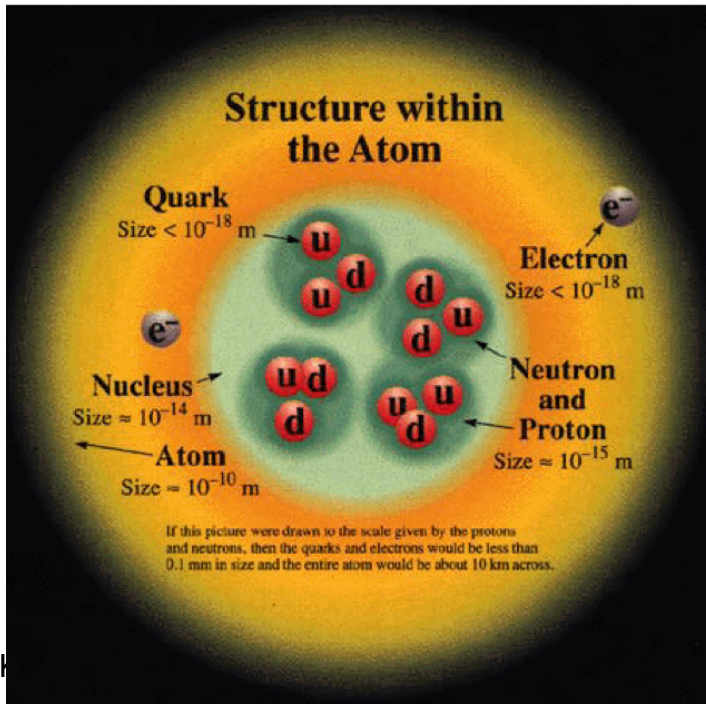
# ელემენტარული ნაწილები?



მე-20 საუკუნე



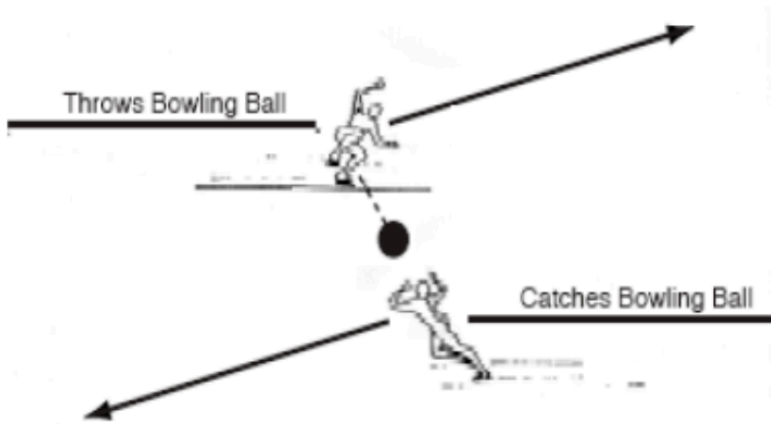
ამჟამინდელი წარმოდგენა მატერიაზე



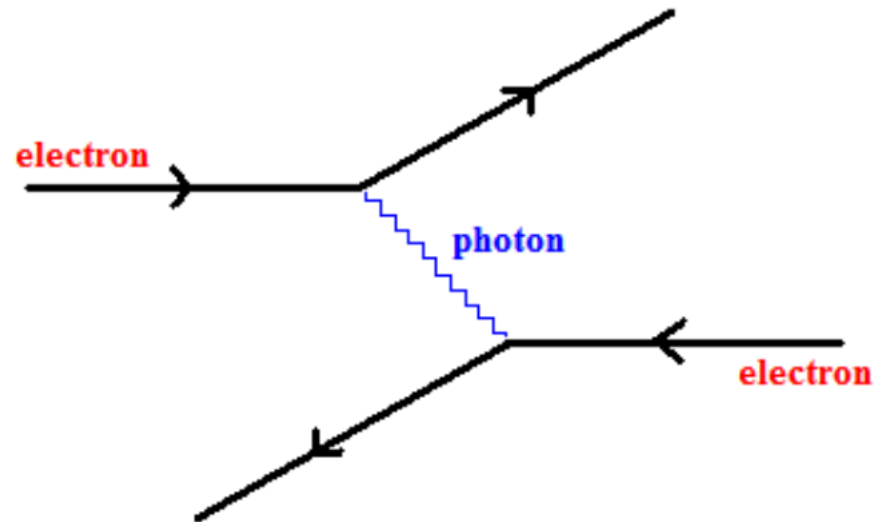


# ძალა როგორც ურთიერთქმედება

ყველა ძალა წარმოდგინდება როგორც ელემენტარულ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება

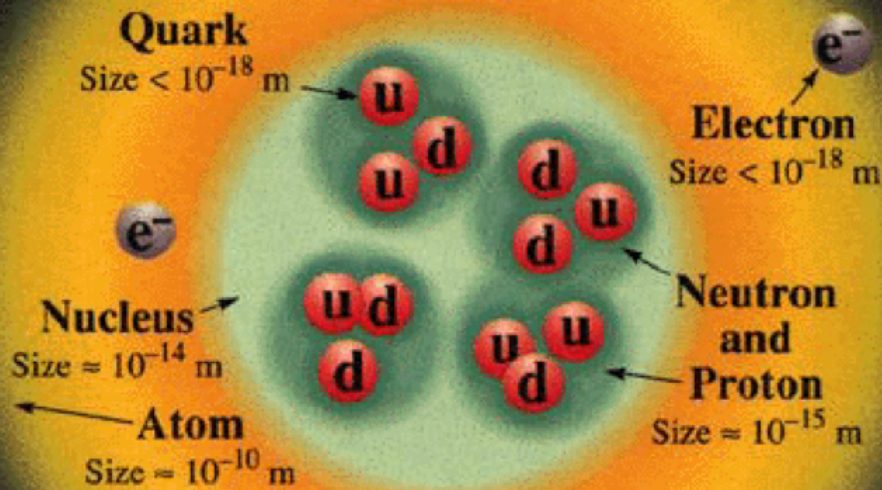


ძალის მედიატორი არის ასევე ნაწილაკი



# სამი ძირითადი ურთიერთქმედება

## Structure within the Atom

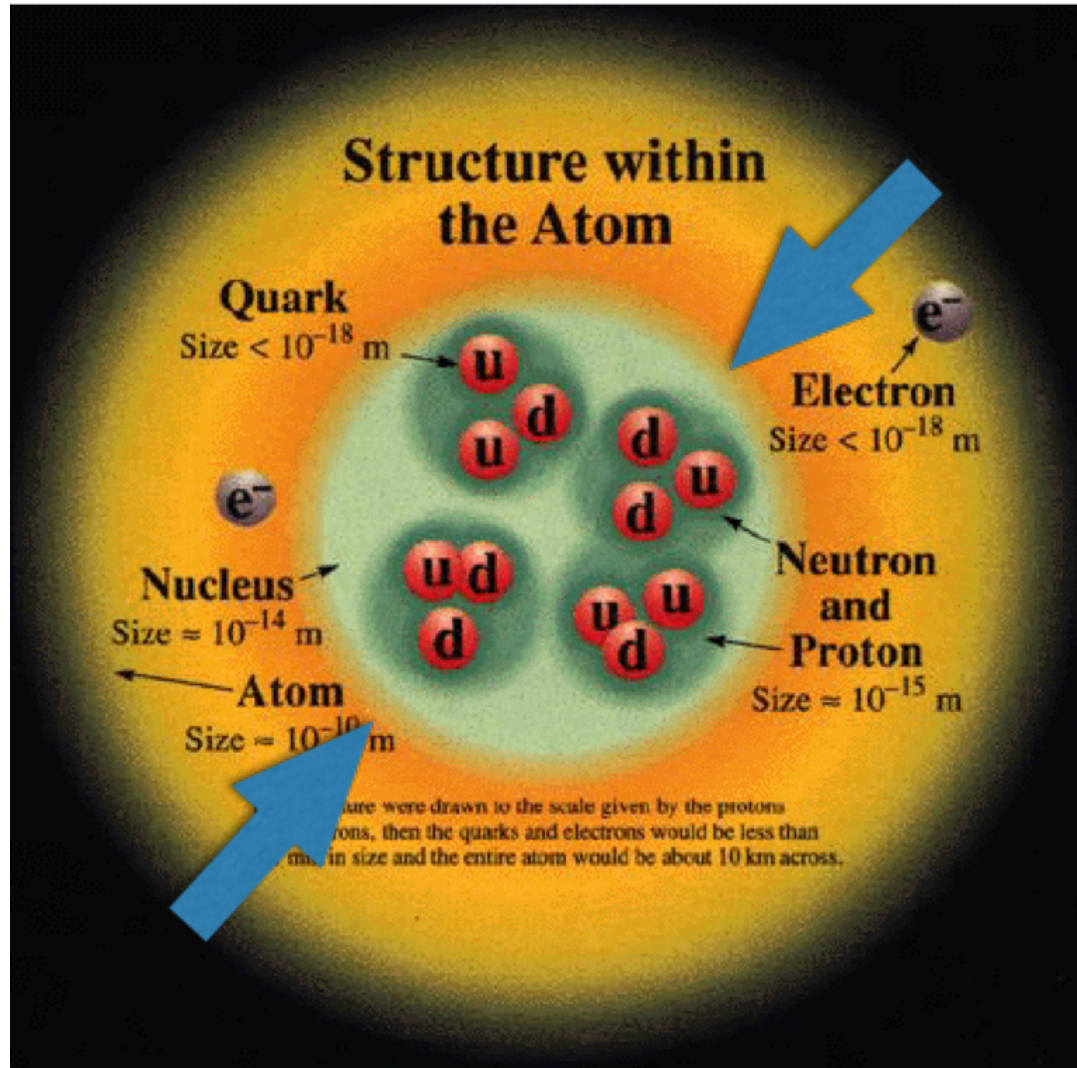


## ელექტრომაგნიტური ძალა

აკავშირებს ელექტრონებს ბირთვთან, ქმნის ატომს

ელექტრომაგნიტური ძალის გადამტანია

## ფოტონი $\gamma$

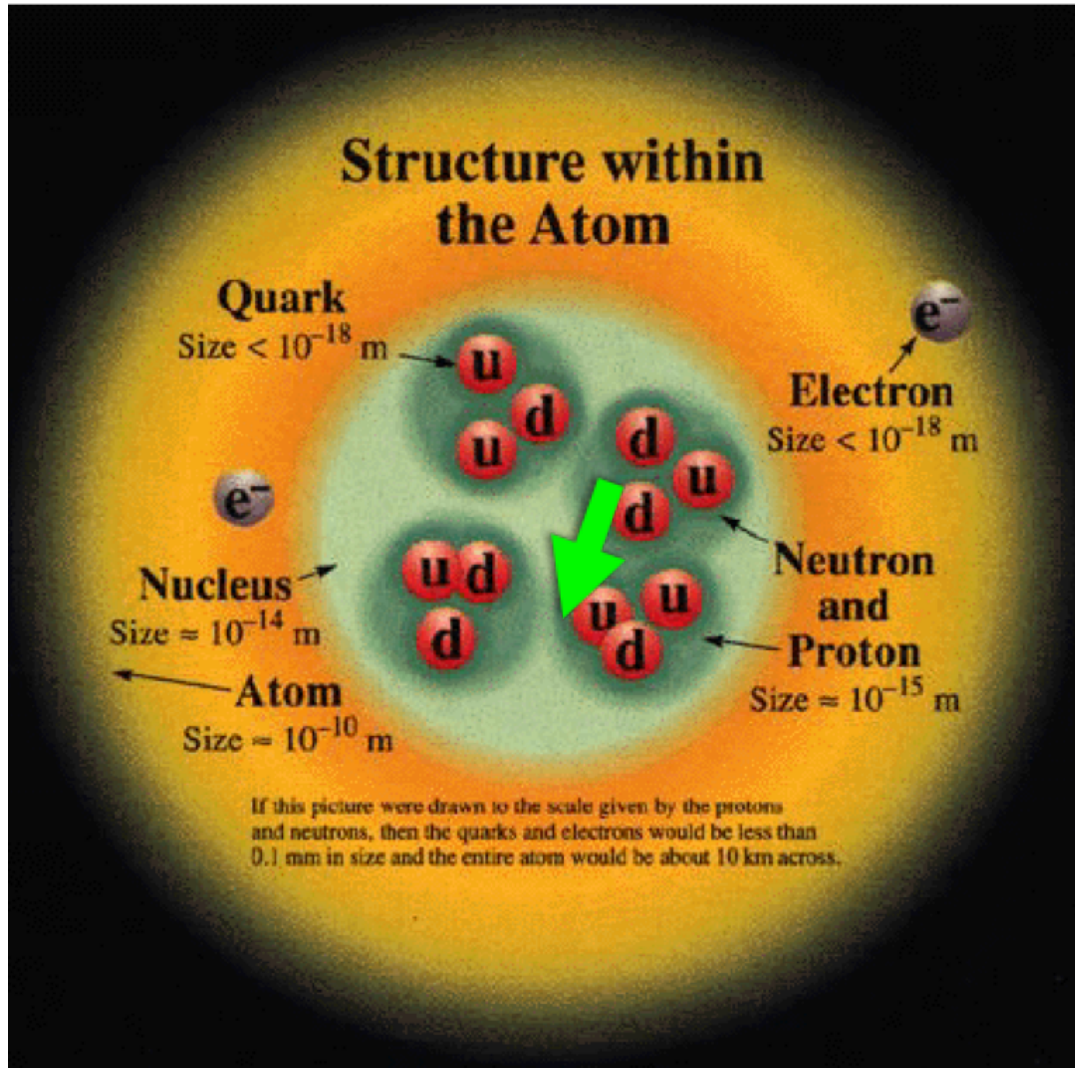


## ძლიერი ბირთვული ძალა

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

ძლიერი ძალის გადამტანია **გლუონი g**

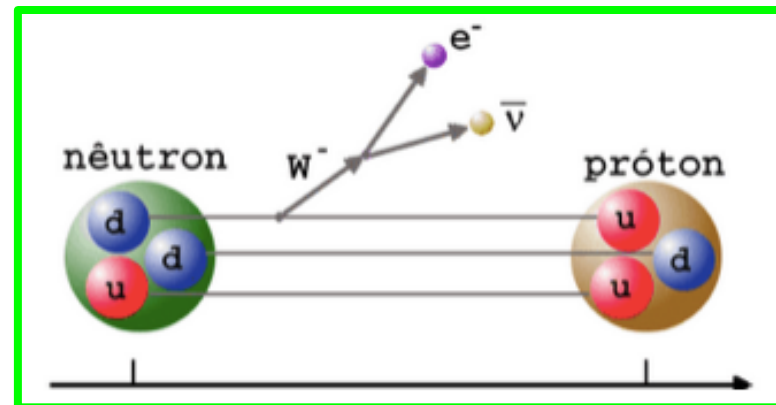




## სუსტი ბირთვული ძალა

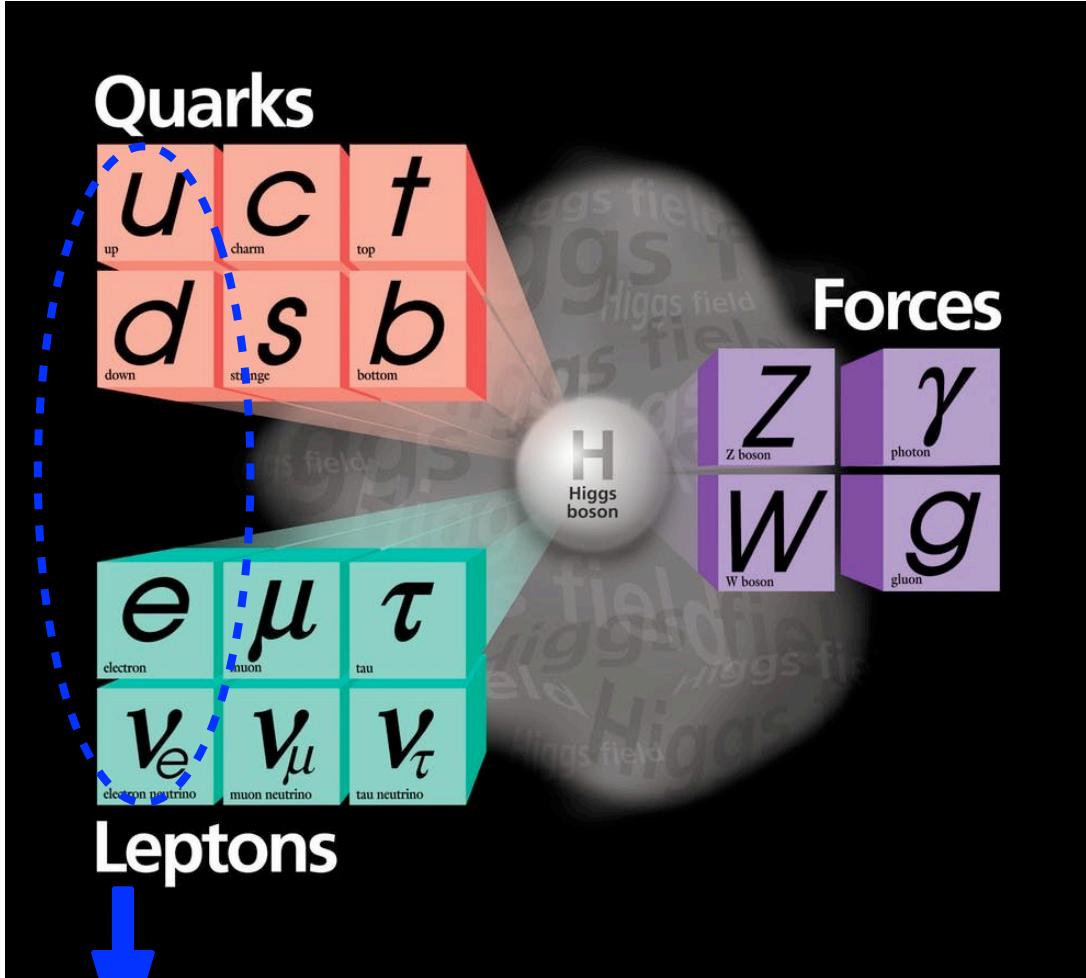
უზრუნველყოფს ბირთვულ დაშლას, უზრუნველყოფს მზეში მიმდინარე პროცესებს

სუსტი ძალის გადამტანია **Z and W $\pm$  ბოზონი**





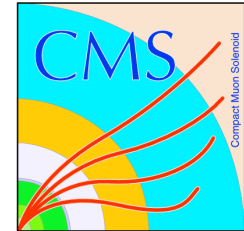
# ელემენტარული ნაწილაკები დღეს



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



# ნაწილაკთა ფიზიკა



ექსპერიმენტულად...

მიზანია:

\* გამოიწვიო ნაწილაკების ურთიერთქმედება და შეისწავლო წარმოქმნილი ნაწილაკების თვისებები.

\* გაზომო წარმოქმნილი ნაწილაკების ენერგია, მიმართულება, მუხტი რაც შეიძლება მეტი სიზუსტით

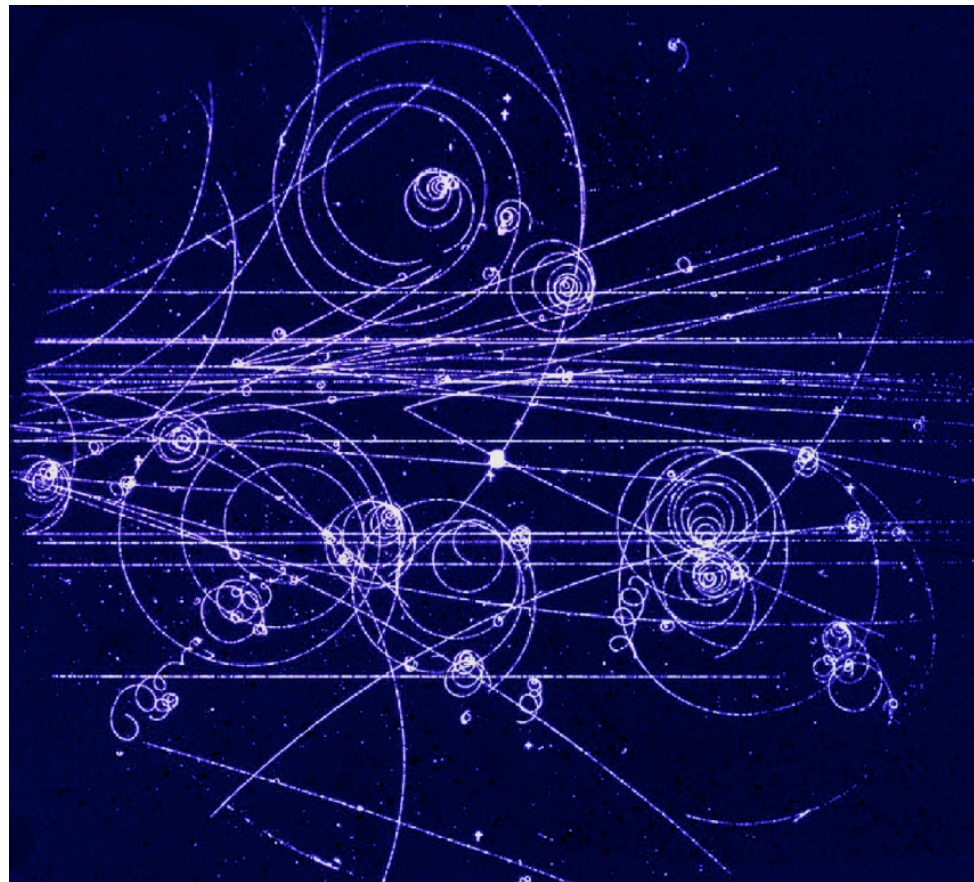
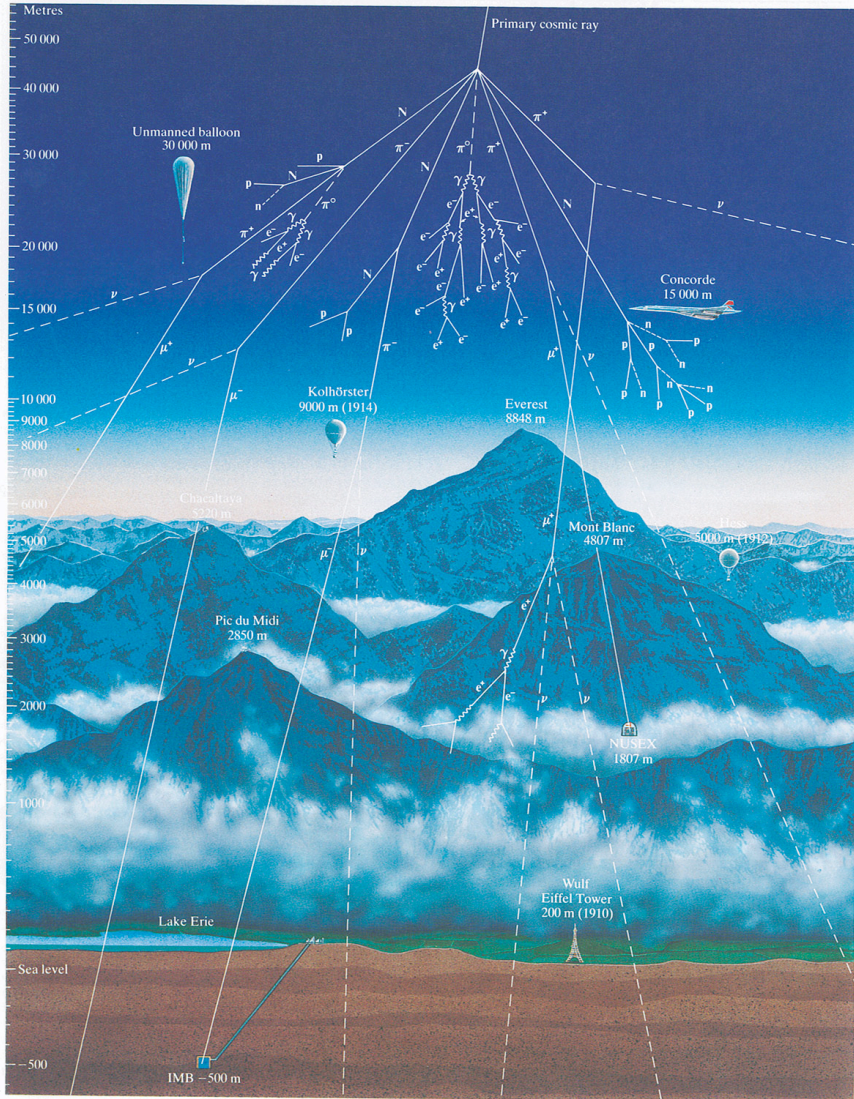


# გარკვეული ხნის წინ



## 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

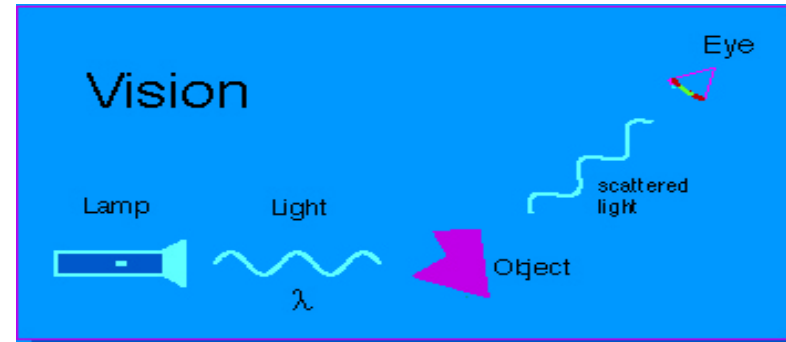
**შეაჯახე ნაწილაკები და დააკვირდი რა მოხდება!**



# 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  $\sim 500$  ნანო-მ ან  $5 \times 10^{-5}$  სმ



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

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

ნაწილაკი  $\longleftrightarrow$   $\lambda = h/P$



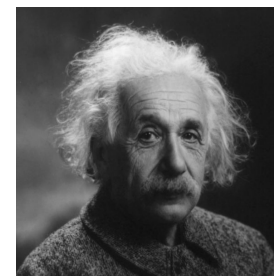
# ამარქარებლების ენერჯის მნიშვნელობა



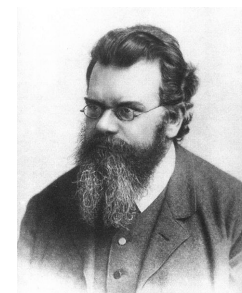
- მაღალი ენერჯია საშუალებას გვაძლევს
  - შევისწავლოთ მატერიის უმცირესი ნაწილები ( $E \sim 1/\text{size}$ )  
ანუ “ძლიერი მიკროსკოპი”
  - აღმოვაჩინოთ უფრო მასიური ნაწილაკები ( $E = mc^2$ )
  - შევისწავლოთ ადრეული სამყაროს (უფრო მაღალი ტემპერატურის) პროცესები ( $E = kT$ )



de Broglie



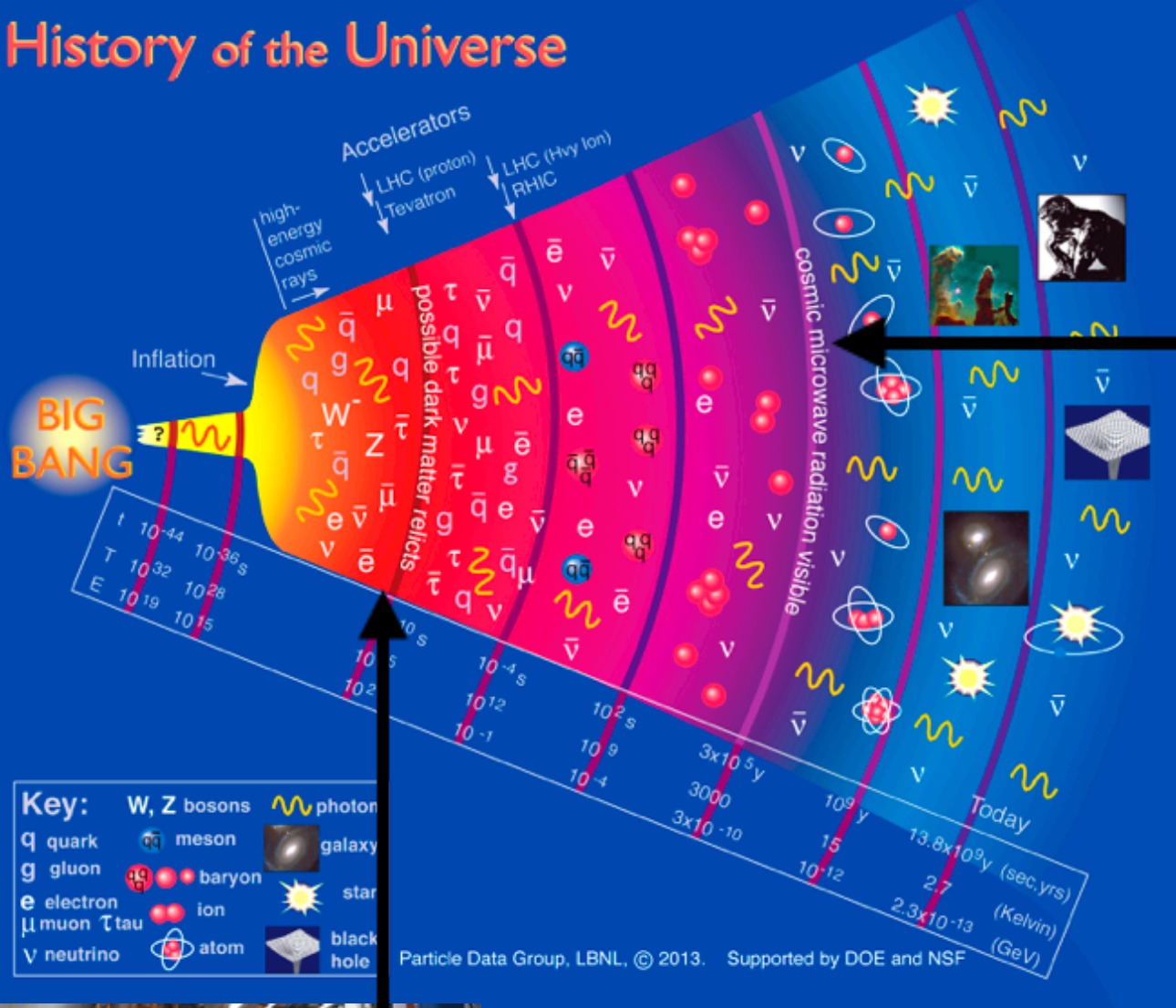
Einstein



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**

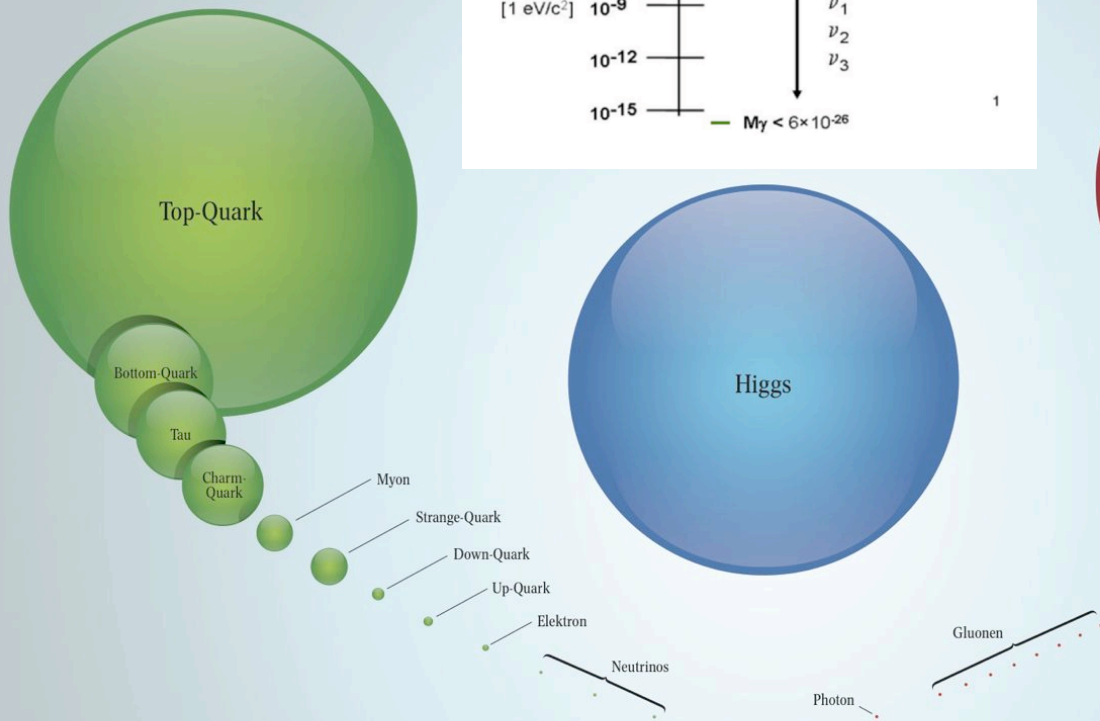
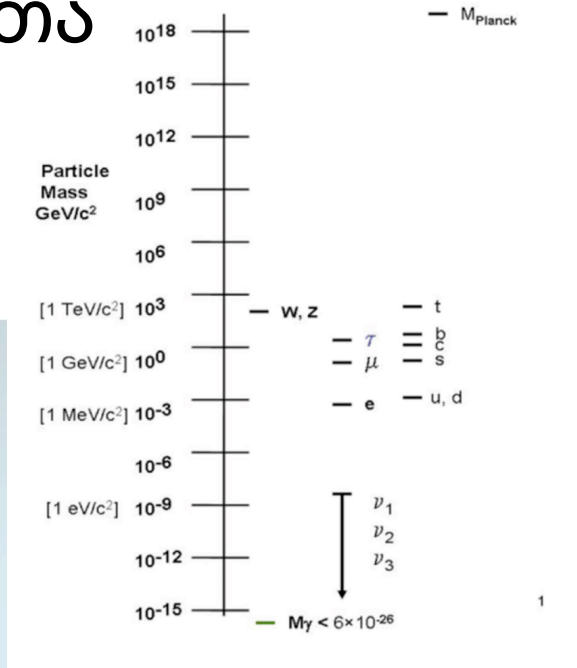


ამარქარებლები აკვირდებიან უმცირეს ობიექტებს, ამით ქმნიან იმ კონდიციას რაც იყო დიდი აფეთქებიდან  $10^{-12}$  წმ-ში





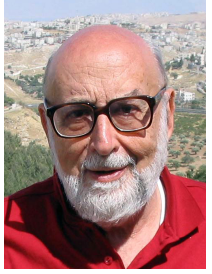
# ნაწილაკთა მასები



In 1964



R. Brout



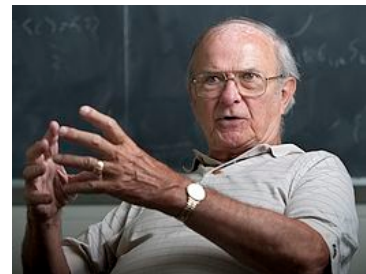
F. Englert



P. Higgs



G. Guralnik



C. Hagen

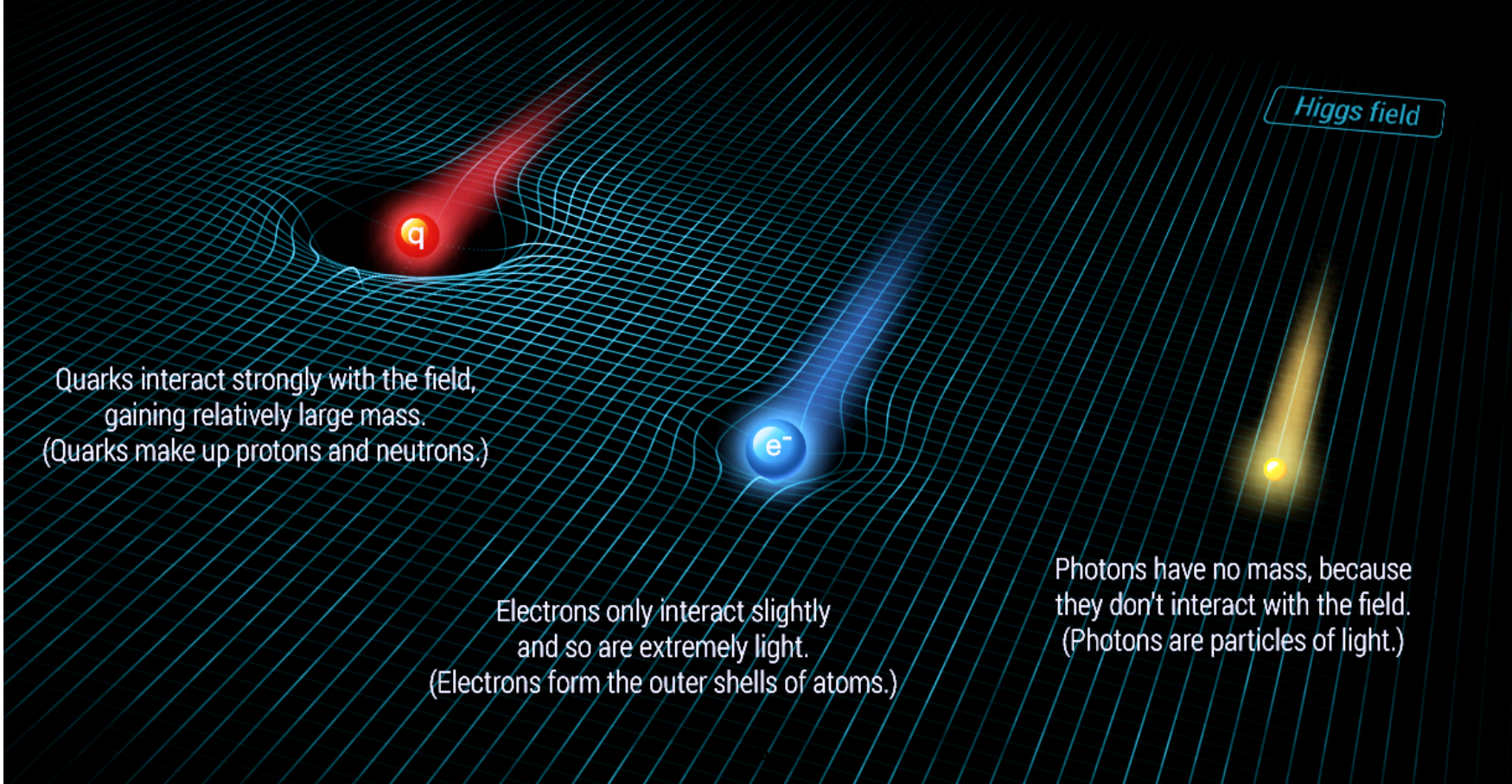


T. Kibble

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



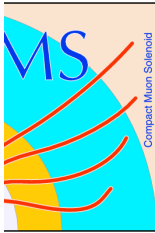


ONE OF THE THINGS PEOPLE PREDICT WILL COME OUT IS

THE HIGGS BOSON

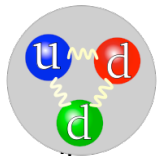
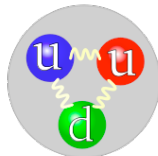
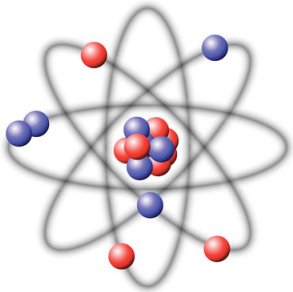


THE HIGGS IS THE PARTICLE RESPONSIBLE FOR GIVING MASS TO OTHER PARTICLES.



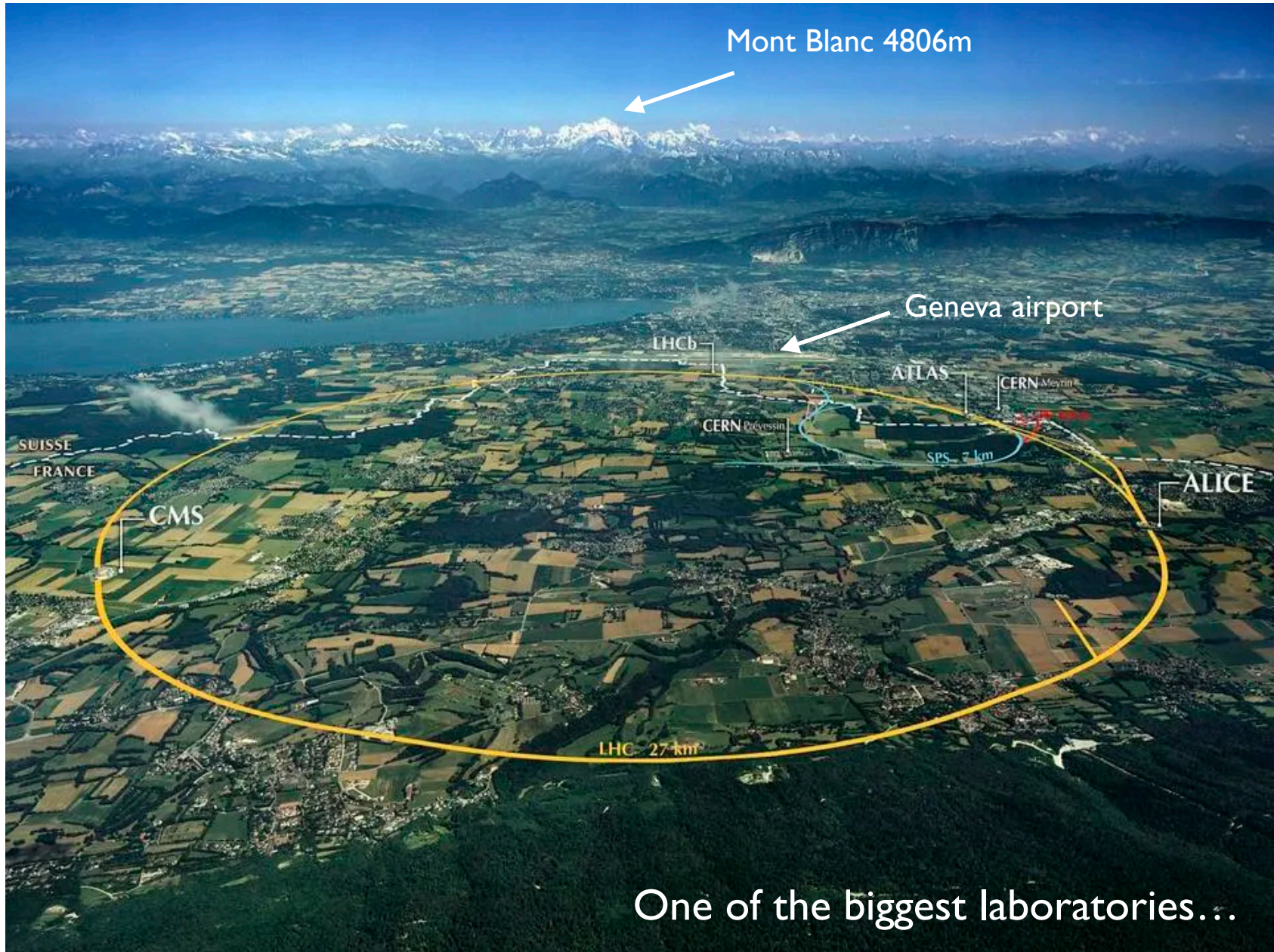
ჰიგის ნაწილაკი პასუხისმგებელია ჩვენს აქ ყოფნაზე.

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

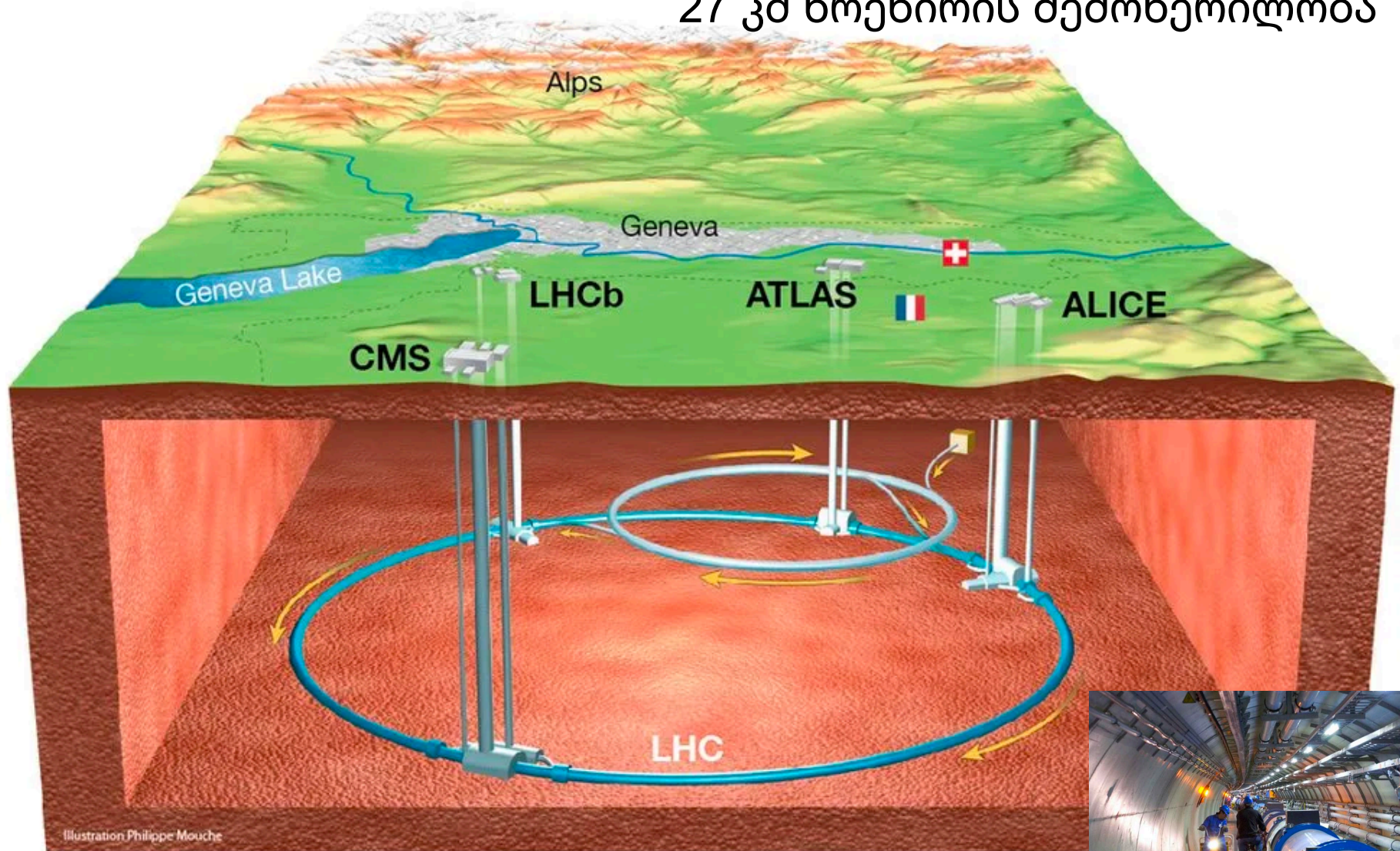


პროტონების და ნეიტრონების მასა გაცილებით აღემატება სამი კვარკის მასას ერთად აღებულს  
პროტონის მასა  $\gg 3 * \text{კვარკის მასა}$

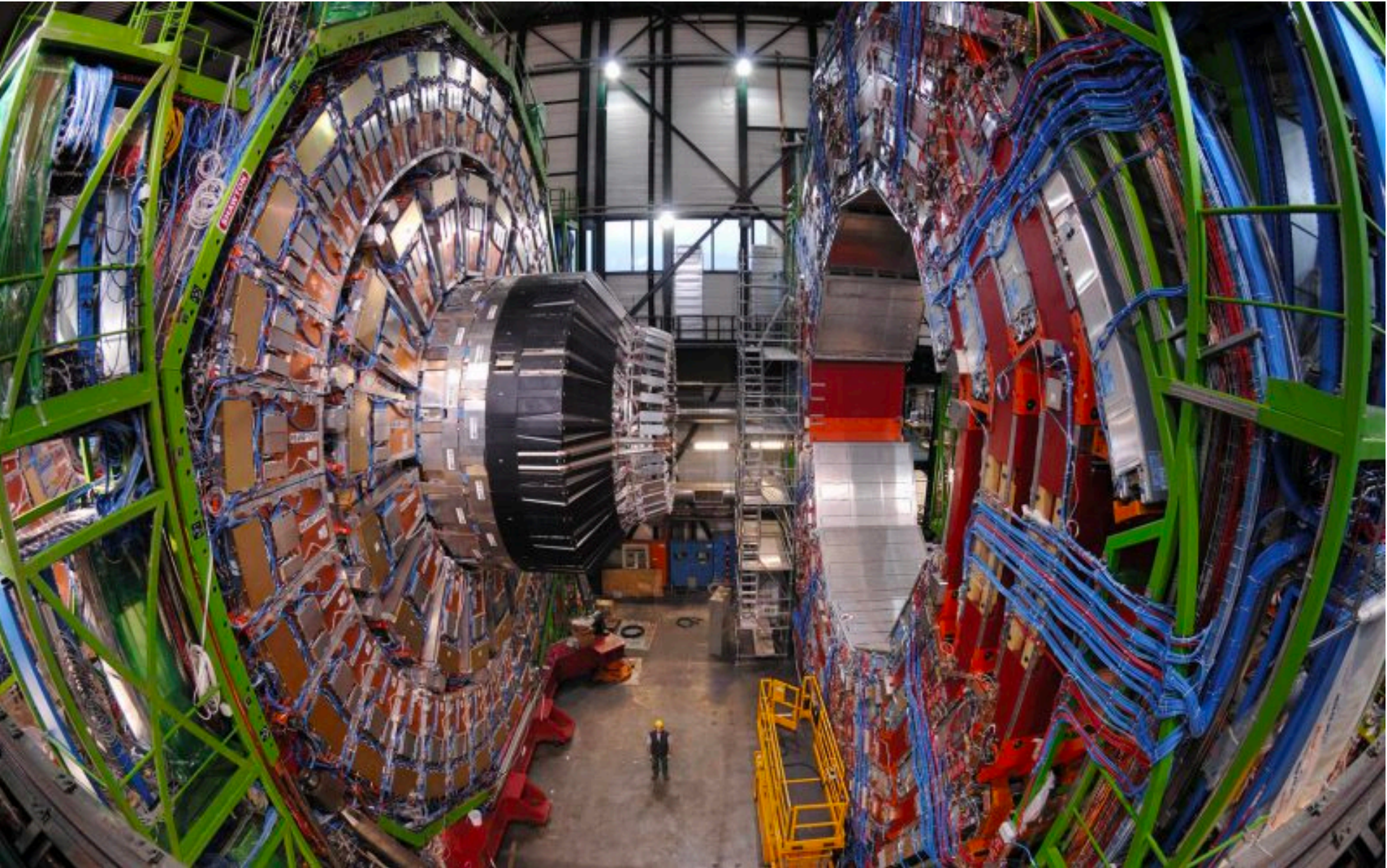
# CERN – European Center for Nuclear Research



~100 მ სიღრმეში მინის  
ზედაპირიდან  
27 კმ წრეწირის შემოწერილობა

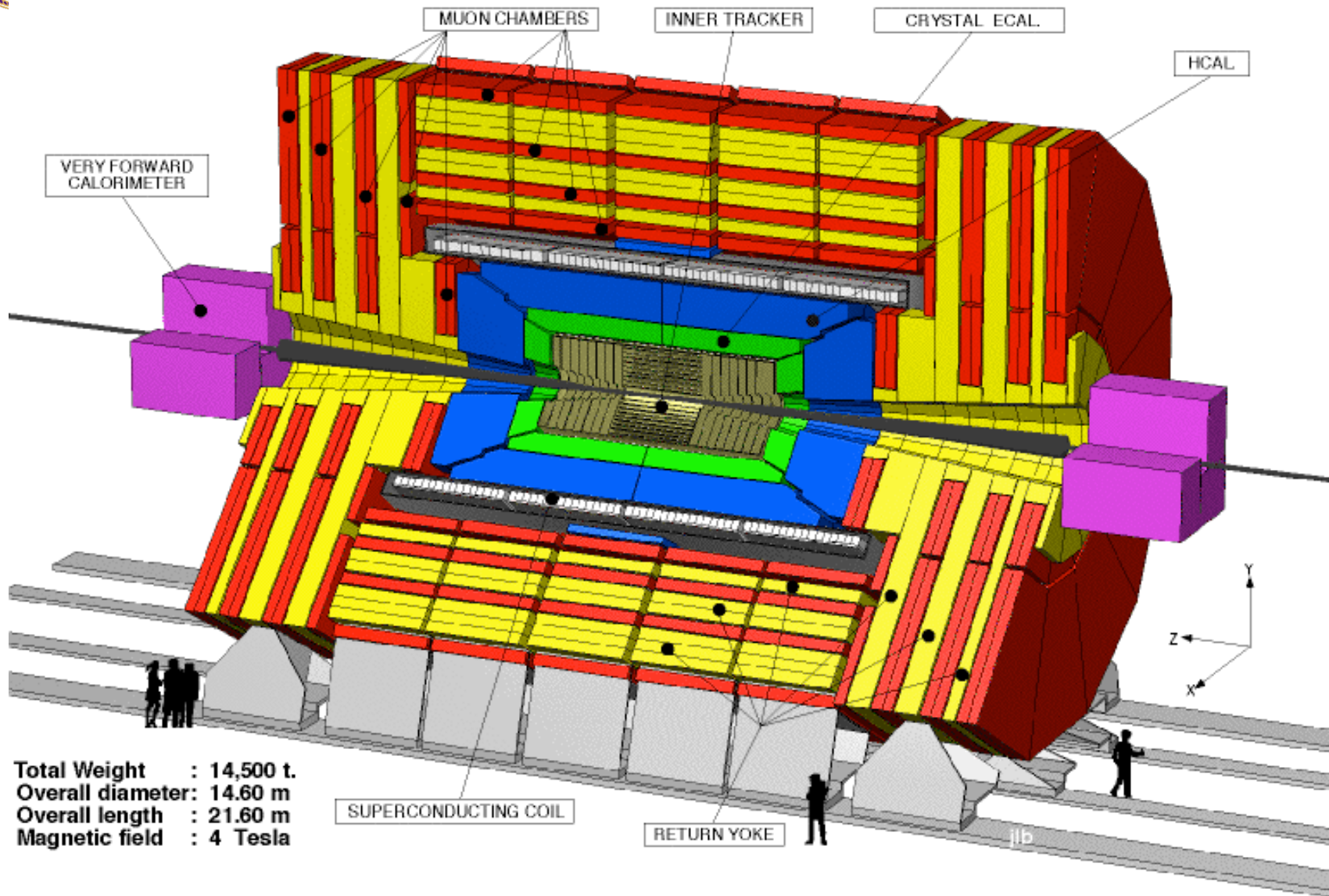
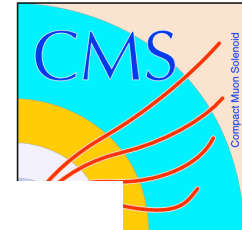


# CMS დეტექტორი





# CMS დაბეჭდობრი



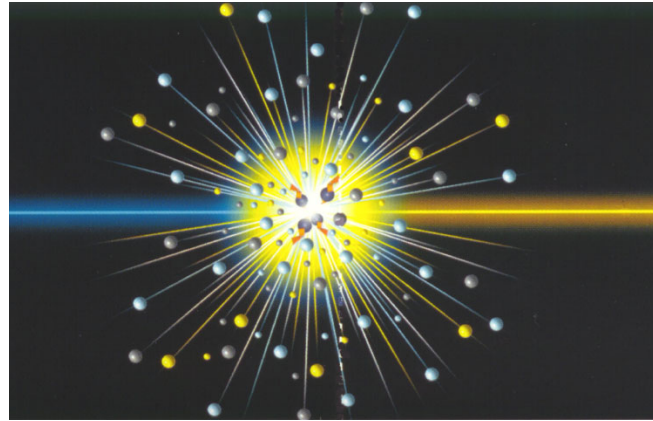




# რა ხდება შეჯახებისას?

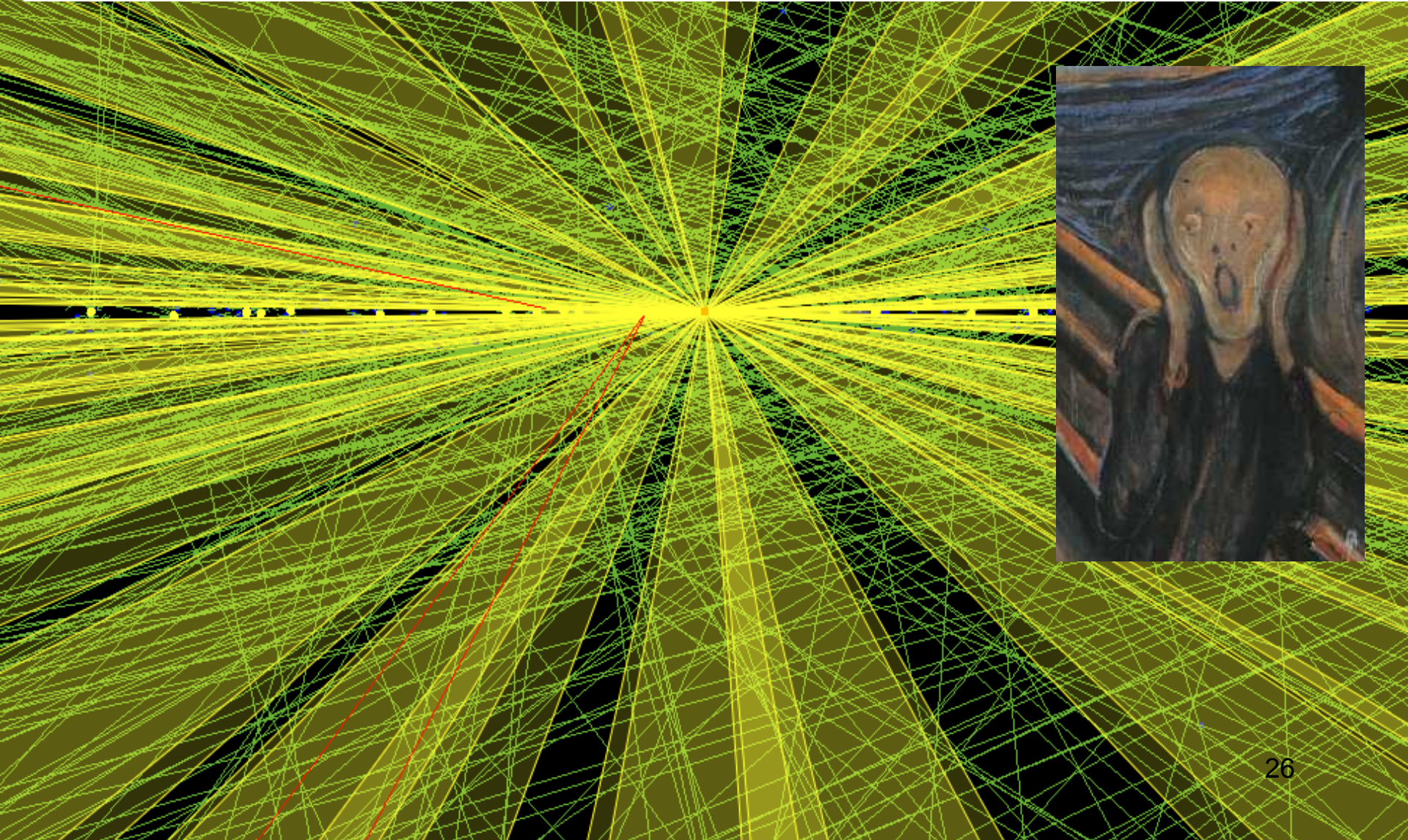


- შეჯახებისას გამოყოფილი ენერჯია წარმოქმნის სხვა ნაწილაკებს  $E = mc^2$

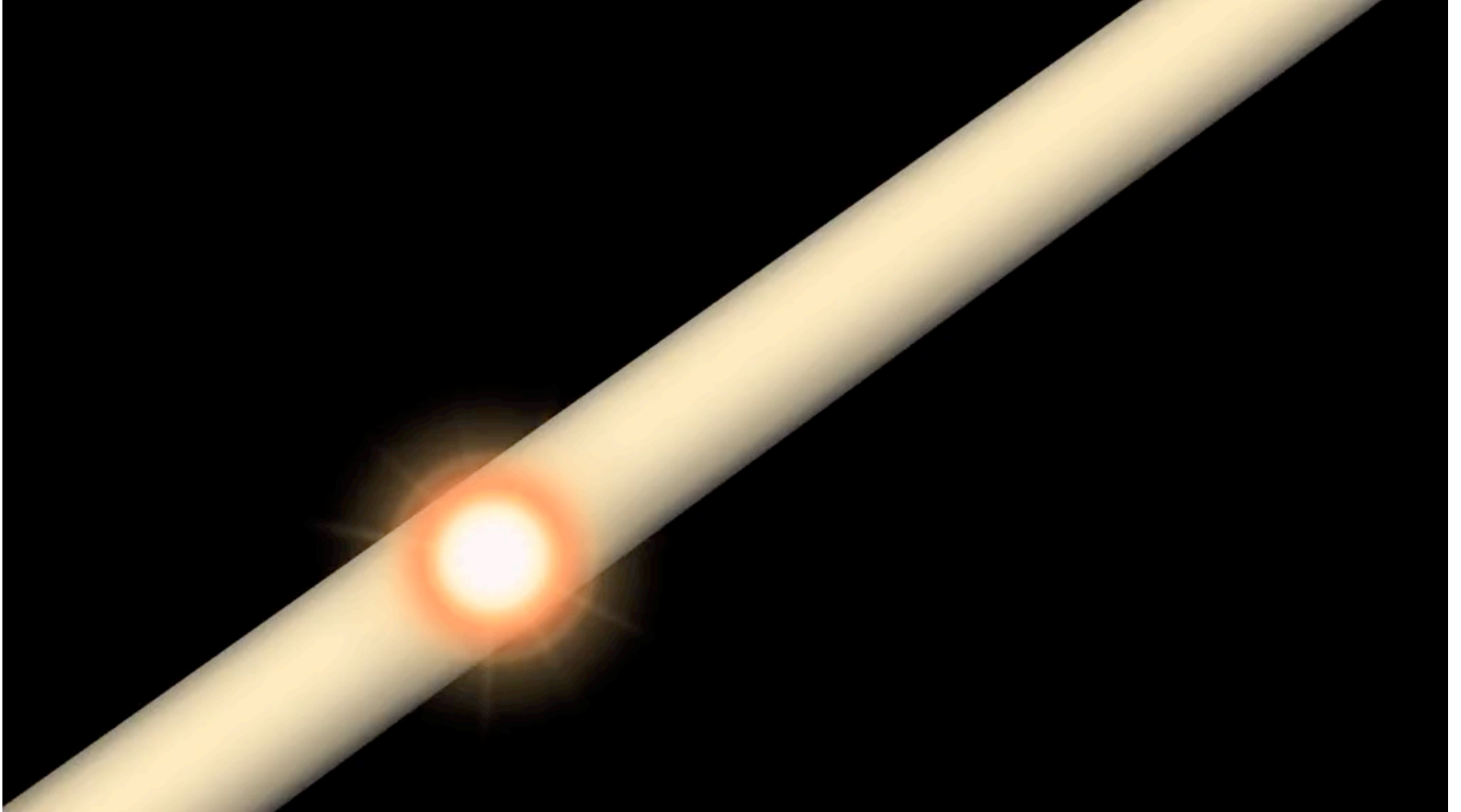


- ნაწილაკთა დეტექტორი აფიქსირებს წარმოქმნილ ნაწილაკებს
- წარმოქმნილი ნაწილაკების შესწავლა (რამდენია, რა არის მათი თვისებები) საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ რა მოხდა შეჯახებისას

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



# შეჯახება

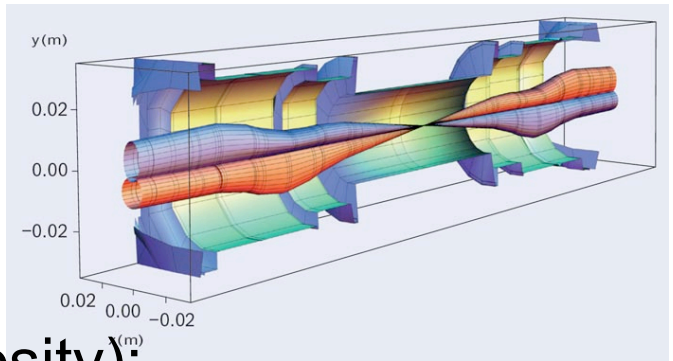


# კვეთა (cross section):

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

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

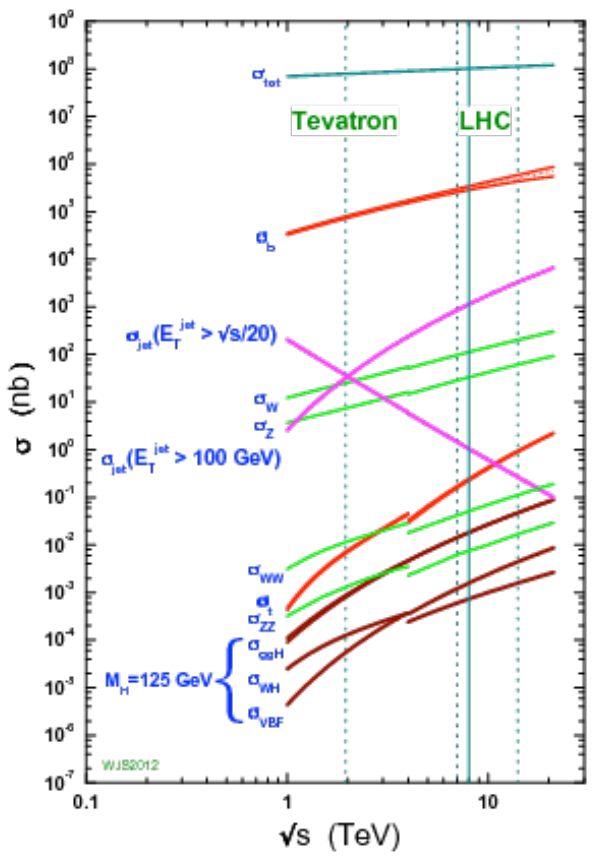
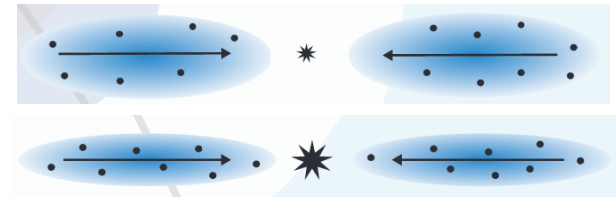
$1 \text{ nb} = 10^{-33} \text{ cm}^2$ ;  $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$ ;  
 $1 \text{ fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$



# ნათება (luminosity):

უჩვენებს რამდენად მჭიდროდაა ნაწილაკები განლაგებული გარკვეულ სივრცეში. მაღალი ნათება ნიშნავს მეტ ალბათობას 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



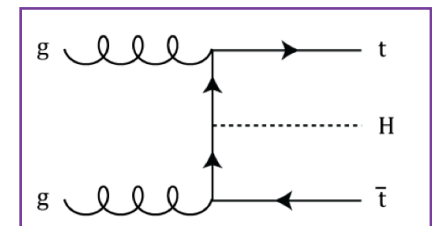
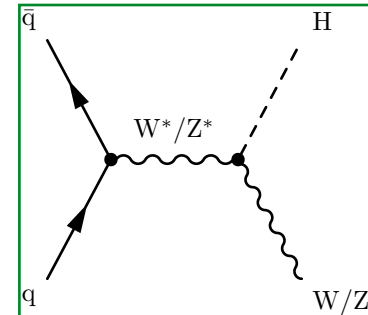
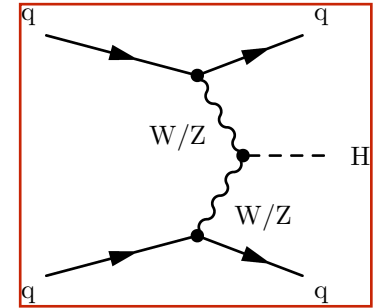
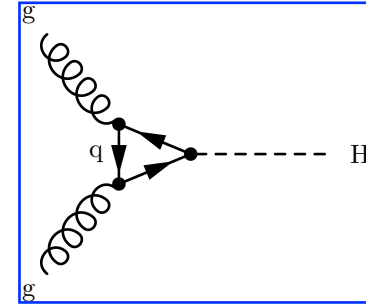
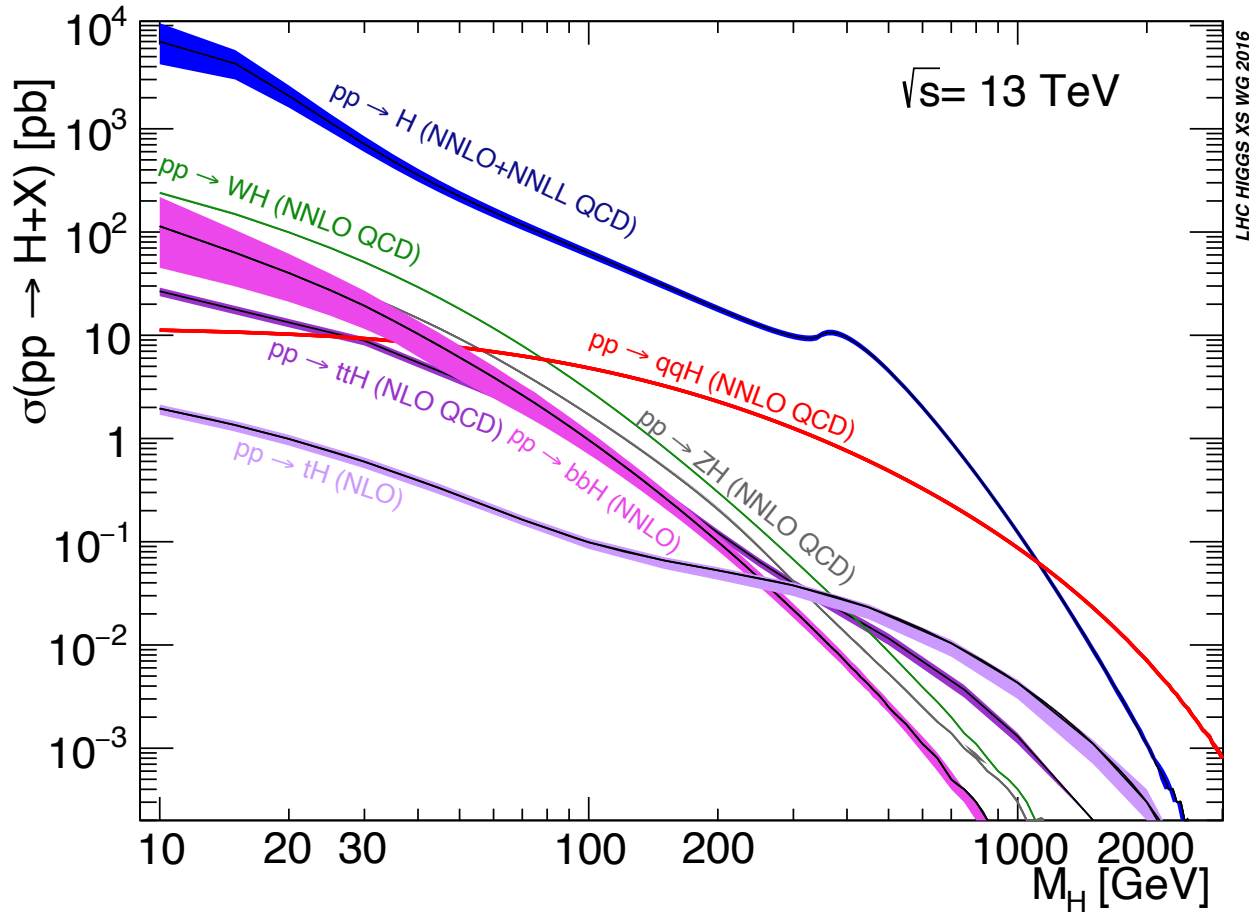
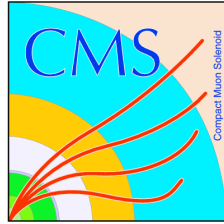
# როგორაა დაკავშირებული კვეთა და ნათება:

მოვლენათა რაოდენობა წამში = ნათება ( $\text{pb}^{-1} \text{ წმ}^{-1}$ ) x კვეთა ( $\text{pb}$ )  
 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

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

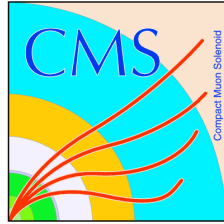


# Higgs წარმოქმნის კვეთა

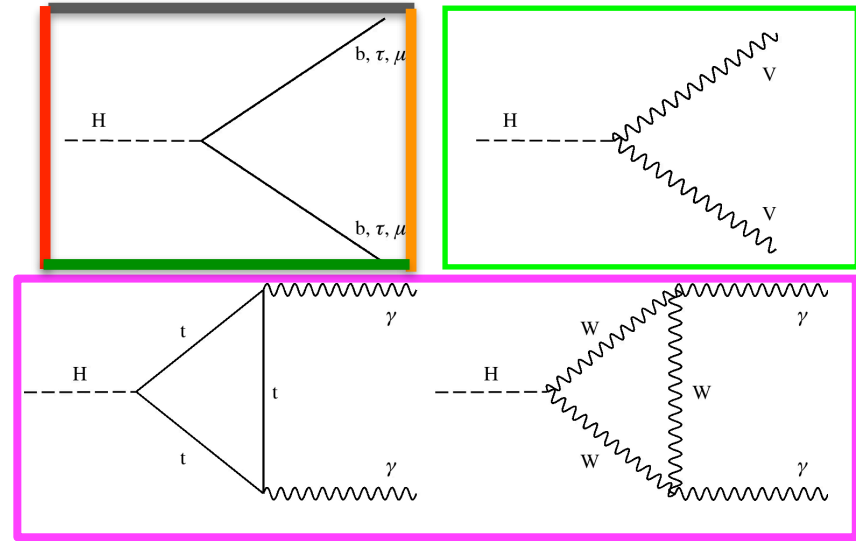
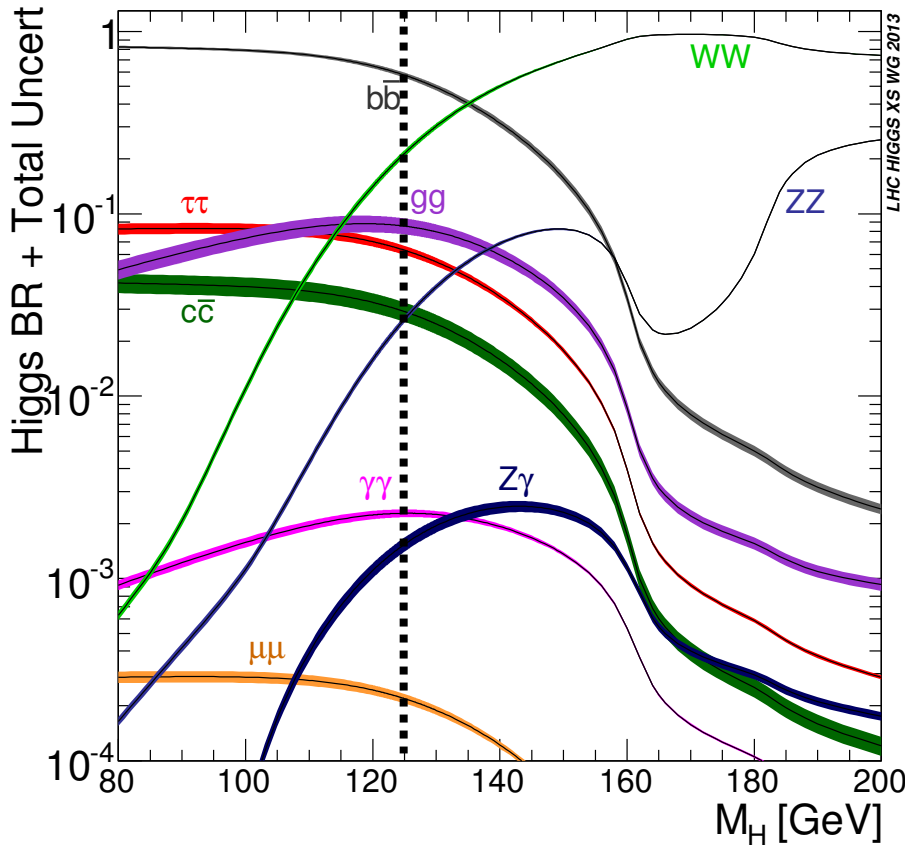




# Higgs დაშლა



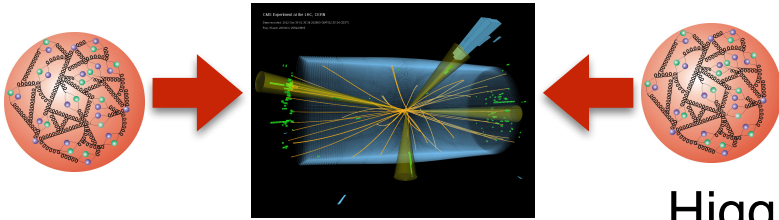
მაგალითად:



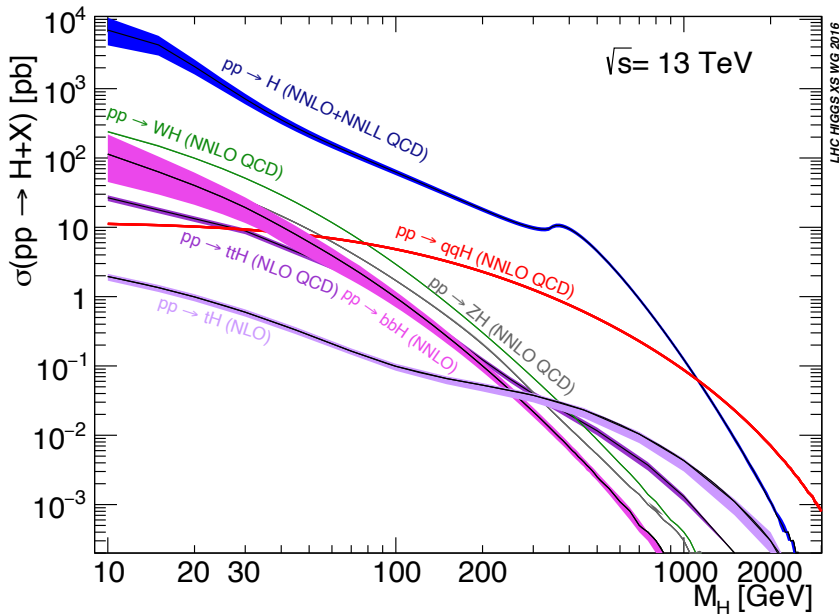
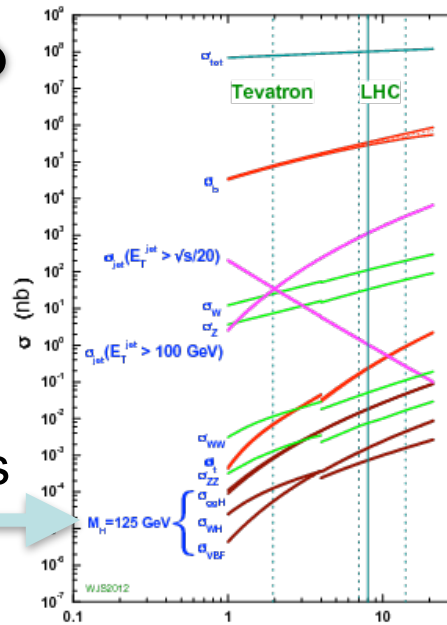
Decay channel	Branching ratio [%]
$H \rightarrow b\bar{b}$	$57.5 \pm 1.9$
$H \rightarrow WW$	$21.6 \pm 0.9$
$H \rightarrow gg$	$8.56 \pm 0.86$
$H \rightarrow \tau\tau$	$6.30 \pm 0.36$
$H \rightarrow c\bar{c}$	$2.90 \pm 0.35$
$H \rightarrow ZZ$	$2.67 \pm 0.11$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$0.228 \pm 0.011$
$H \rightarrow Z\gamma$	$0.155 \pm 0.014$
$H \rightarrow \mu\mu$	$0.022 \pm 0.001$



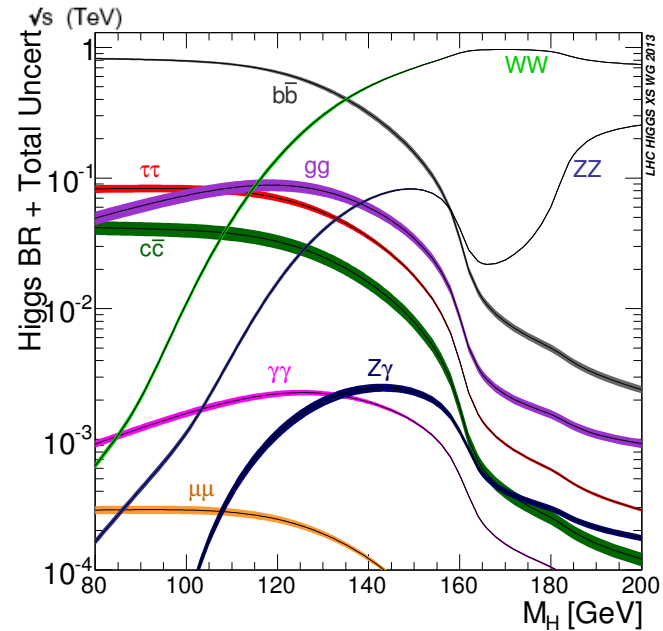
# ჰიგს წარმოქმნა და დაშლა



Higgs

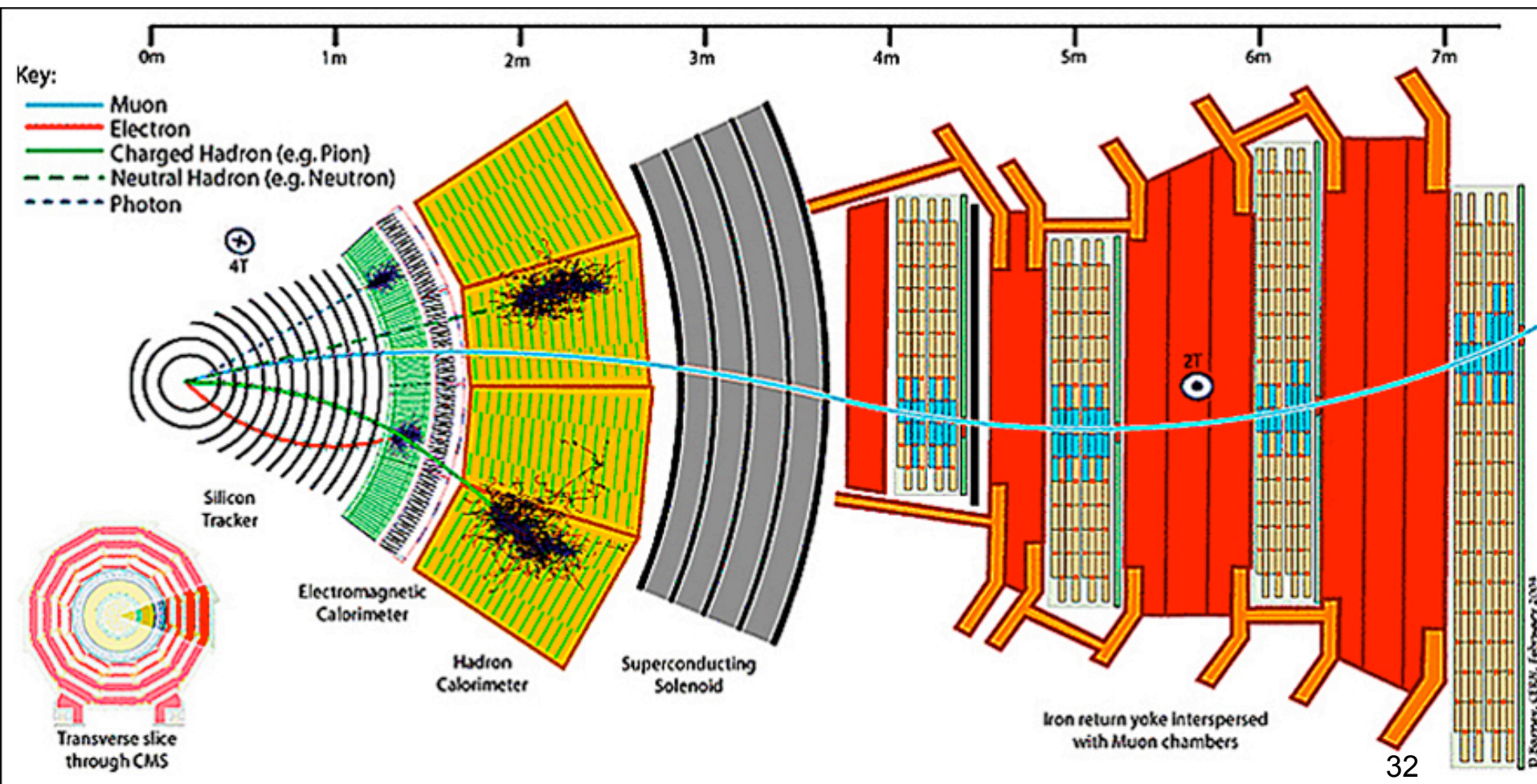


⊗



ჩვენ ვზომავთ წარმოქმნის და დაშლის ერთობლიობას

# სხვადასხვა ნაწილაკის ურთიერთქმედება CMS დეტექტორთან





# $H \rightarrow ZZ \rightarrow ee\mu\mu$ კანდიდატი მოვლენა



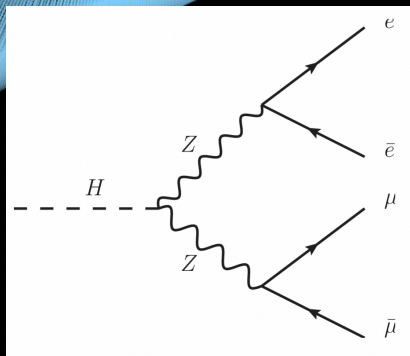
CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT  
Run/Event: 195099 / 137440354

Electron

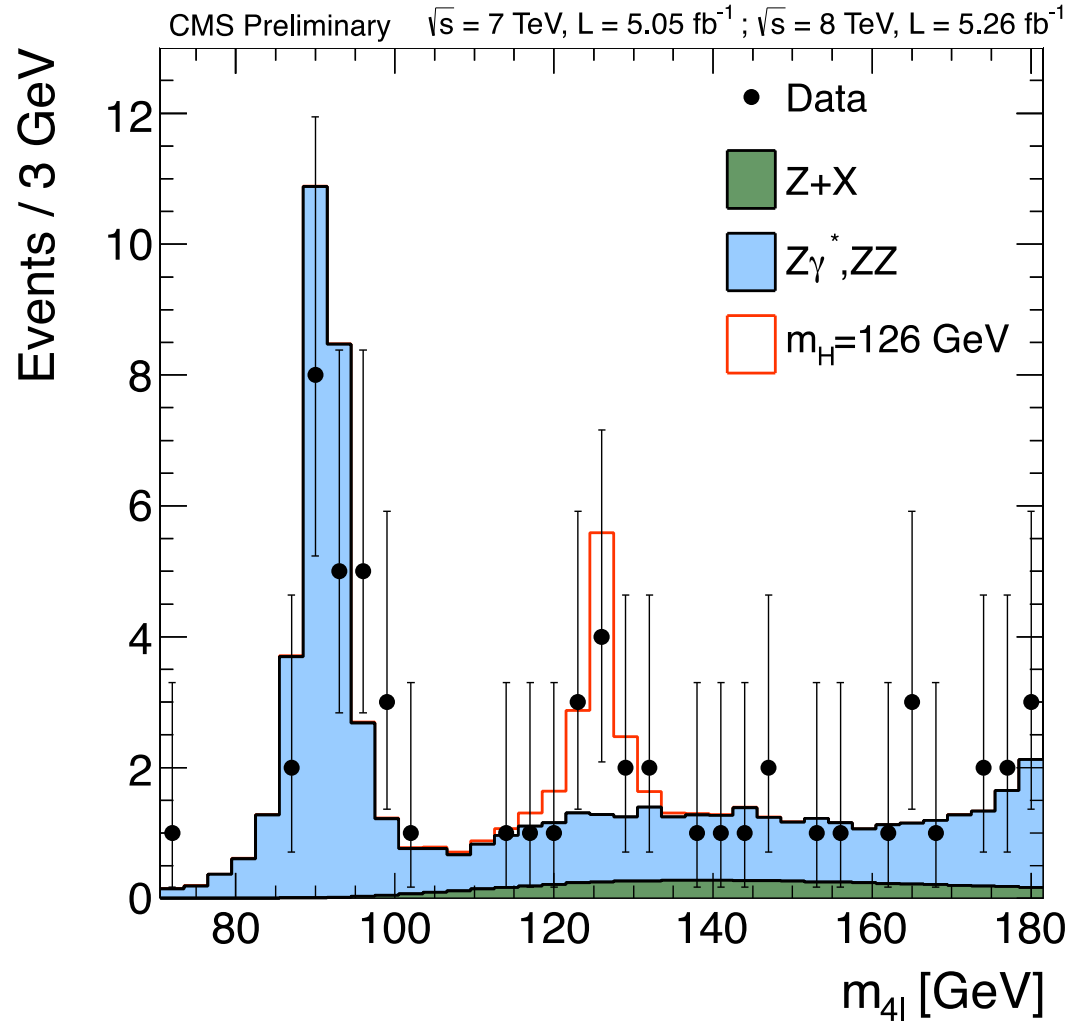
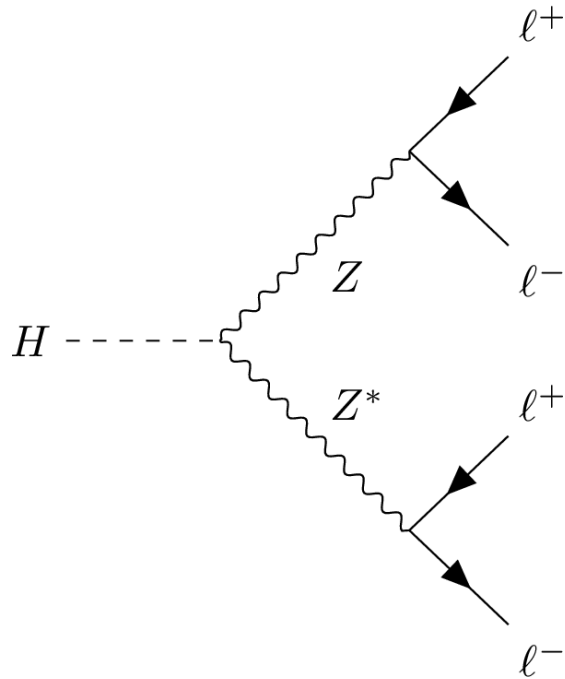
Muon

Electron

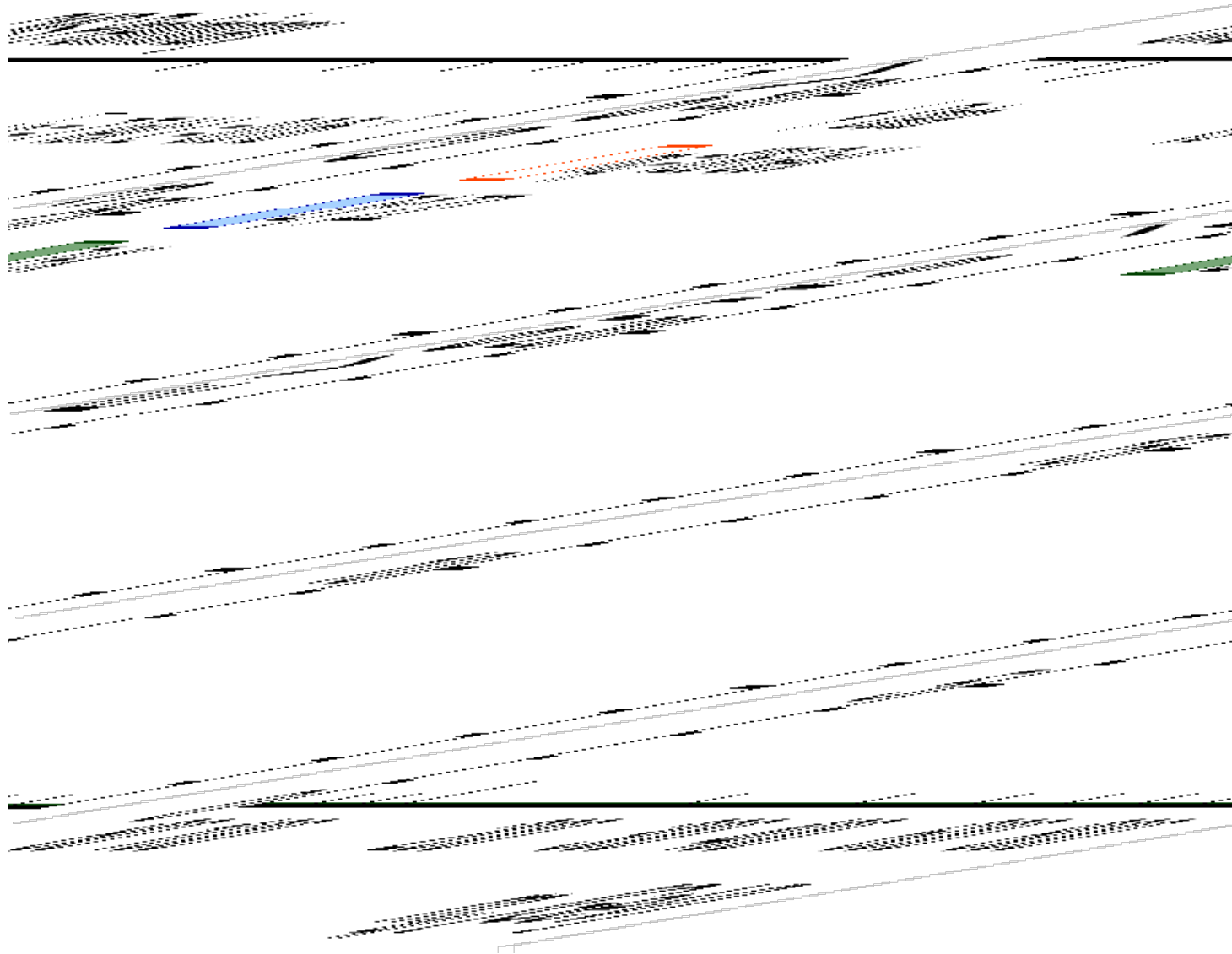
Muon



# $H \rightarrow ZZ \rightarrow e\mu\mu / eeee / \mu\mu\mu$ 2012წ ივლისში



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



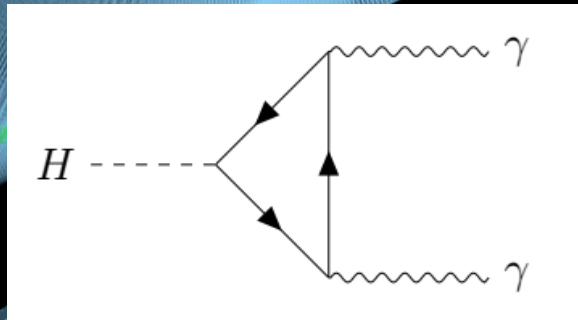
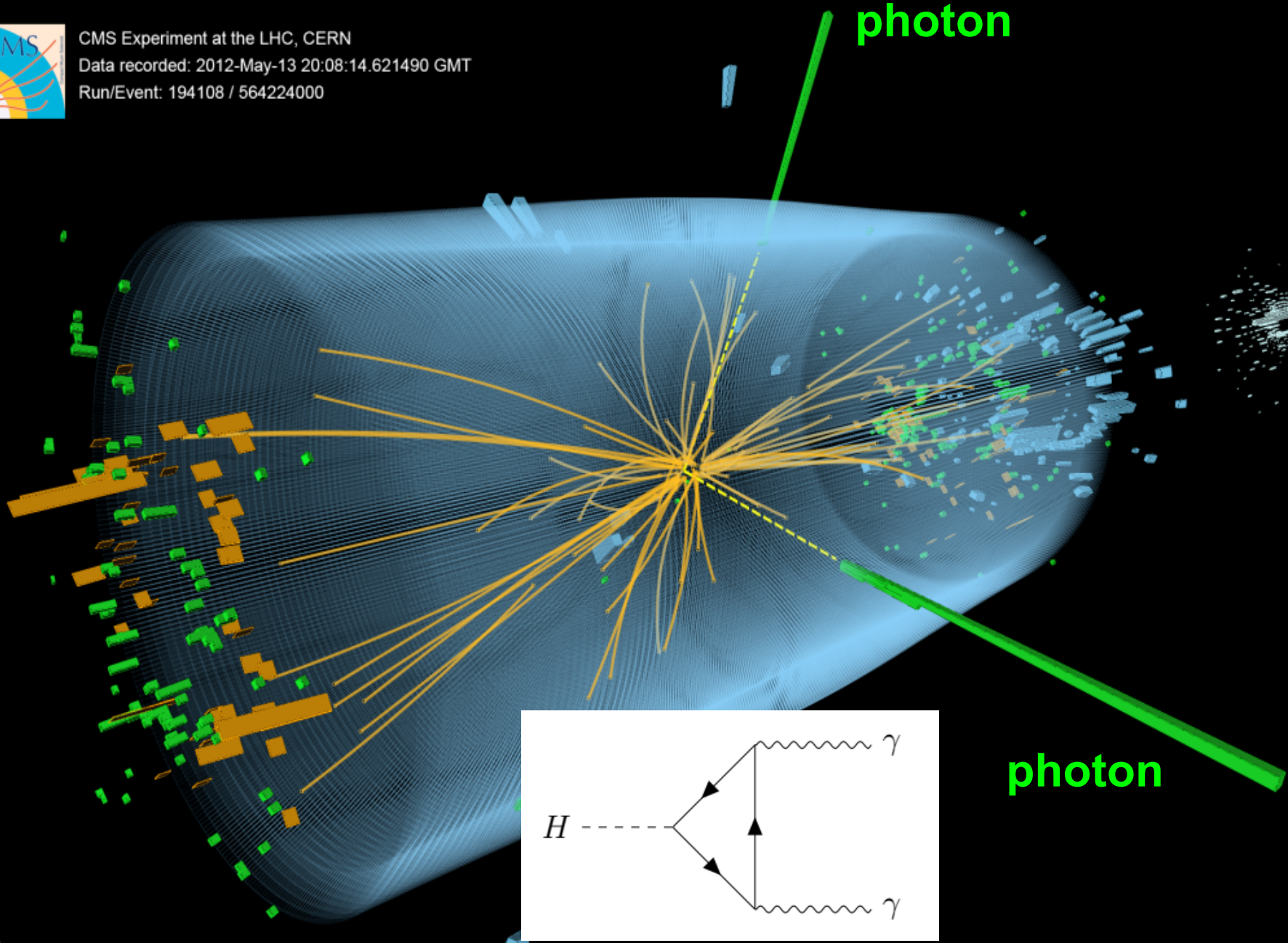
For viewing Higgs mass with time, follow this link:

[https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/Hig13002TWiki/HZZ4l\\_animated\\_slower.gif](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/Hig13002TWiki/HZZ4l_animated_slower.gif)

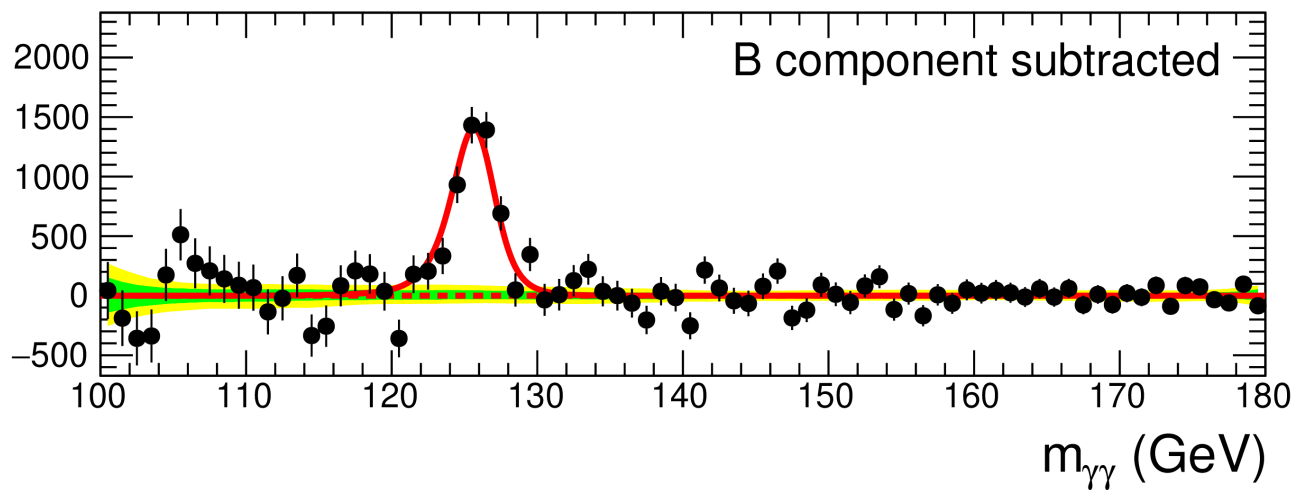
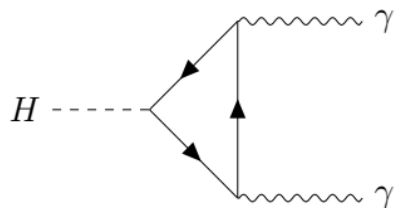
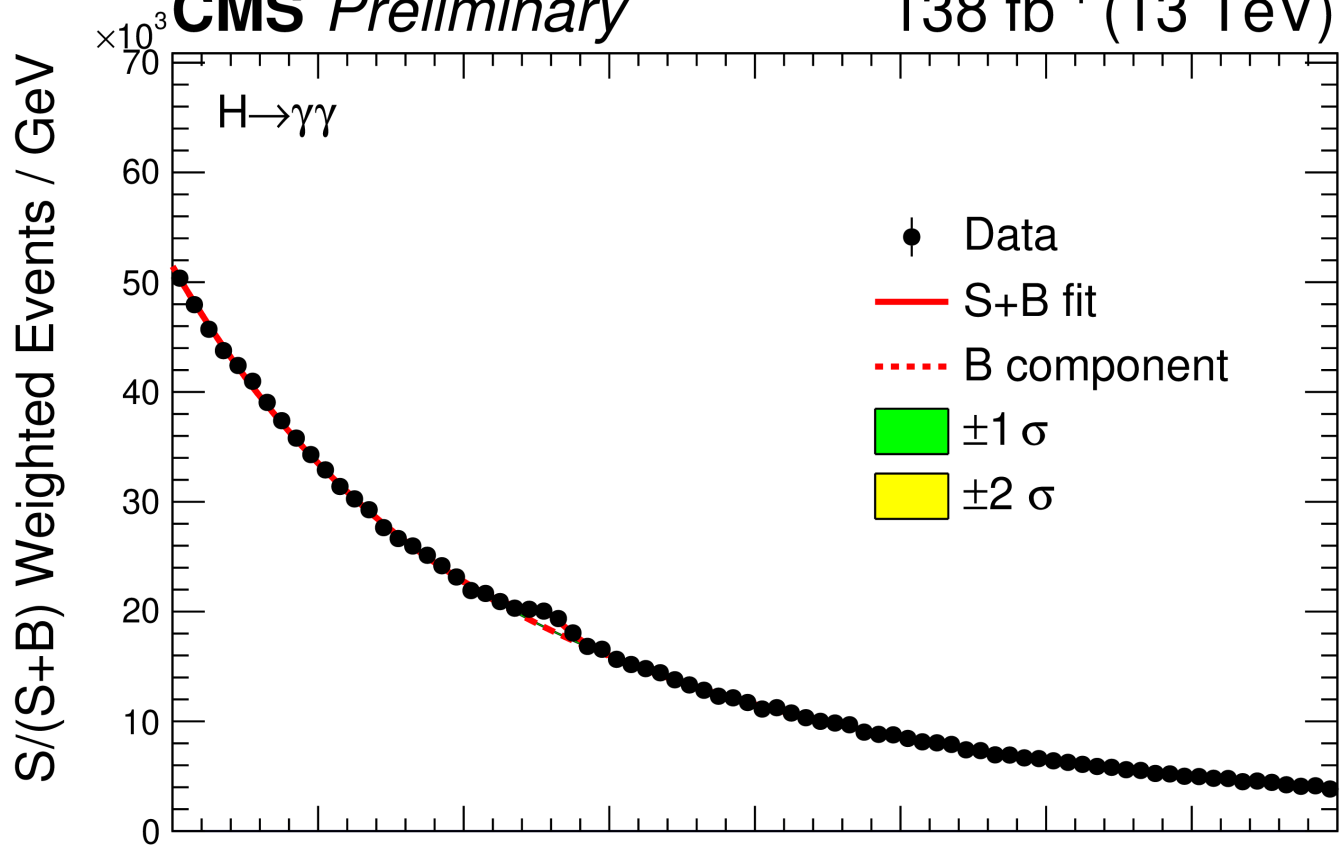
# $H \rightarrow \gamma\gamma$ კანდიდატი მოვლენა

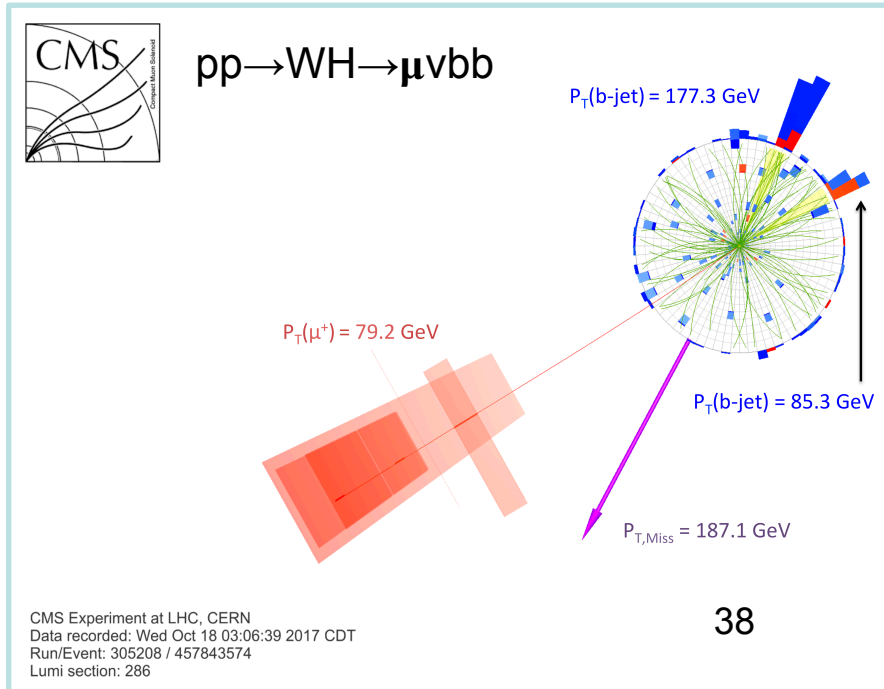
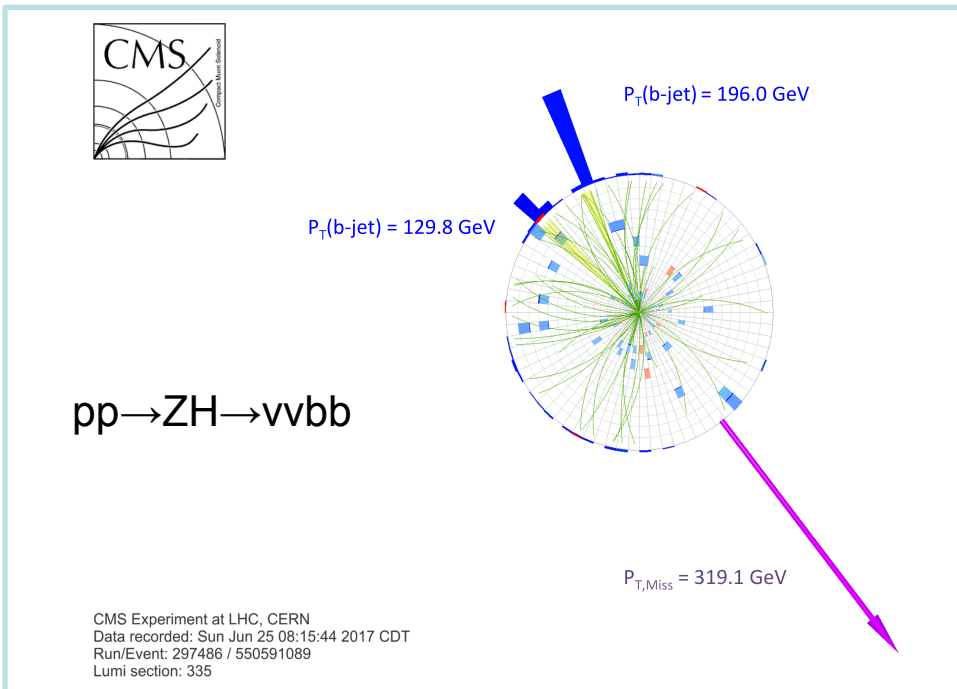
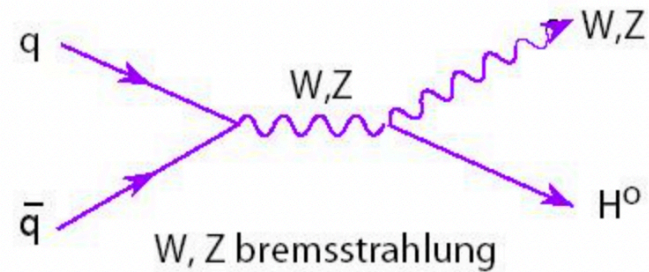
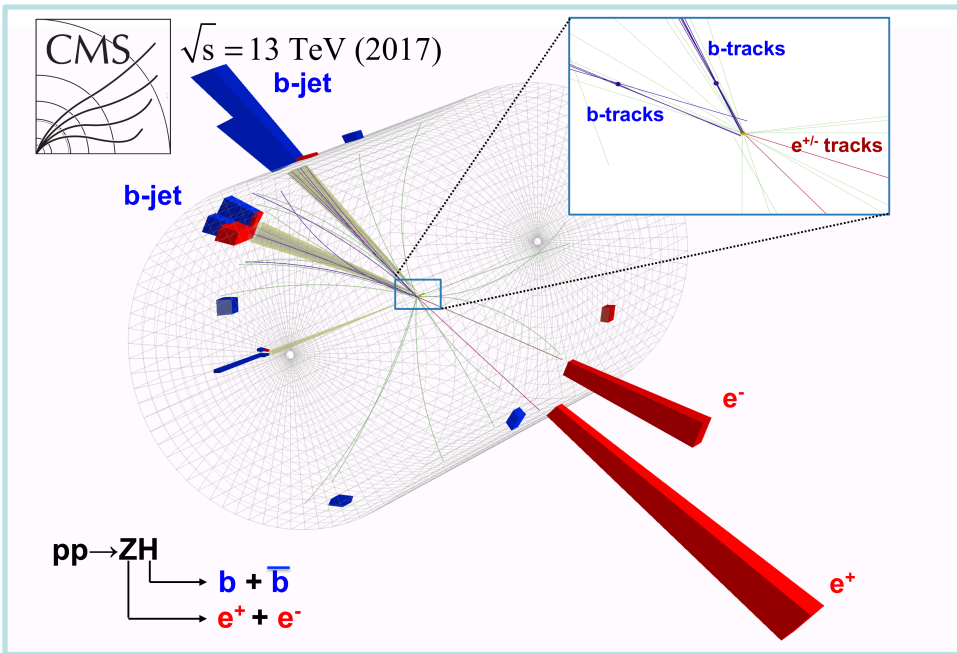


CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000

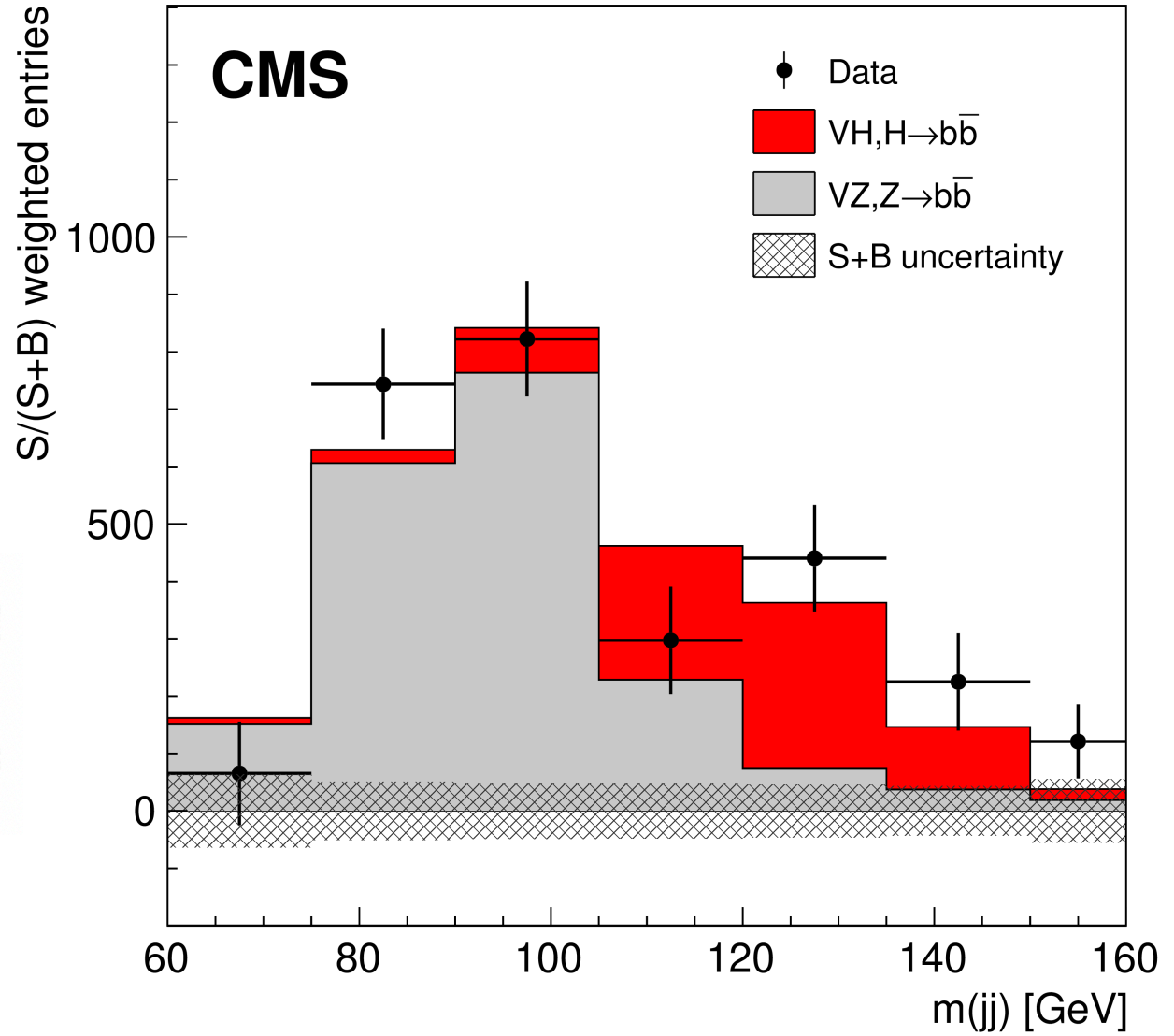
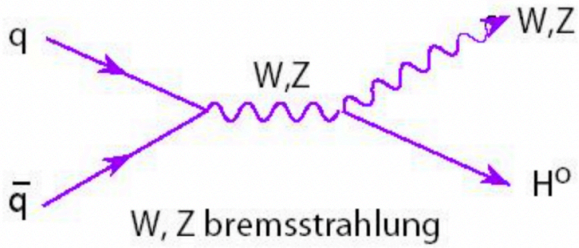


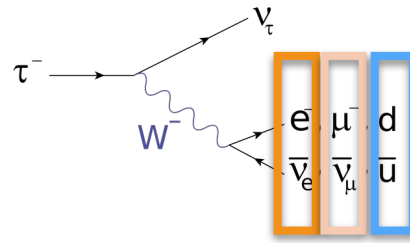
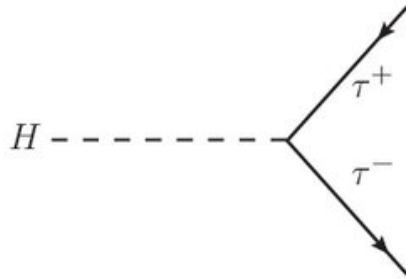
photon



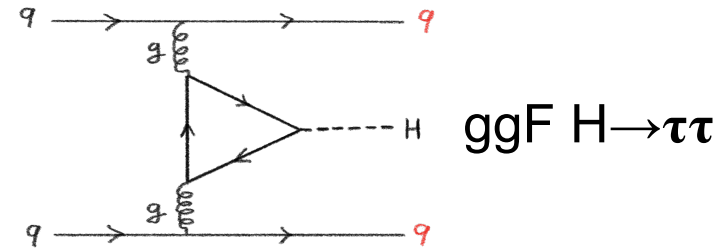
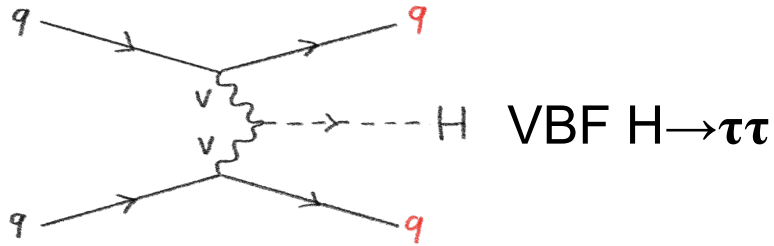
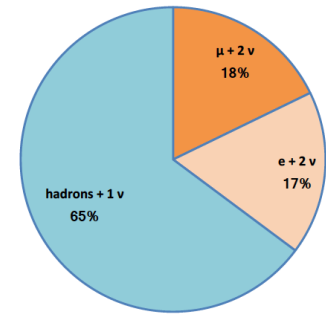


77.2 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)

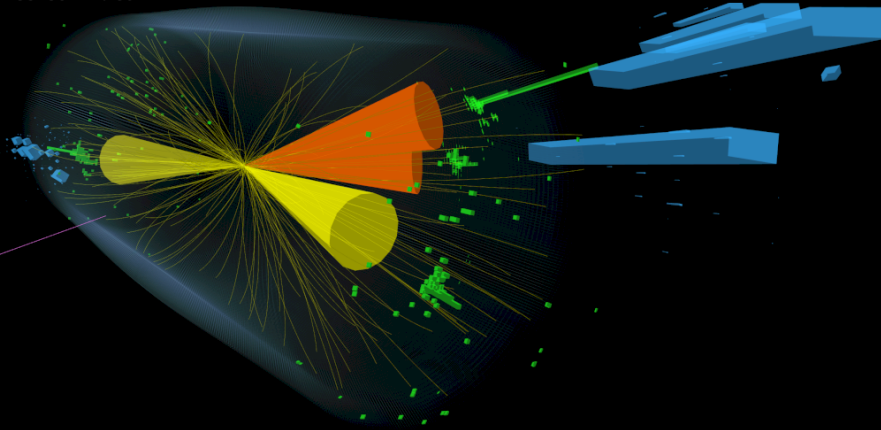




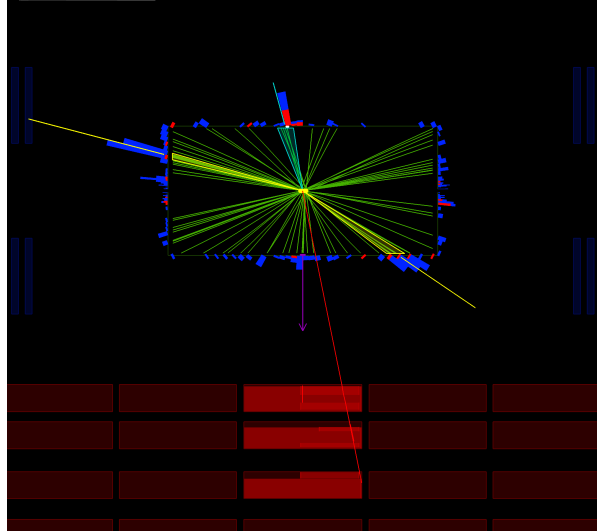
TAU DECAYS



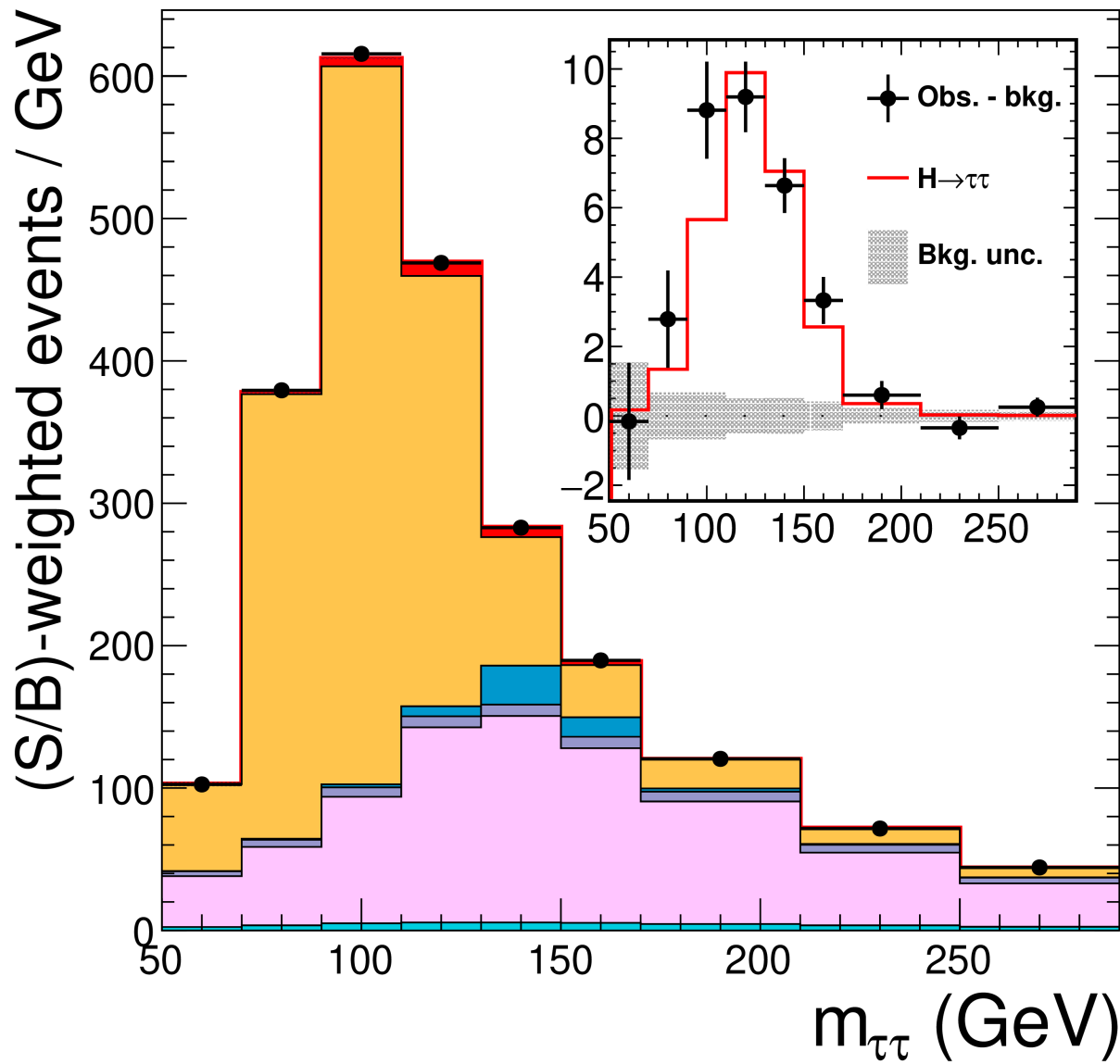
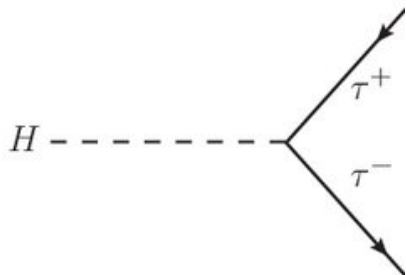
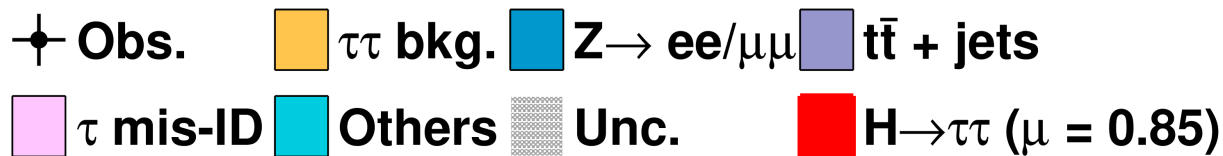
CMS Experiment at the LHC, CERN  
 Data recorded: 2018-Jun-02 02:23:55.014080 GMT  
 Run / Event / LS: 317320 / 1288436121 / 891



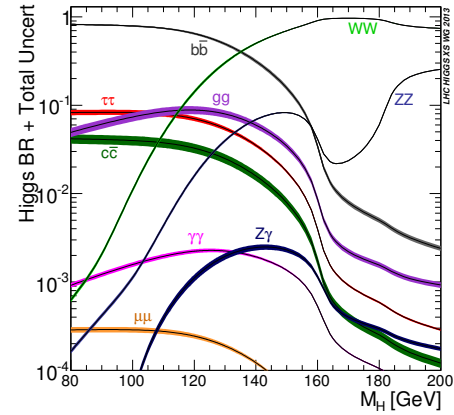
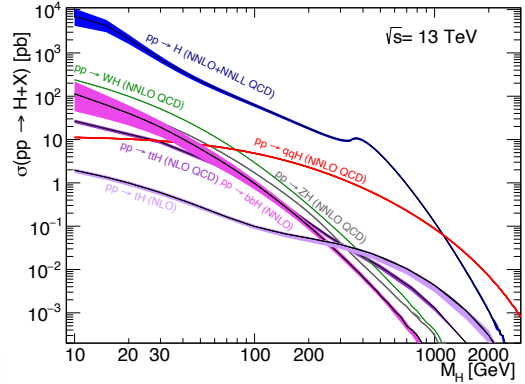
CMS Experiment at LHC, CERN  
 Data recorded: Fri Sep 7 05:00:18 2018 CEST  
 Run/Event: 322356 / 366863438  
 Lumi section: 194



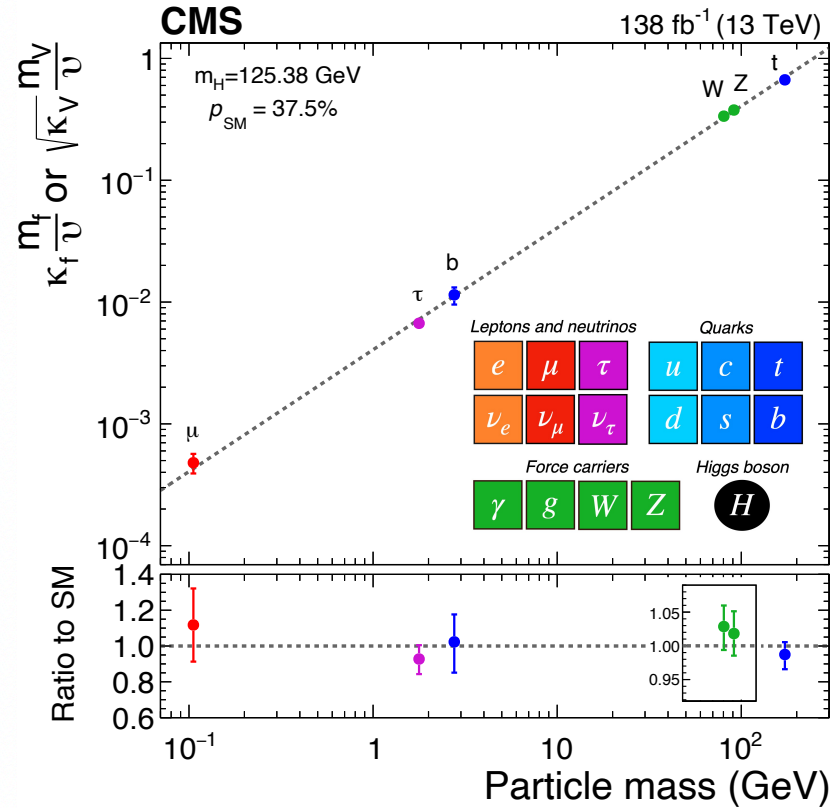
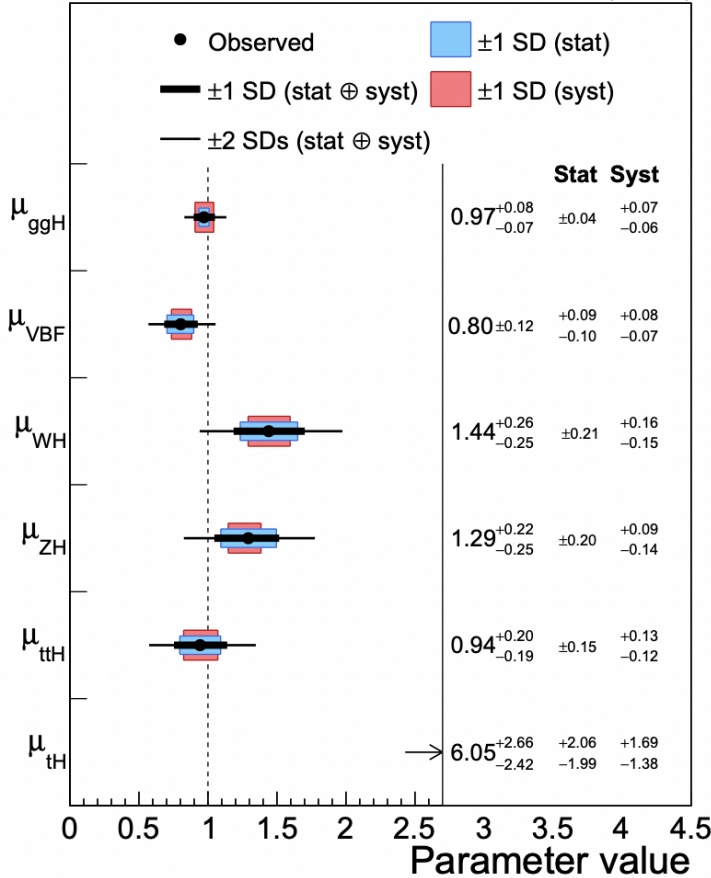




# Higgs ბომბონი აწლის 11 წ.



**CMS** 138 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)





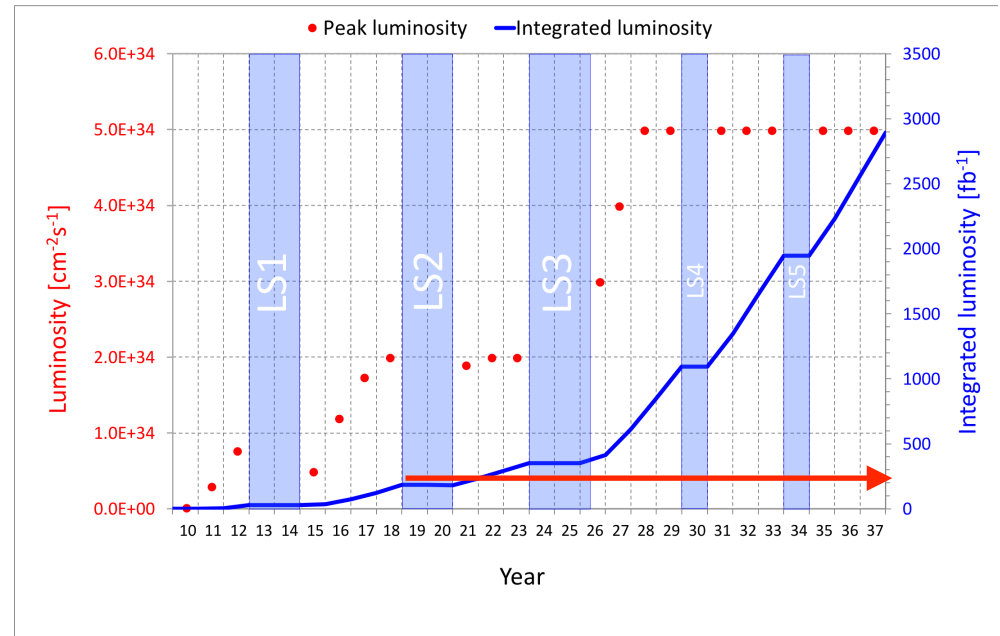
# LHC პროგრამა



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



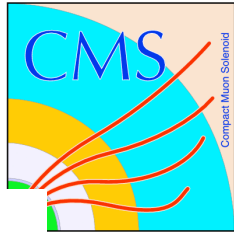
- CERN LHC ამარქარებელი და არსებული ექსპერიმენტები არის დიდი წარმატება
- მოხრა სტანდარტული პროცესების წარმატებით გაზომვა.
- 2012-ში იყო Higgs ბოზონის აღმოჩენა, სრული ტემპით მიმდინარეობს მისი თვისებების დეტალური შესწავლა.
- LHC -ის სრული შესაძლებლობების სრულ რეალიზებას დაჭრდება მომდევნო 15-20 წელი
- Higgs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



# BACKUP



# ერთეულები



SI სისტემაში:

$$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$s_z = \pm \hbar/2 = \pm(1/2) \times 1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

ნაწილაკთა ფიზიკაში:

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 1$$

$$m_e = 0.51 \text{ MeV}/c^2$$

$$e = -1 \text{ proton charge}$$

$$s_z = \pm 1/2$$

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:

$$1 \text{ unit of length} = 1 \text{ GeV}^{-1} \simeq 0.1978 \text{ fm}$$

$$1 \text{ unit of time} = 1 \text{ GeV}^{-1} \simeq 0.6588 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

$$1 \text{ unit of energy} = 1 \text{ GeV}$$

$$1 \text{ unit of momentum} = 1 \text{ GeV} \quad \text{sometimes GeV}/c$$

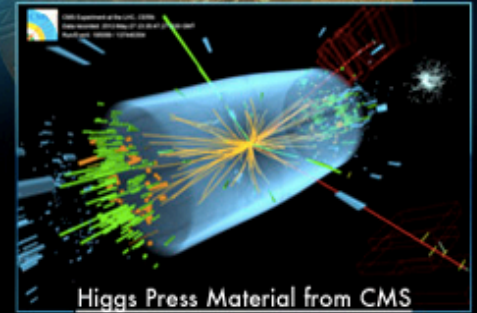
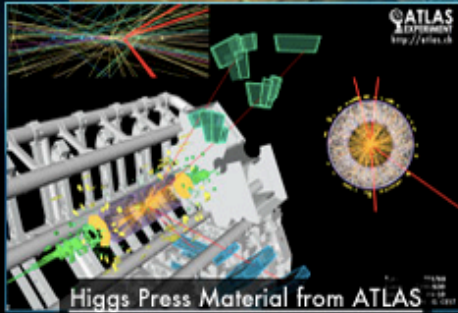
$$1 \text{ unit of mass} = 1 \text{ GeV} \quad \text{sometimes GeV}/c^2$$

Congratulations to Professors

# François Englert & Peter Higgs

for the

## 2013 Nobel Prize in Physics



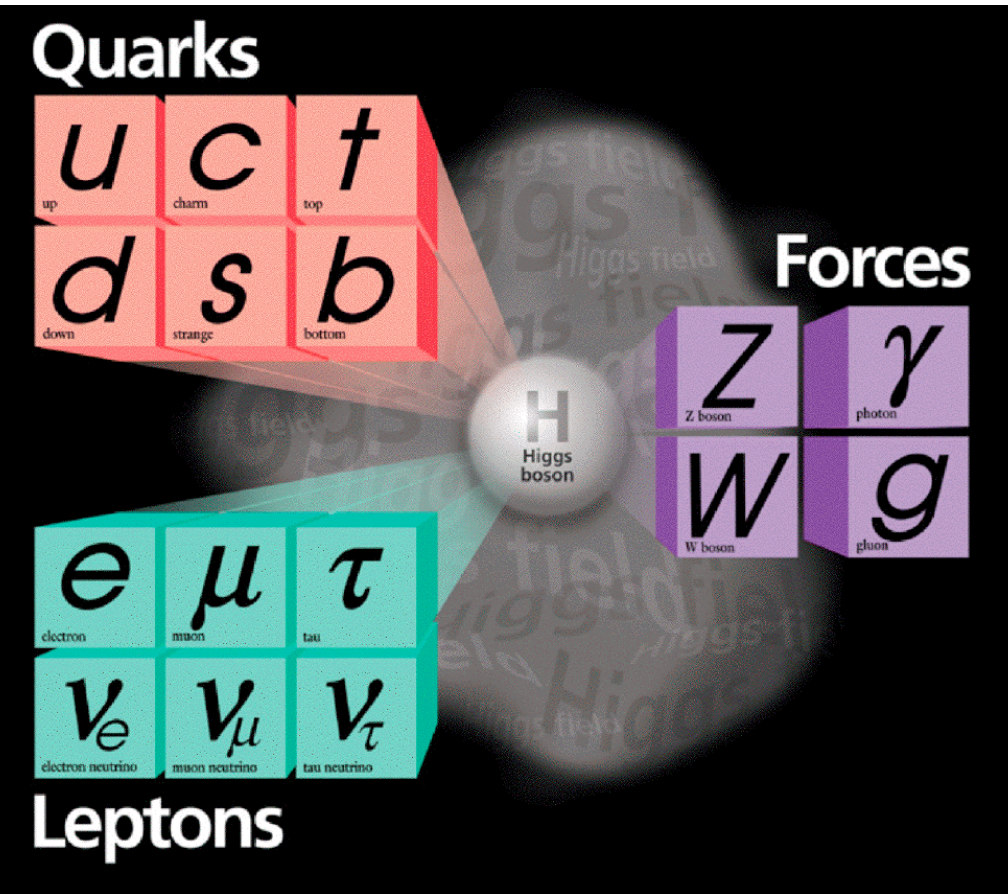
საწყისი თეორიის ნ ავტორთაგან, პირველ ორს მიენიჭა **ნობელის პრემია** იმ თეორიის პოსტულირებისთვის რაც ხსნის ელემენტარული ნაწილაკების მასის წარმოქმნის მექანიზმს.

“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?

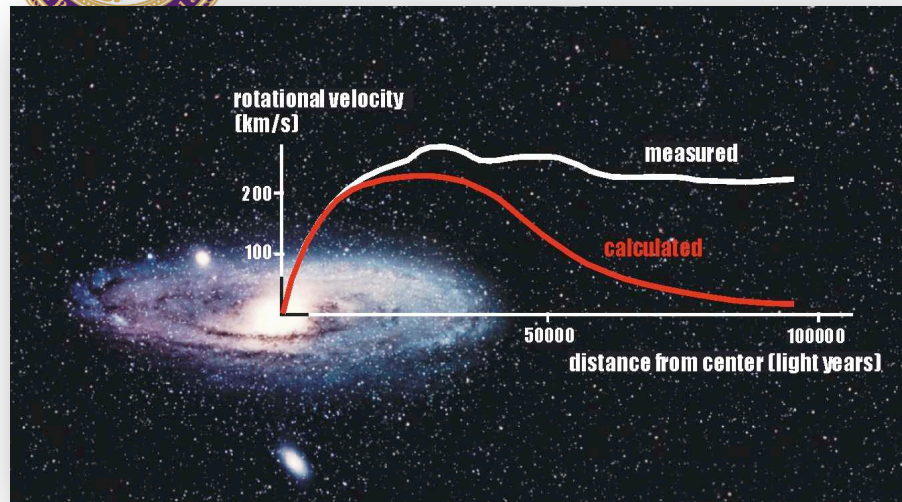


- რატომ გვაქვს ფერმიონების სამი თაობა სამყაროში?
- რატომაა გრავიტაცია ასეთი სუსტი?
- რა დაემართა ანტი-მატერიას?
- რა არის ბნელი მატერია?
- და ა.შ.





# ბნელი მატერია

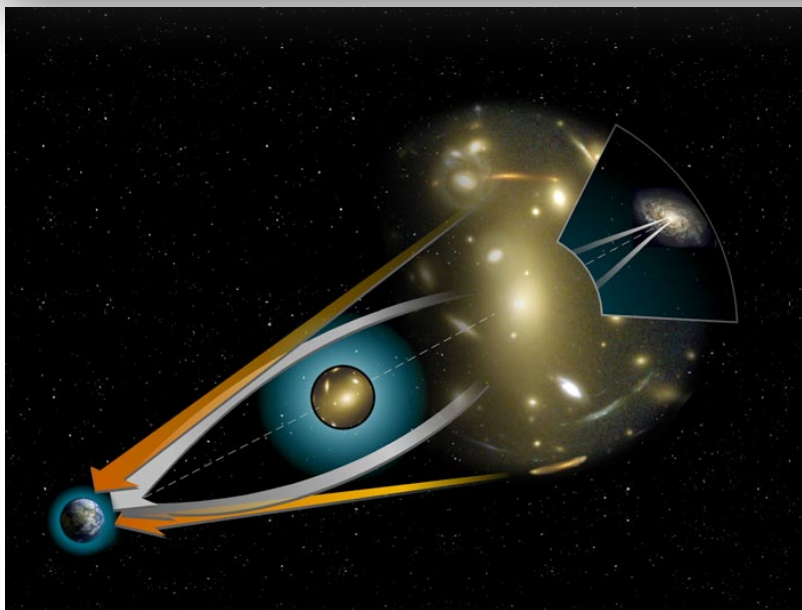


Fritz Zwicky



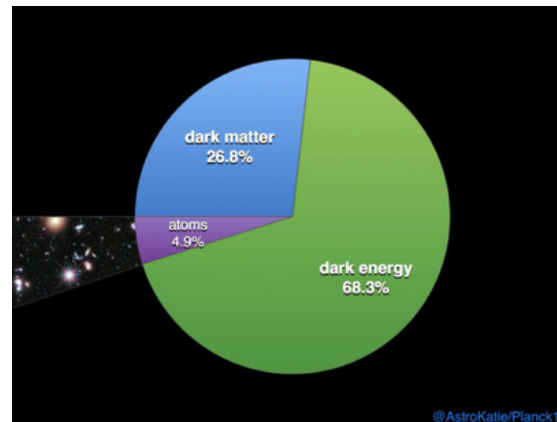
Vera Rubin

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



Gravitational lensing

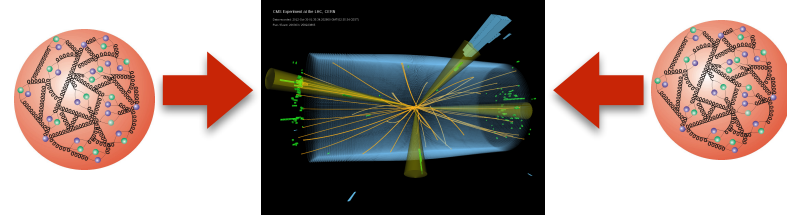
Keti Kaadze, Kansas State University



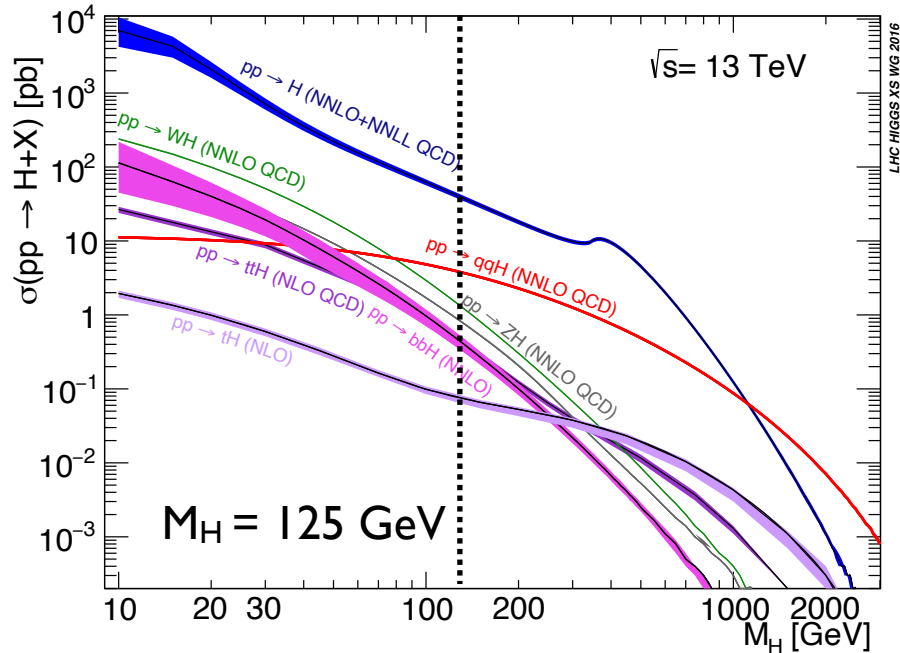
©AstroKatie/Planck13



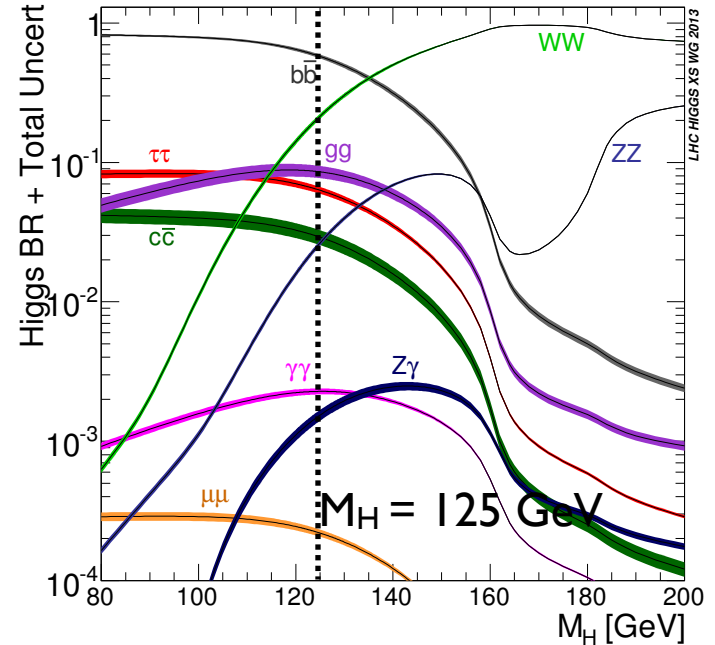
# Higgs წარმოქმნის კვება და Higgs დაშლა



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