

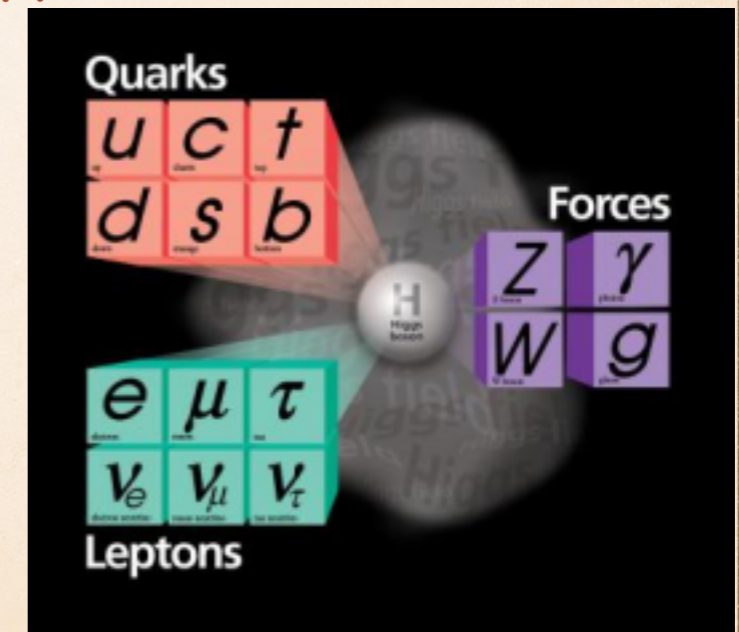
Цернов јавни час - Мастерклас
Подгорица, 23. март 2018.

Физика на експериментима Великог сударача хадрона

Лидија Живковић,
Институт за физику Београд



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. + \bar{\psi}_i \gamma_j \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour La Recherche Nucléaire



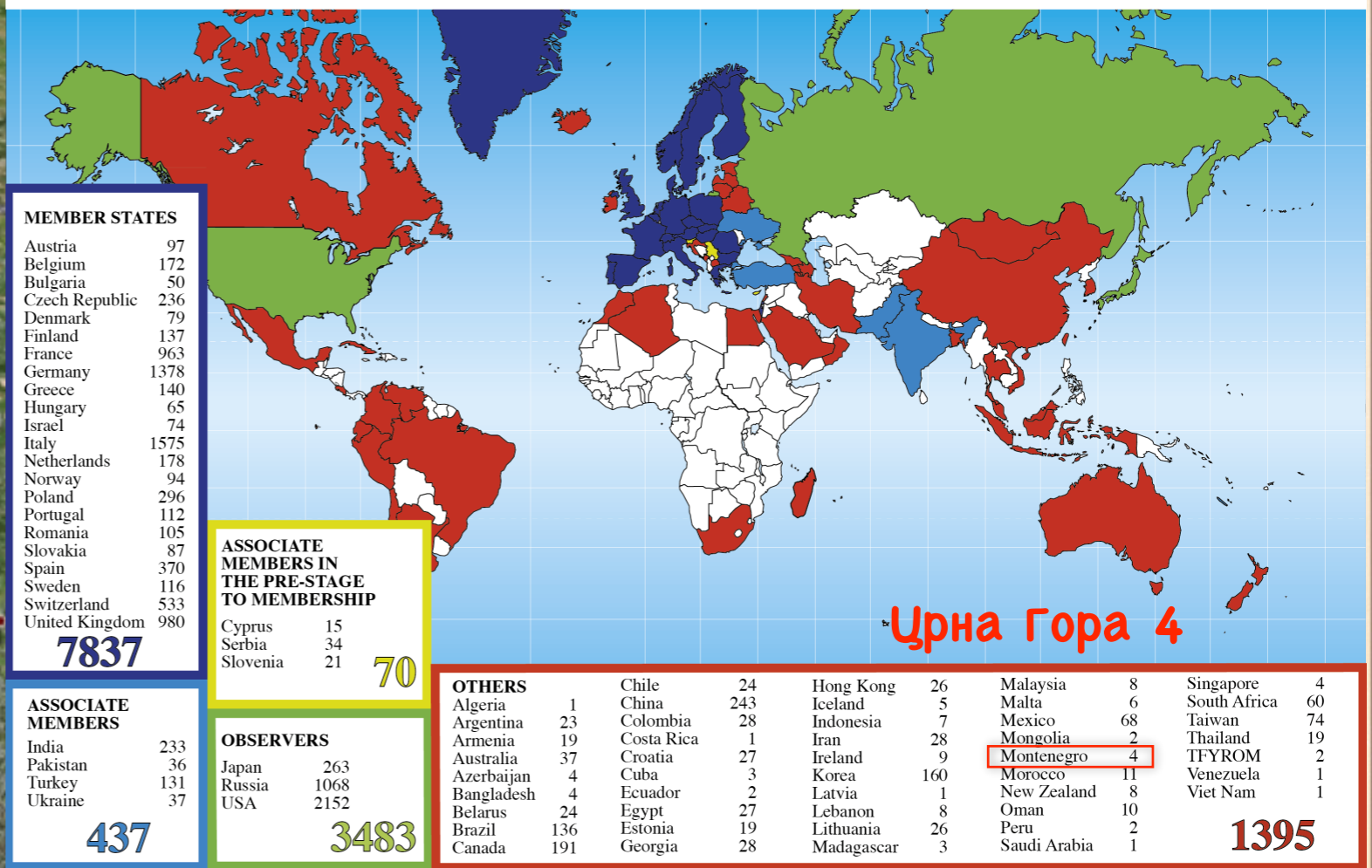
Павле Савић

О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 5 July 2017



О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Мноштво изузетних достигнућа

❖ Наука

❖ 1983: W и Z бозони (СПТС)

❖ 1989: Број фамилија лаких неутрина (ЛЕТТ)

❖ 1995: Прва синтеза анти-водоника

❖ 2012: Хигсов Бозон (ЛХЦ)

❖ Техника:

❖ 1989 Први web сервер из кога је настао модеран интернет

❖ Допринос у развоју технологија...

Нова честица

- ❖ У јулу 2012 ударна вест на свим светским медијима била је из науке, физике
 - **Откривена је нова честица - Хигсов бозон**
- ❖ Резултати су објављени у Церну уз директан пренос који су пратили научници широм света



NAUKA
Saznanje o Higsovom bozonu pred vratima
Iclaz / 03.07.2012. u 13:23
KOMENTARE: 64 / POŠALJITE KOMENTAR / ČITANOST: 1548 / PREPORUKE: 17

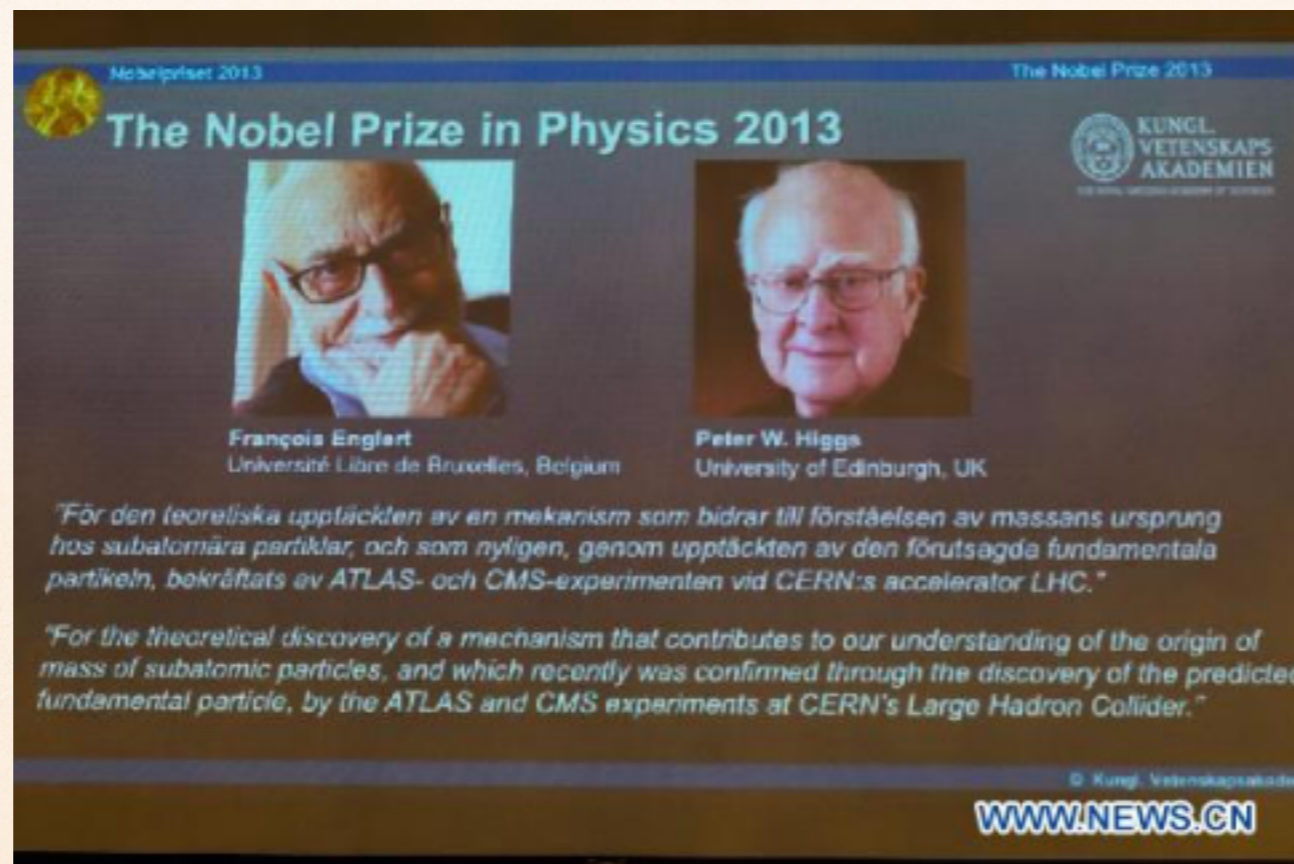
Sutra u 9 ujutro u Cernu ce zapoceti seminari sa najnovijim rezultatima o Higsovom bozonu. Seminare ce drzati Joseph Incandela sa Univerziteta Kalifornije iz Santa Barbare i Fabiola Gianoti iz Cerna. Joe je spokespersion CMS-a, Fabiola Atlasa. Spokespersion je prakticno glavni menadzjer eksperimenta.



Нобелова награда за физику 2013

- ❖ Додељена за **теоријски рад** који описује механизам који доприноси нашем разумевању порекла маса
- ❖ Потврђено открићем **нове честице** у Церну

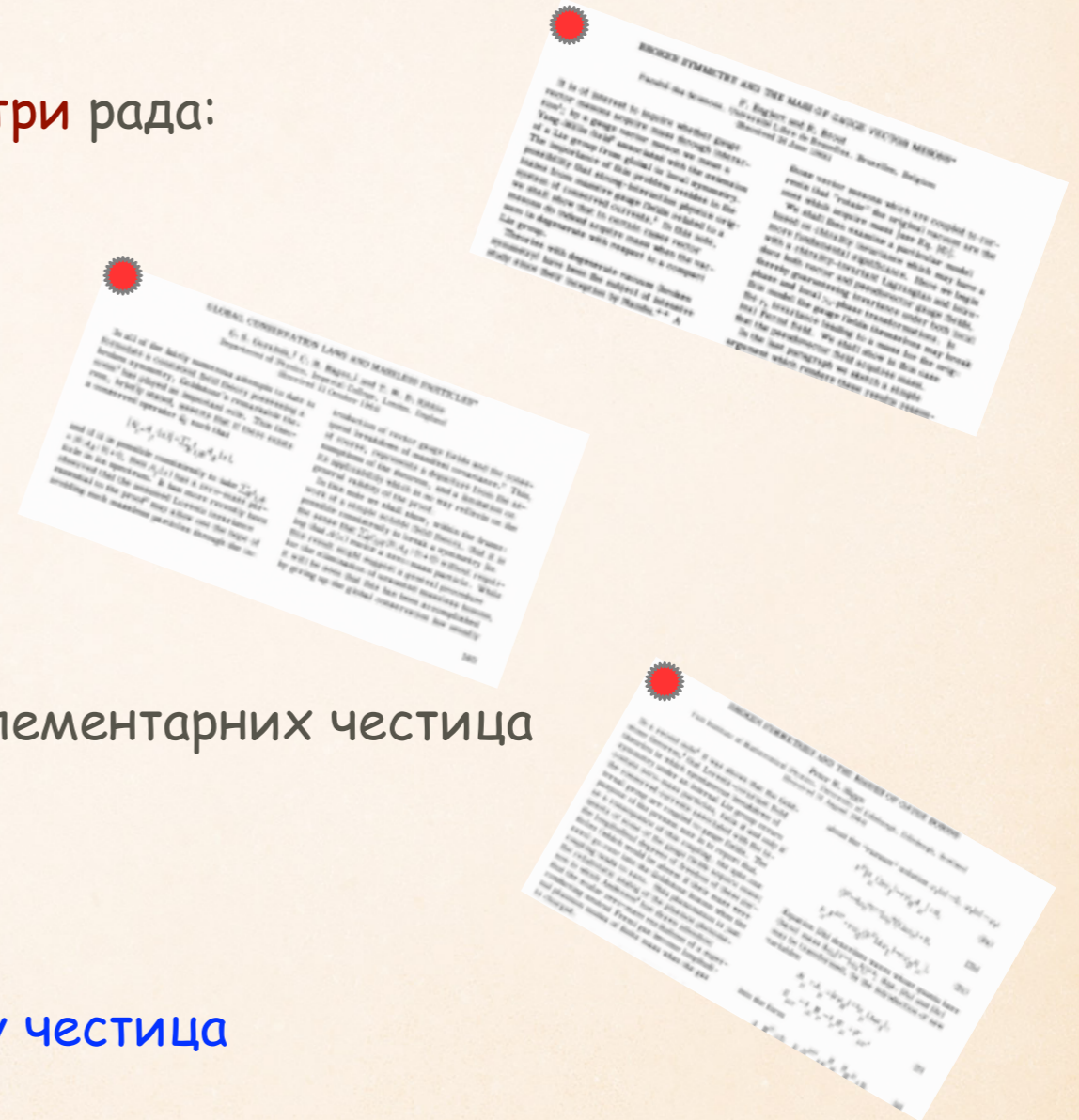
Франсоа Англер



Питер Хигс

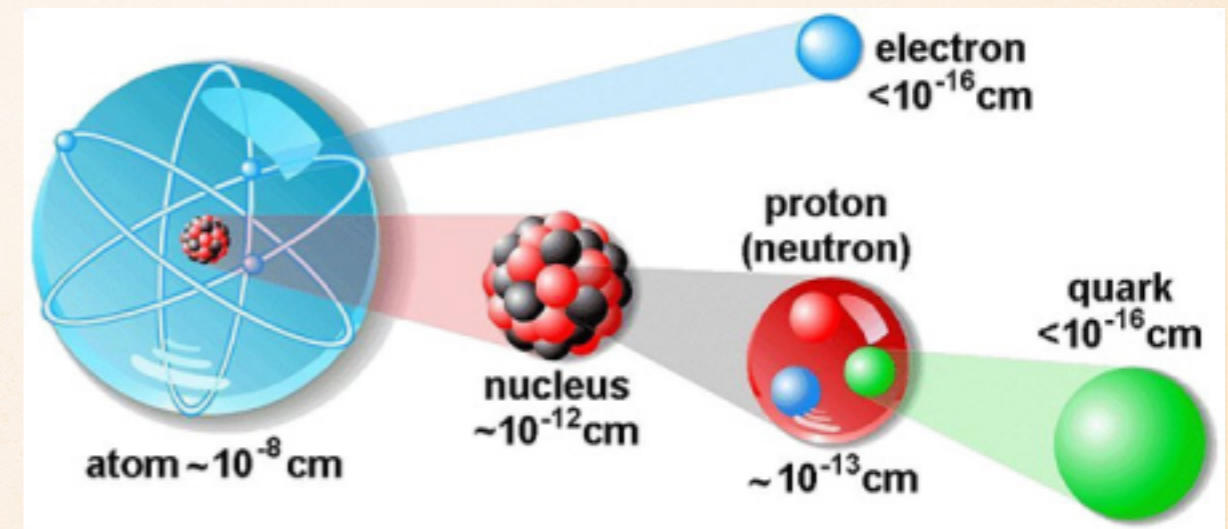
Све је почело шездесетих

- ❖ Отприлике у исто време, 1964, објављена су **три** рада:
- ❖ Роберт Броут и Франсоа Енглерт;
- ❖ Џералд Гуралник, Карл Хаген и Том Кибл
- ❖ Питер Хигс
- ❖ Радови представљају револуцију у физици елементарних честица
- ❖ Објашњавају порекло масе
- ❖ Уводе принцип нарушења симетрије у физику честица
- ❖ Предвиђају постојање још једне честице, назване по једном од аутора, Хигсов бозон (или БЕХ, или БЕГХКХ)



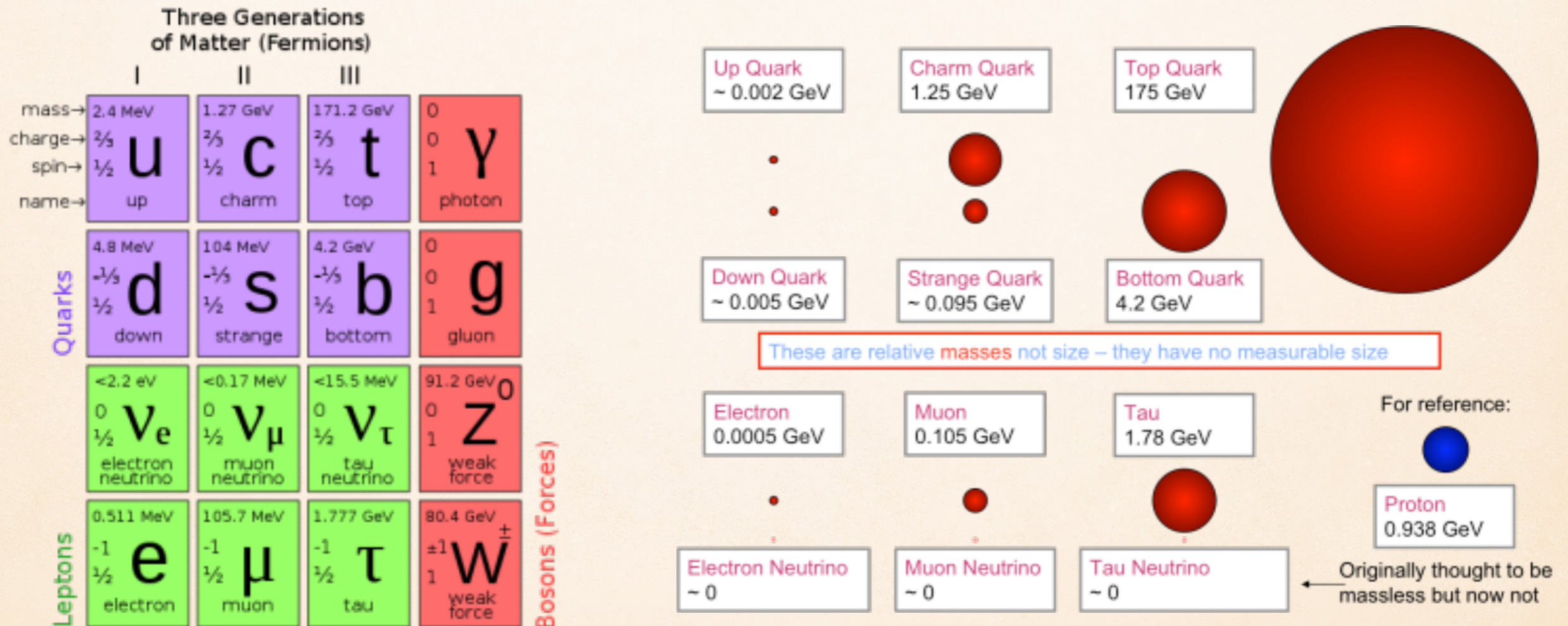
Шта су елементарне честице?

- ❖ Кроз векове, постављано је питање од чега је све направљено, шта су основни делићи - **једноставни и без унутрашње структуре**
- ❖ Демокритос је поставио теорију о недељивој честици → **áтоџон (атомон) - недељив**
- ❖ Почетком 20. века откривено је да атом има структуру
- ❖ Потом се показало да и позитивно језгро има структуру
- ❖ И да његови конституенти имају структуру



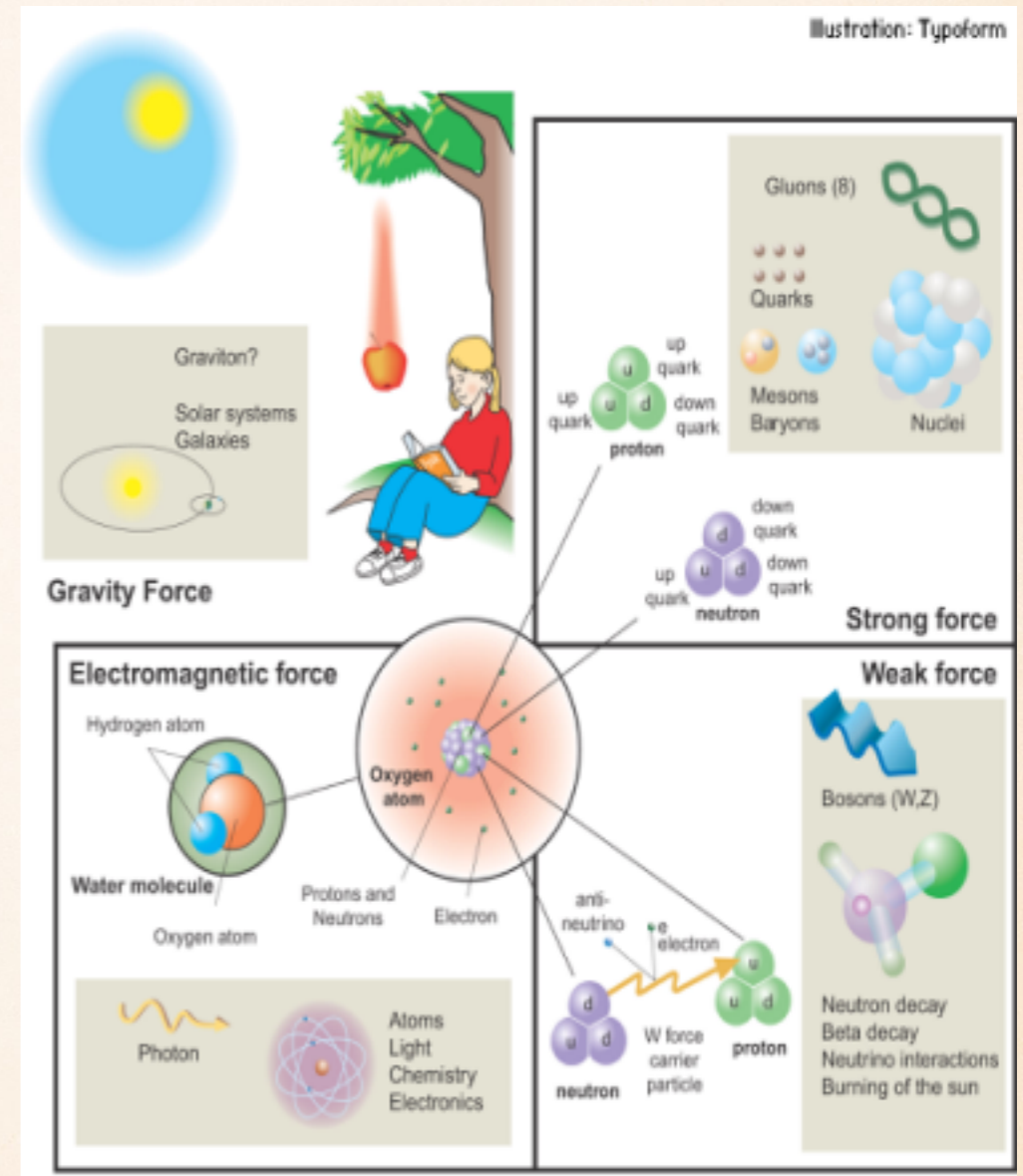
Шта су елементарне честице?

❖ Елементарне честице су основни делићи материје



Основне интеракције

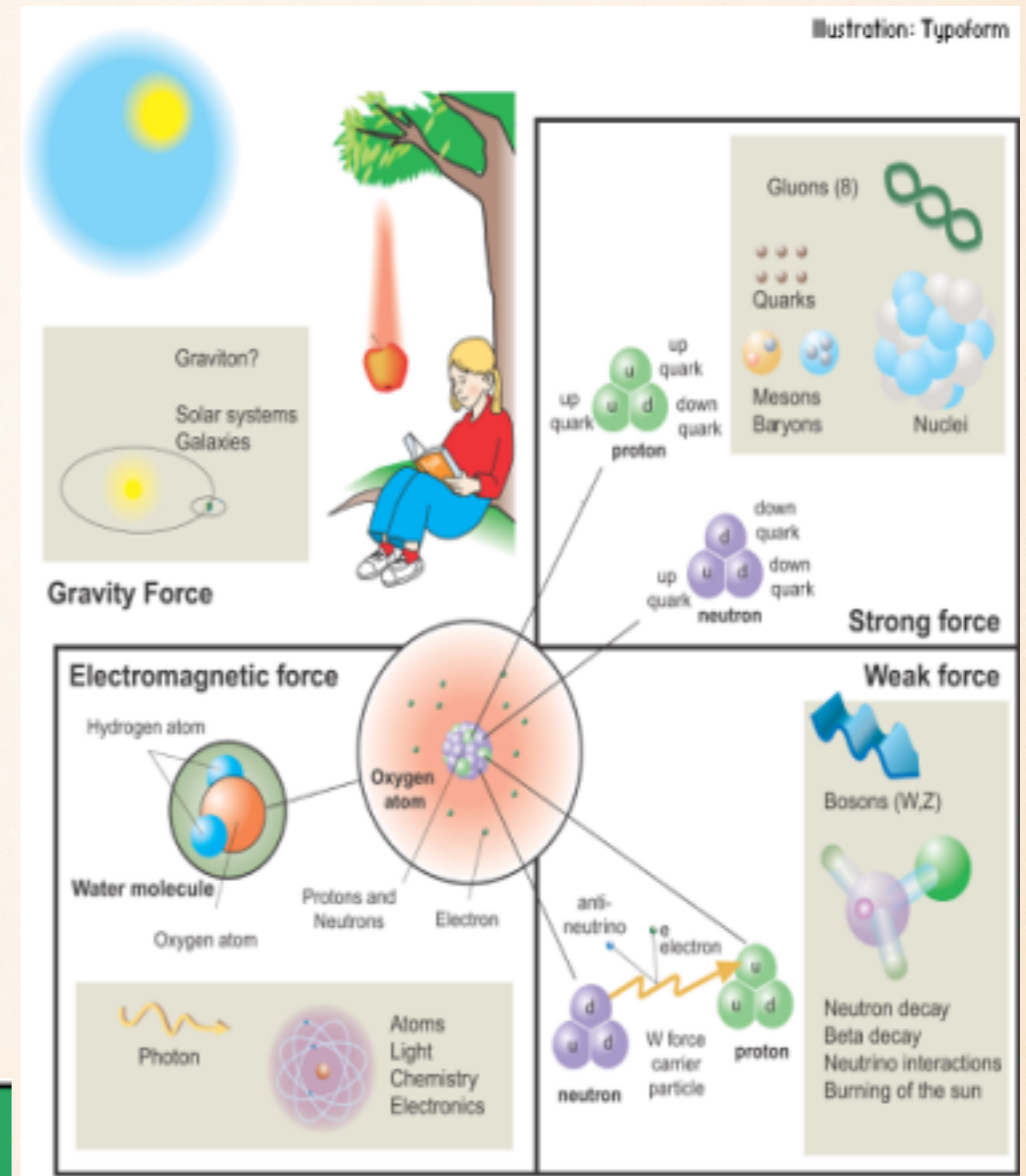
- ❖ Постоје **четири** основне интеракције у природи
- ❖ **Гравитациона**
- ❖ **Електромагнетна**
- ❖ **Слаба** – одговорна за радиоактивне распаде
- ❖ **Јака** – одговорна за нуклеарне силе
- ❖ Свака интаркција има свог **преносиоца** – када две честице интерагују, оне уствари размењују трећу, преносиоца интеракције



Основне интеракције

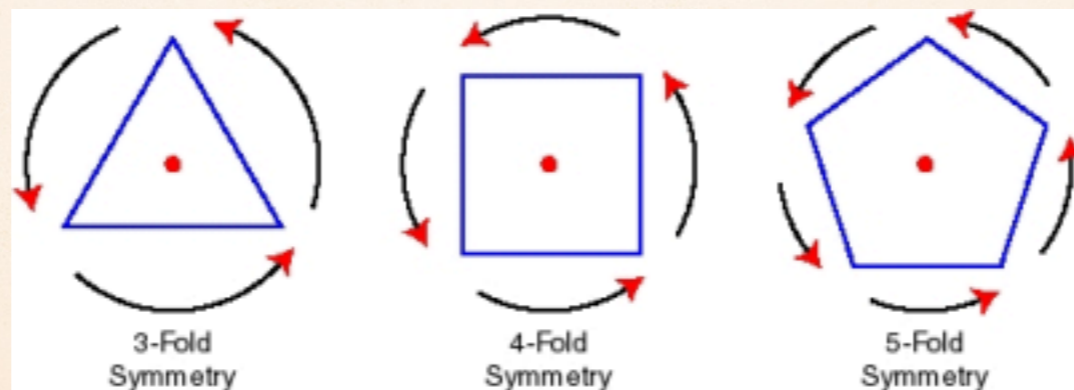
- ❖ Постоје **четири** основне интеракције у природи
- ❖ **Гравитациона**
- ❖ **Електромагнетна**
- ❖ **Слаба** – одговорна за радиоактивне распаде
- ❖ **Јака** – одговорна за нуклеарне силе
- ❖ Свака интаркција има свог **преносиоца** – када две честице интерагују, оне уствари размењују трећу, преносиоца интеракције

	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons



Основне интеракције и симетрије

- ❖ Постоје **четири** основне интеракције у природи
- ❖ **Гравитациона** - њу ћемо оставити по страни
- ❖ **Електромагнетна** → **фотон**, $U(1)$
- ❖ **Слаба** - одговорна за радиоактивне распаде → **W, Z бозон**, $SU(2)$
- ❖ **Јака** - одговорна за нуклеарне силе → **глуон**, $SU(3)$
- ❖ Свака интаркција има своју **симетрију**



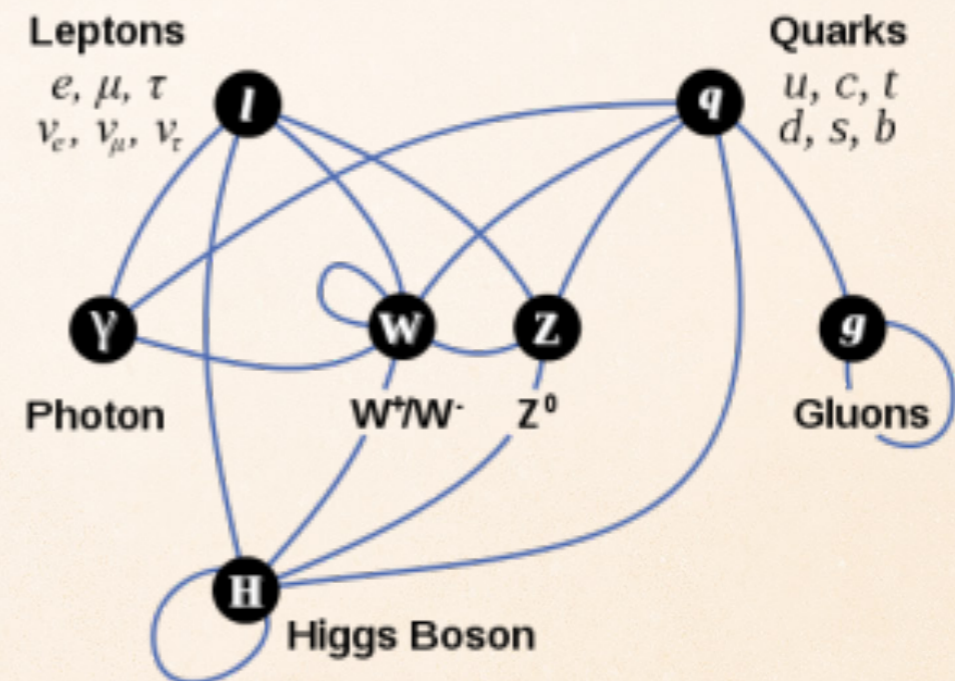
Шта су елементарне честице

- ❖ Елементарне честице су основни делићи материје
- ❖ И преносиоци интеракција
- ❖ И Хигсов бозон

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 weak force
Leptons	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W$^\pm$ weak force

Bosons (Forces)

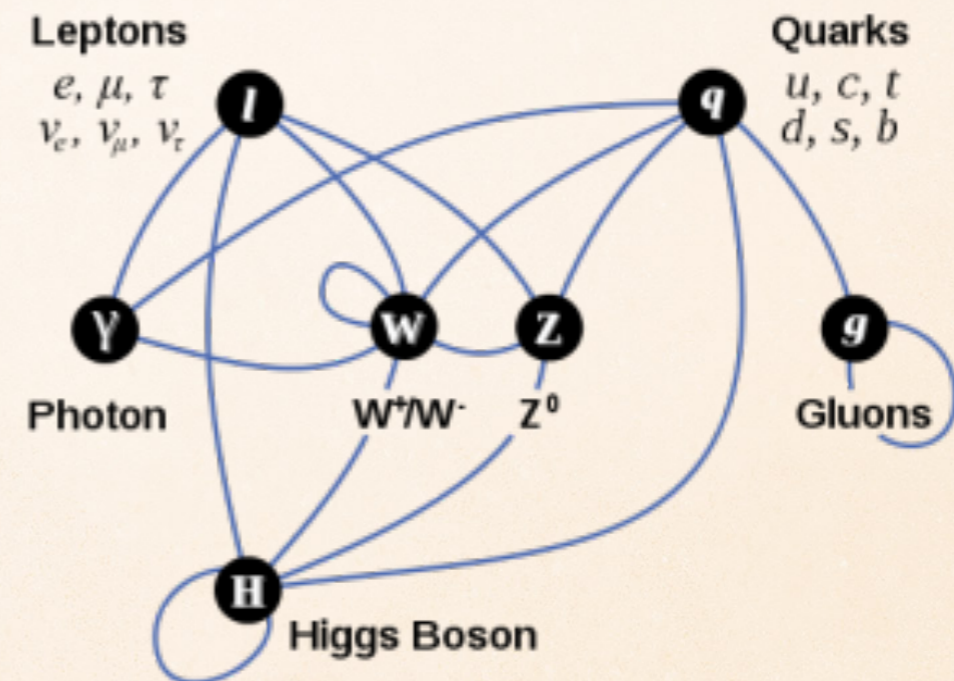


Стандардни модел

- ❖ Састоји се од **честица материје**, **интеракција** и **Хигсовог механизма**
- ❖ Симетрија стандардног модела је $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

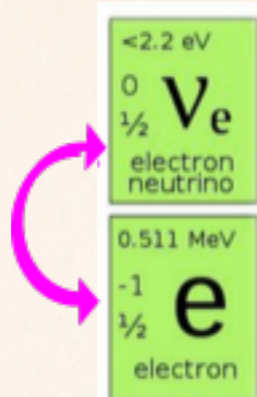
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force



Спонтано нарушење симетрије

$SU(2)_L$

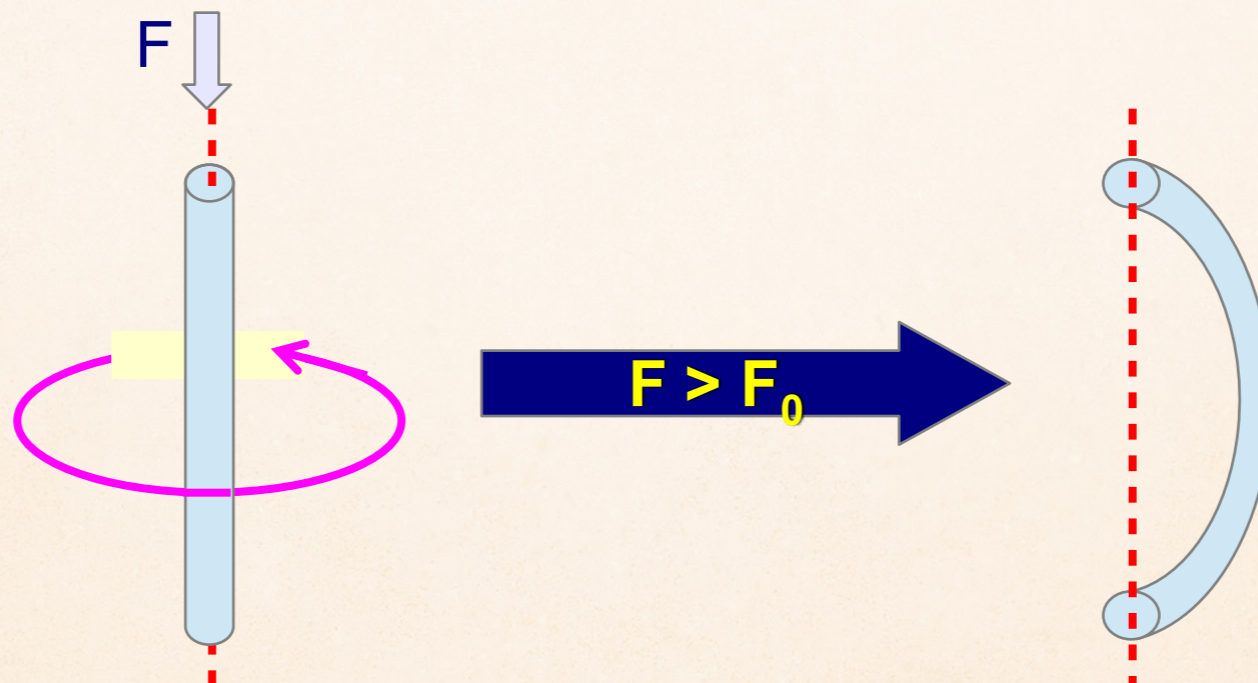


❖ Уколико важи симетрија, ни фермиони, који су честице материје, ни бозони, преносиоци интеракција, не би имали масу

=> симетрија је нарушена

$$G_{SM} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$\rightarrow SU(3)_C \times U(1)_{EM}$$



Хигсов механизам

- ❖ У стандардни модел уведено је комплексно скаларно поље
- ❖ **нарушило је почетну симетрију**
- ❖ **генерисало масе честица**
- ❖ **појавила се нова честица - Хигсов бозон**



Ненарушена симетрија

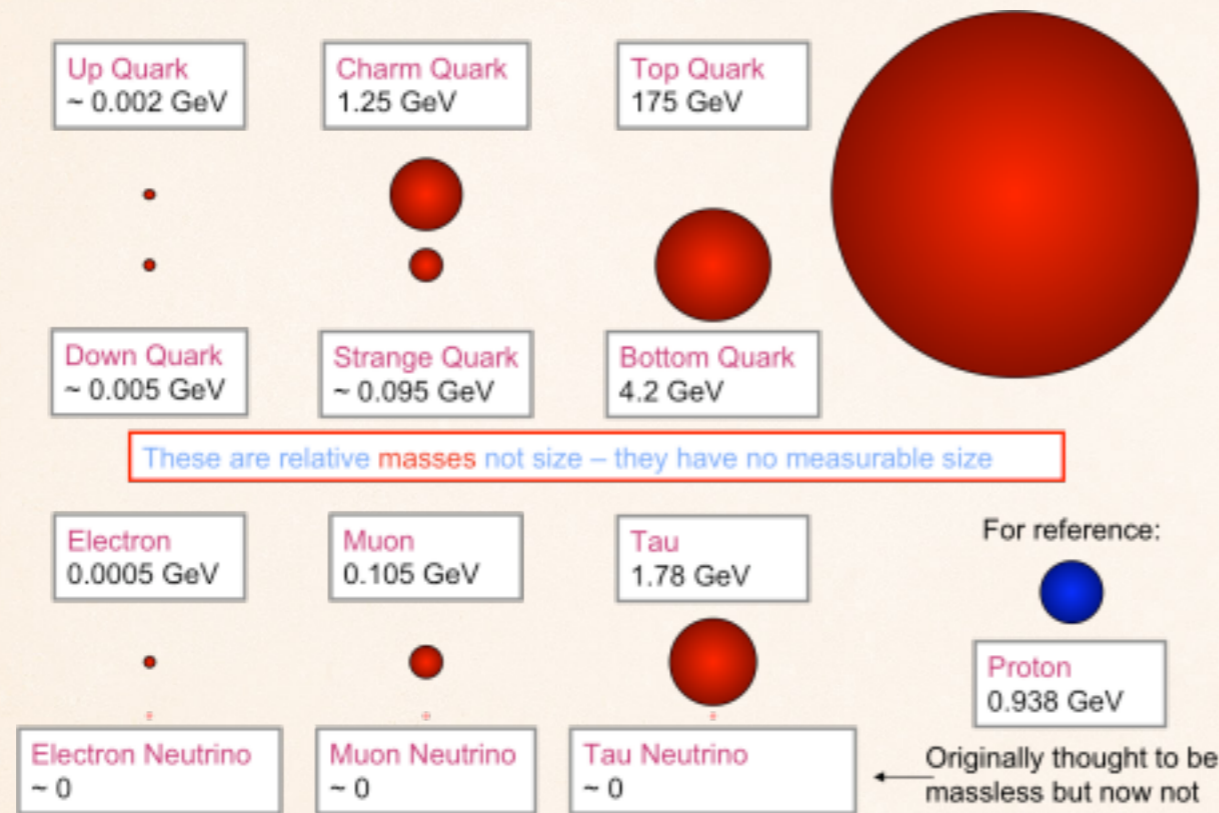


Улази Ноле, народ се окупља, Ноле добија "масу"
⇒ маса честица



Гласине о Нолету се шире
⇒ маса Хигса

Хигсов механизам



Која честича је Хигс?
Шта је Хигсов бозон?



Стандардни модел

❖ Стандардни модел дефинишу симетрије Лагранжијана

$$G_{SM} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

❖ Интеракције: јака, слаба и електромагнетна

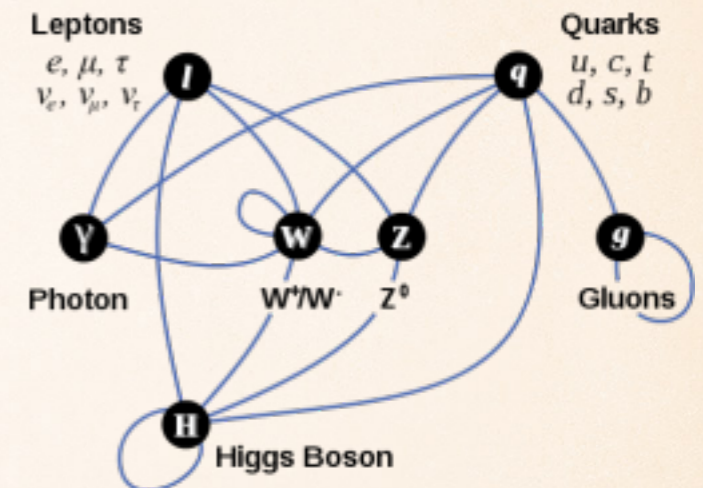
❖ Преносиоци: глуони - g , слаби бозони W^\pm, Z , и фотон

❖ Честице материје: Лептони и кваркови

❖ И спонтано нарушење симетрије: Комплексно скаларно поље

❖ Које нарушава:

$$G_{SM} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow SU(3)_C \times U(1)_{EM}$$



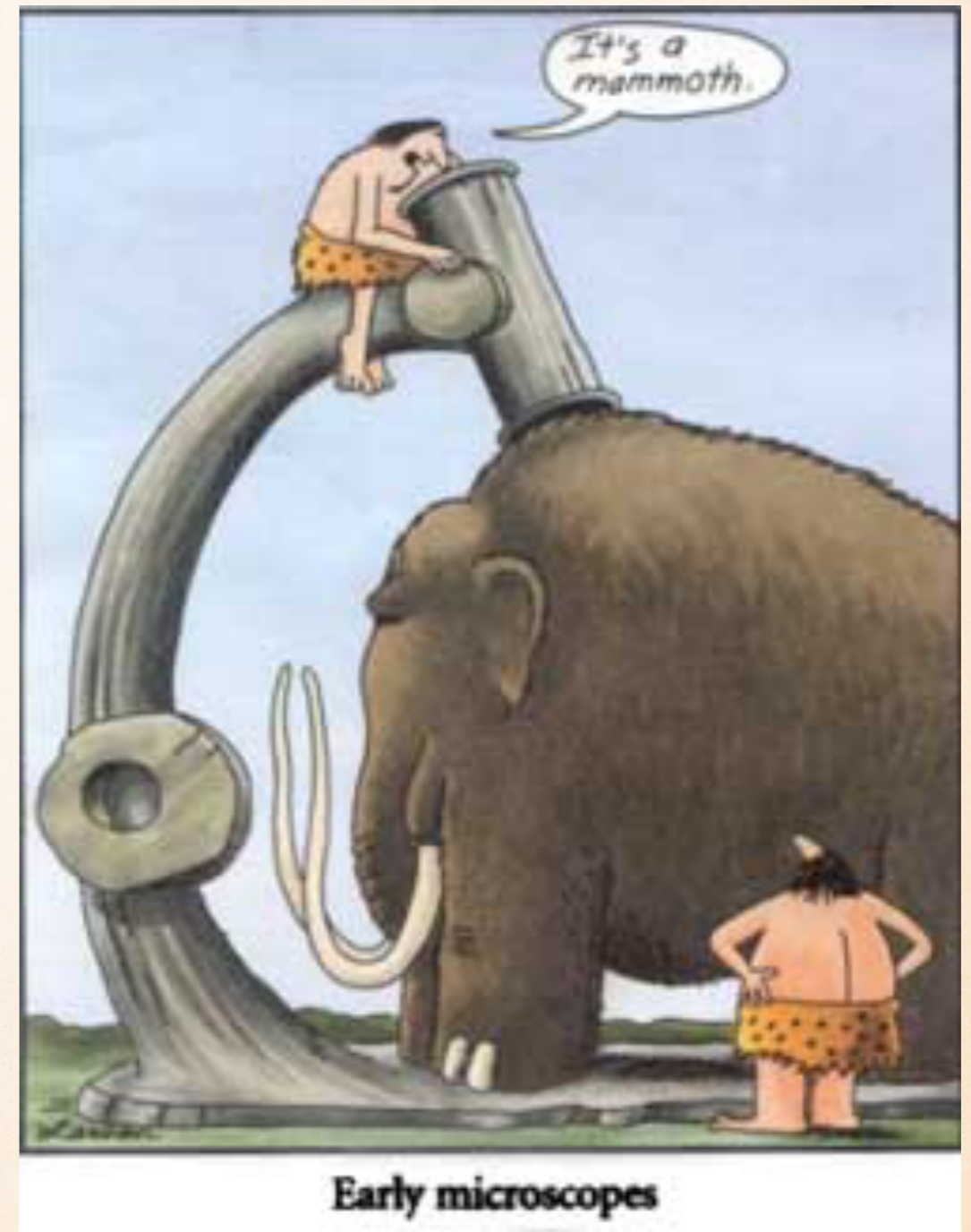
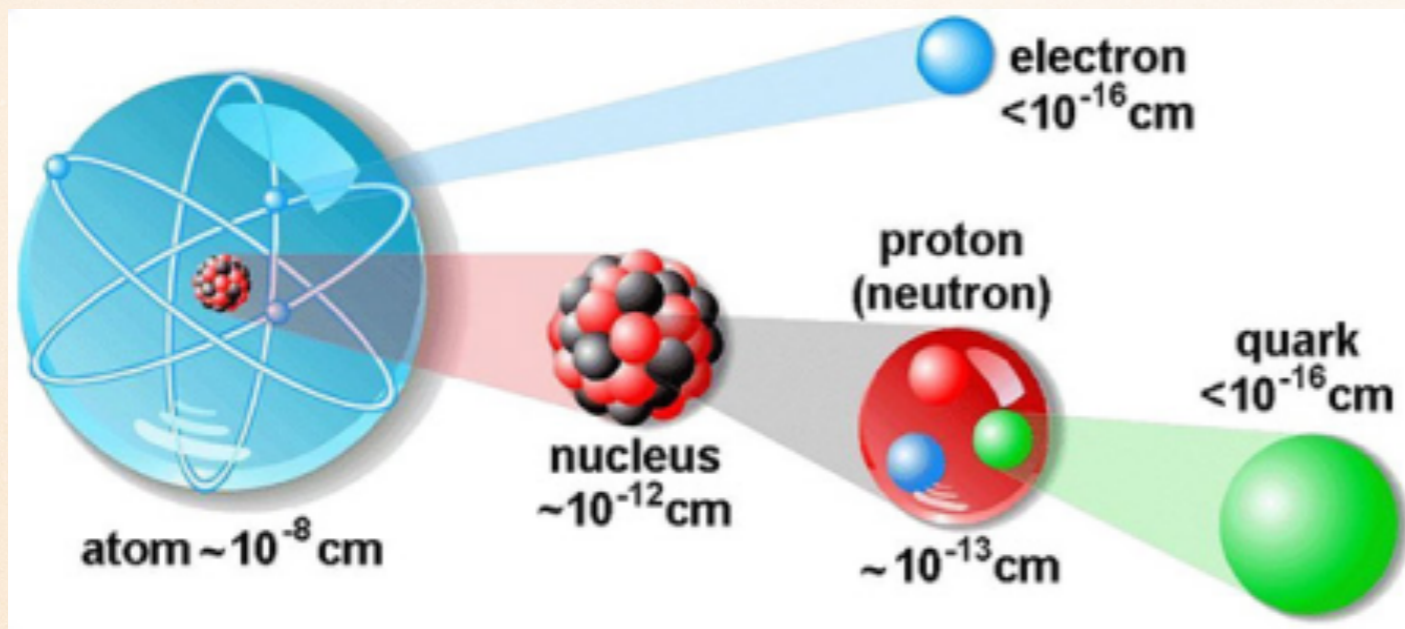
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W [±] weak force

Bosons (Forces)

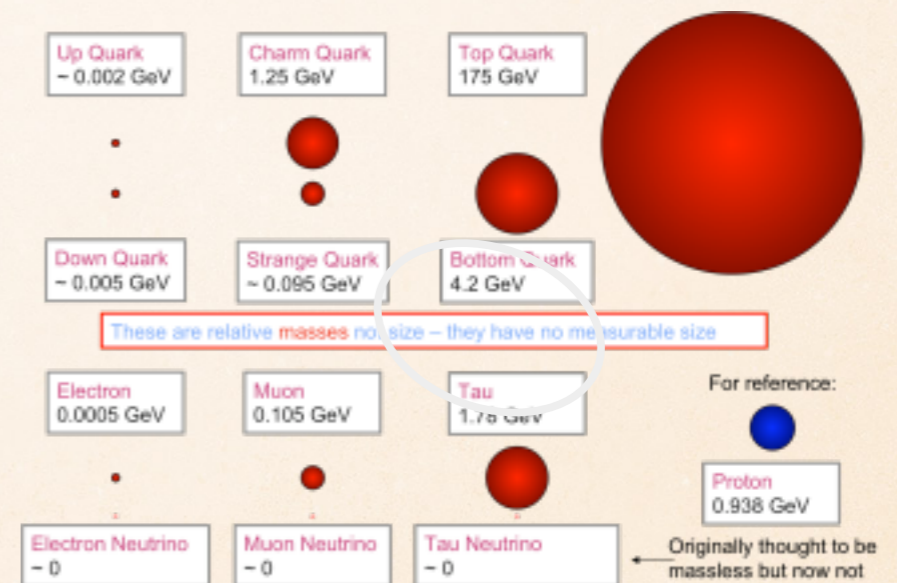
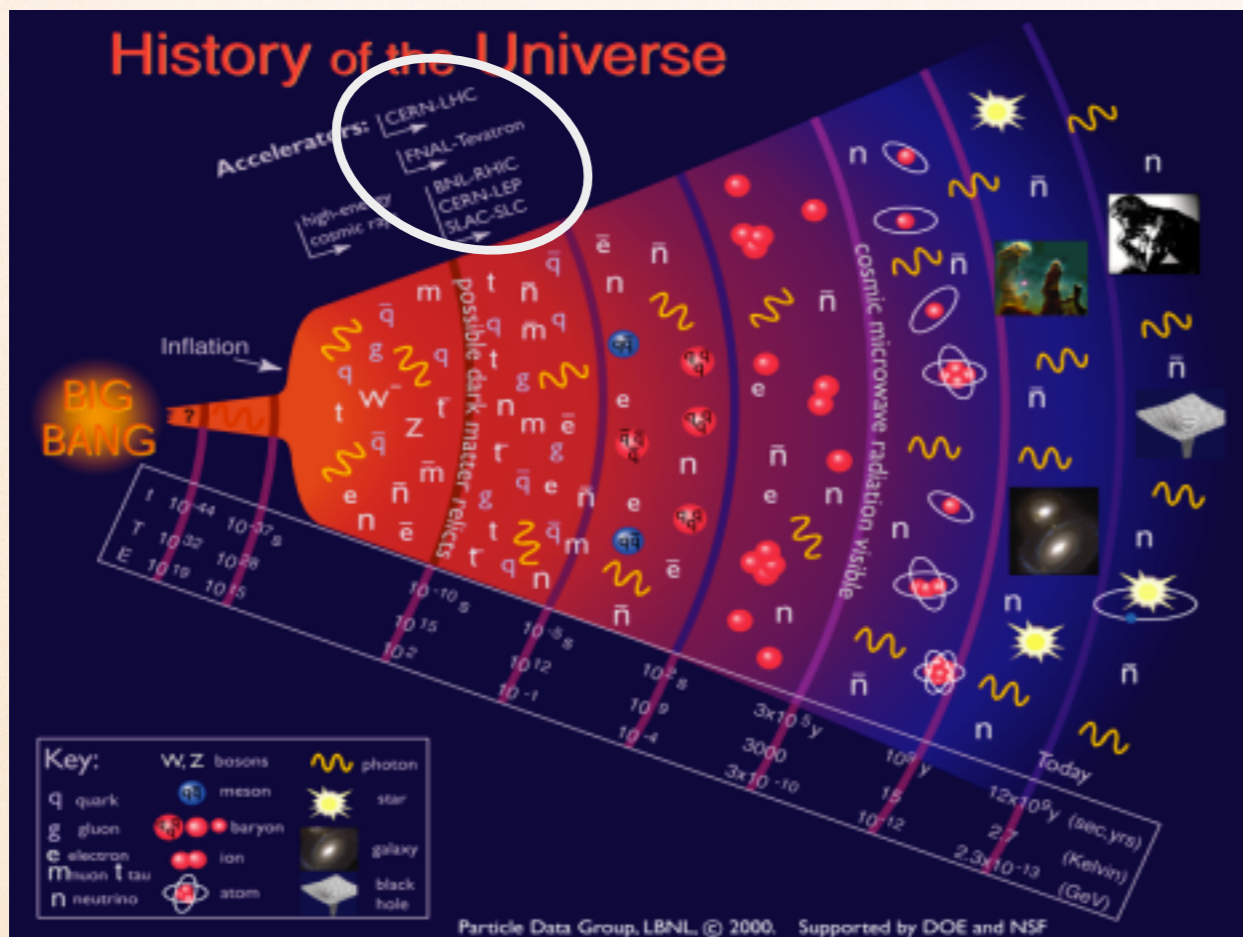
Како се детектују честице

❖ Димензије честица су мале



Како се детектују честице

- ❖ Масе честица могу бити велике у поређењу са масом протона или електрона
 $m_W \sim 80 \text{ GeV}$, $m_Z \sim 91 \text{ GeV}$, $m_t \sim 175 \text{ GeV}$, $m_{\text{Higgs}} \sim 125 \text{ GeV}$
- ❖ Потребна је велика енергија $E = mc^2$



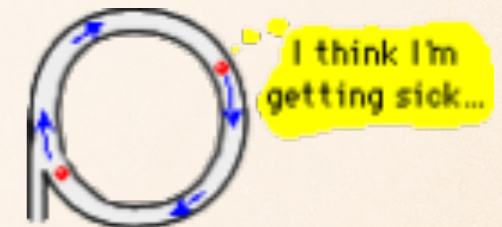
Акцелератори

❖ Акцелератори су машине за убрзавање честица

❖ **Линеарни** - користе електрично поље за убрзавање наелектрисаних честица

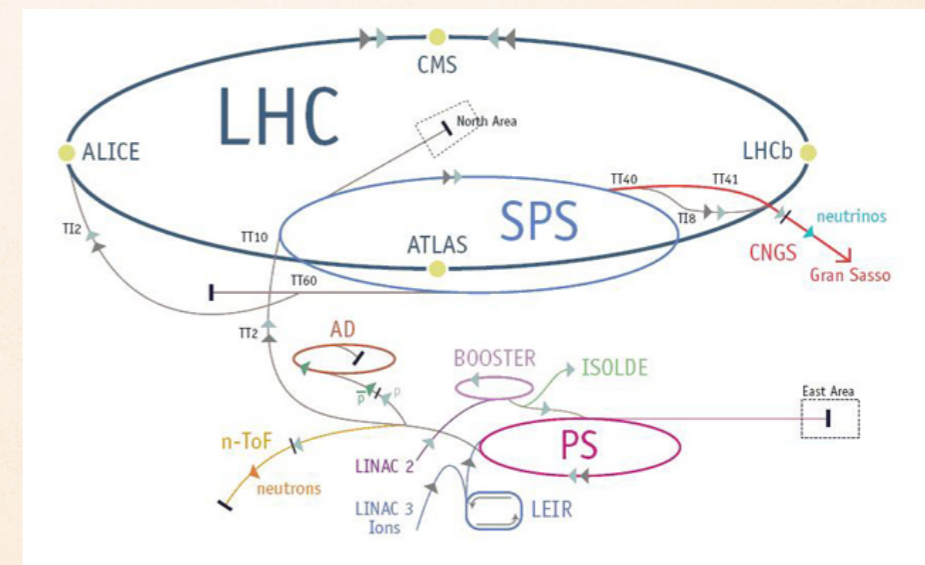


❖ **Кружни** - користе електрично поље за убрзавање наелектрисаних честица и магнетно поље за њихово скретање

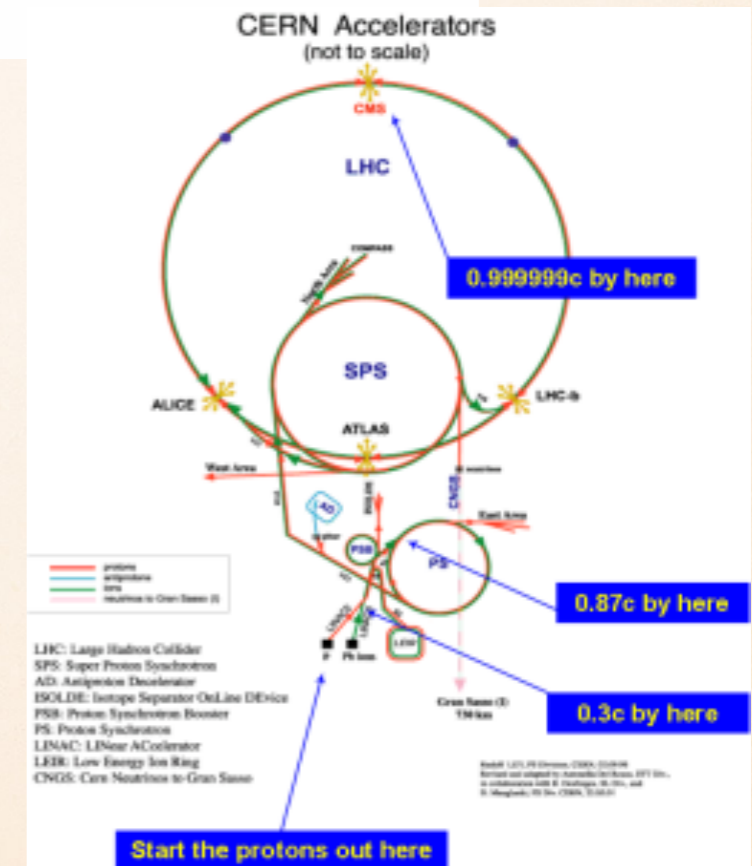
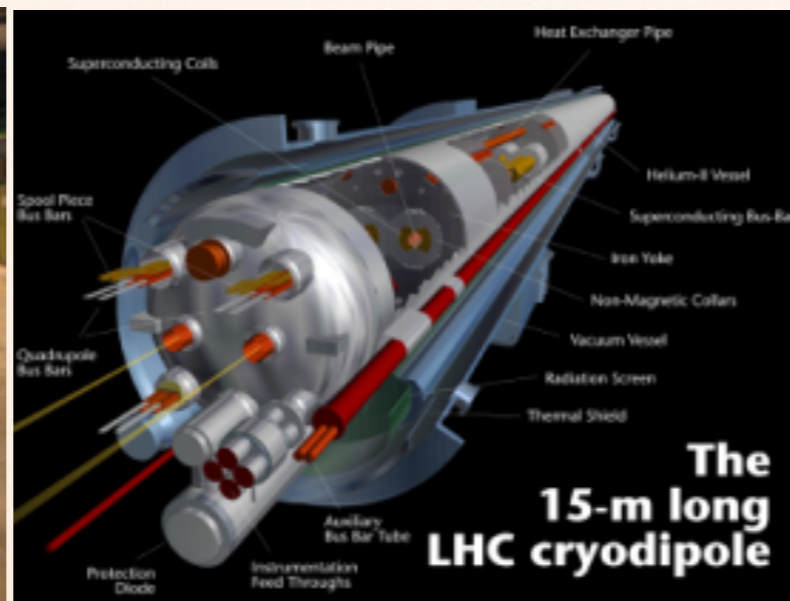
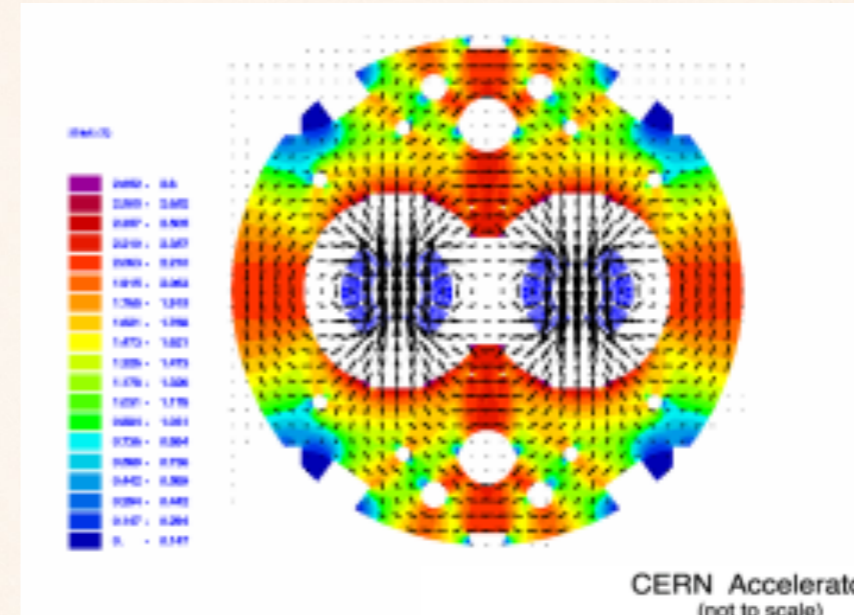
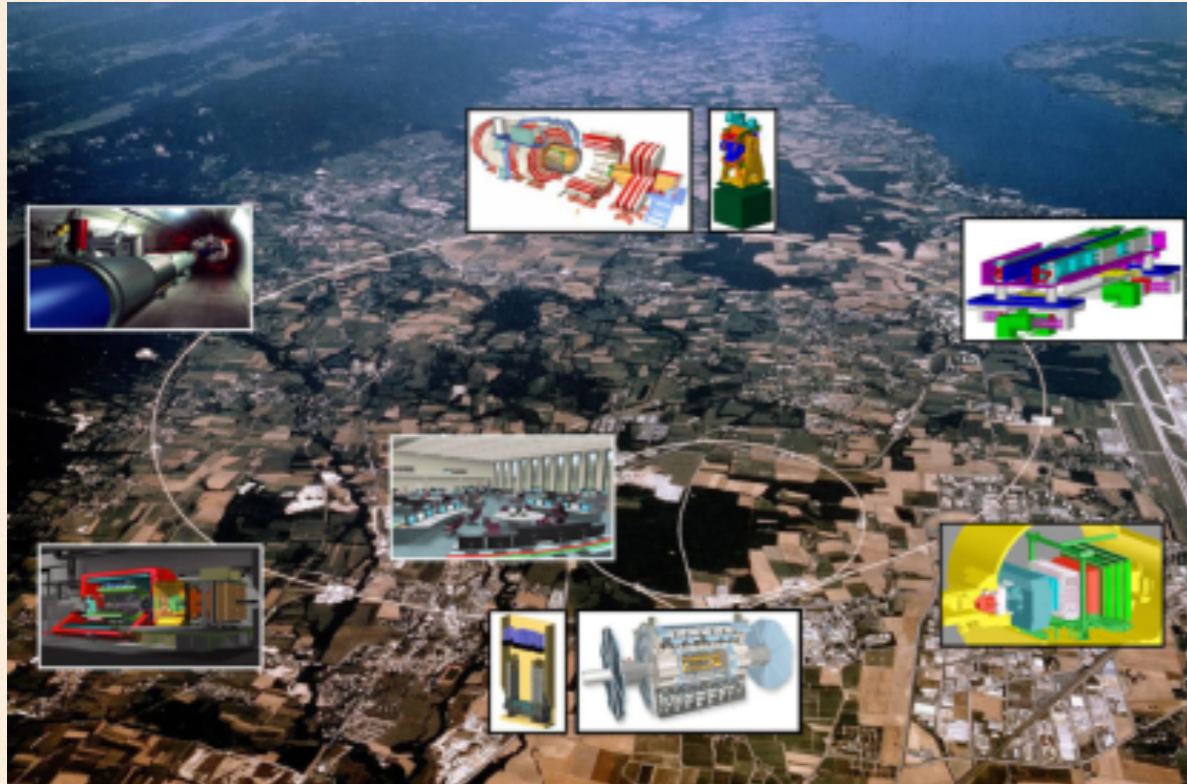


❖ Модерне машине су **комбинација** више технологија

❖ Више детаља - Јелена Мијушковић



Велики хадронски сударач (Large Hadron Collider - LHC)

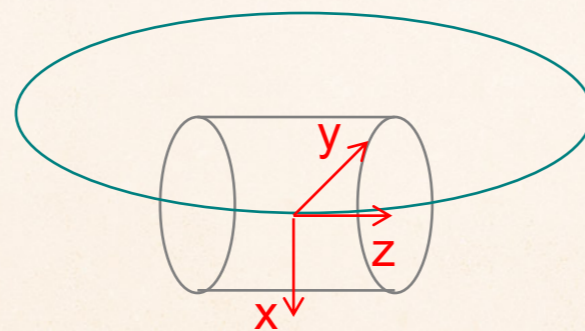
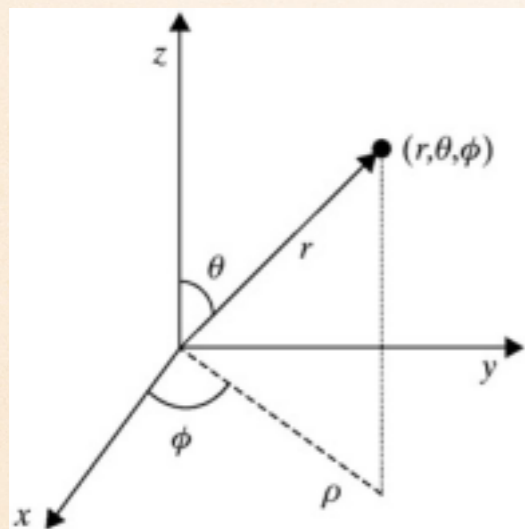
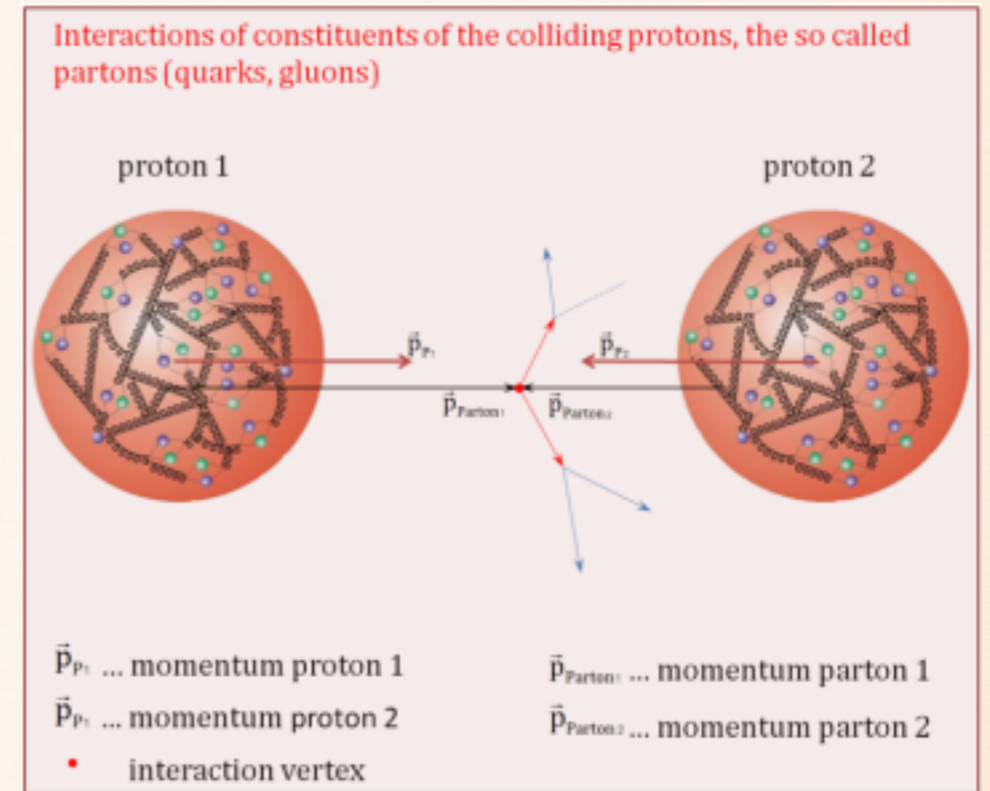


Велики хадронски сударач (Large Hadron Collider - LHC)



Хадронски колајдери и детекција честица

- ❖ У судару учествују сложене честице
- ❖ Само један део, тзв. **партон**, учествује у примарној интеракцији
- ❖ Не знамо тачно који део енергије носи **партон**
=> Закон одржања енергије/импулса (E, \vec{p})
можемо да применимо само у **трансверзалној** равни



$$(p_T, \theta, \phi) \rightarrow (p_T, \eta, \phi)$$

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

Поједностављене јединице

$c=1$

Енергија, маса, импулс у GeV

пресек у pb

(1 barn = 10^{-24}cm^2)

Луминозност 1/fb

Укупни број честица
= Луминозност * Пресек

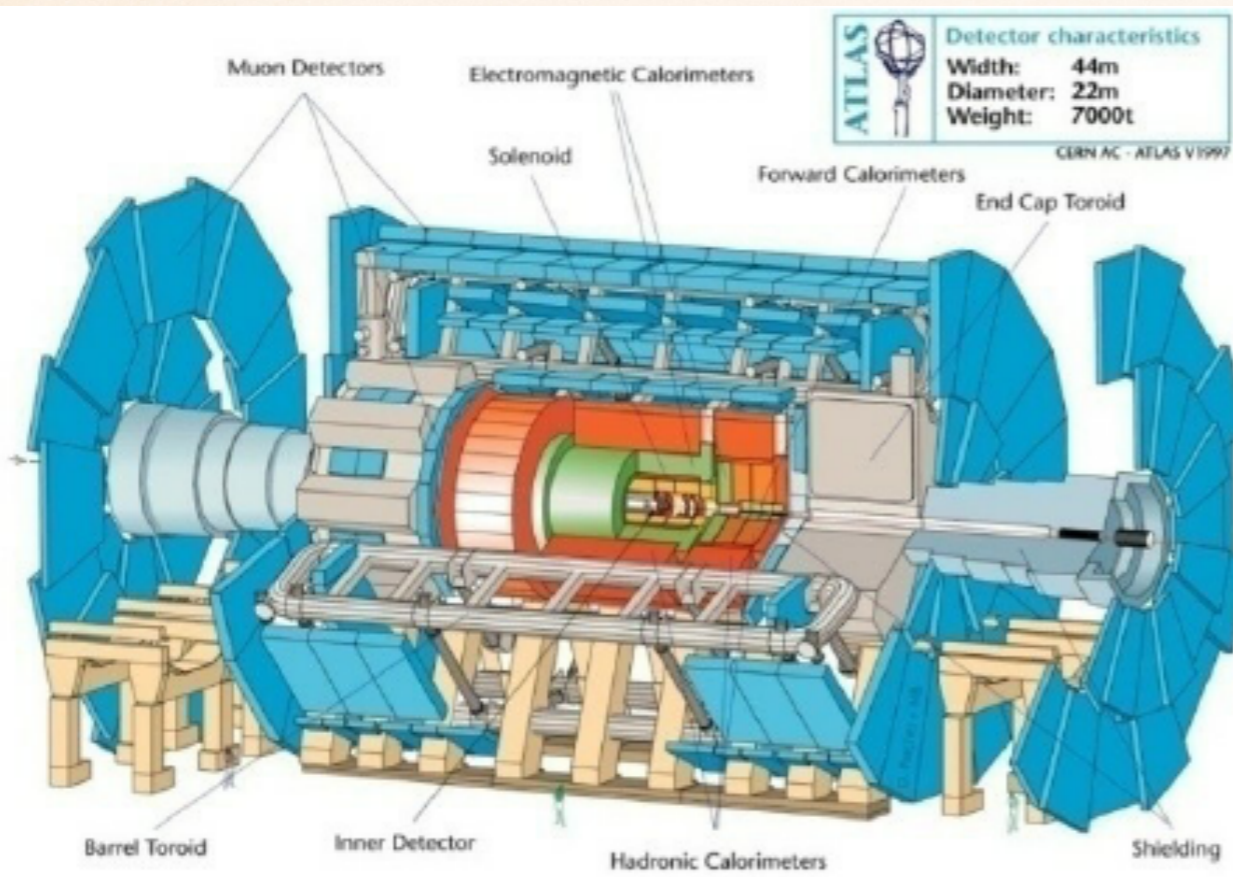
Хадронски колајдери и детекција честица

- ❖ Укупан број честица (N) = пресек (σ) * луминозност (L)
- ❖ Пресек - извесност за интеракцију две честице
 - Има димензије површине, користи се јединица барн ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)
- ❖ Луминозност је мера броја судара у јединици времена по јединици површине
 - Дизајнирана луминозност Великог Хадронског Сударача је $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - Може се десити 10^{34} судара у секунди на површини од једног квадратног центиметра
- ❖ Користе се природне јединице ($c=1$), тако да се енергија, маса и импулс изражавају у гига-електрон-волтима (GeV)

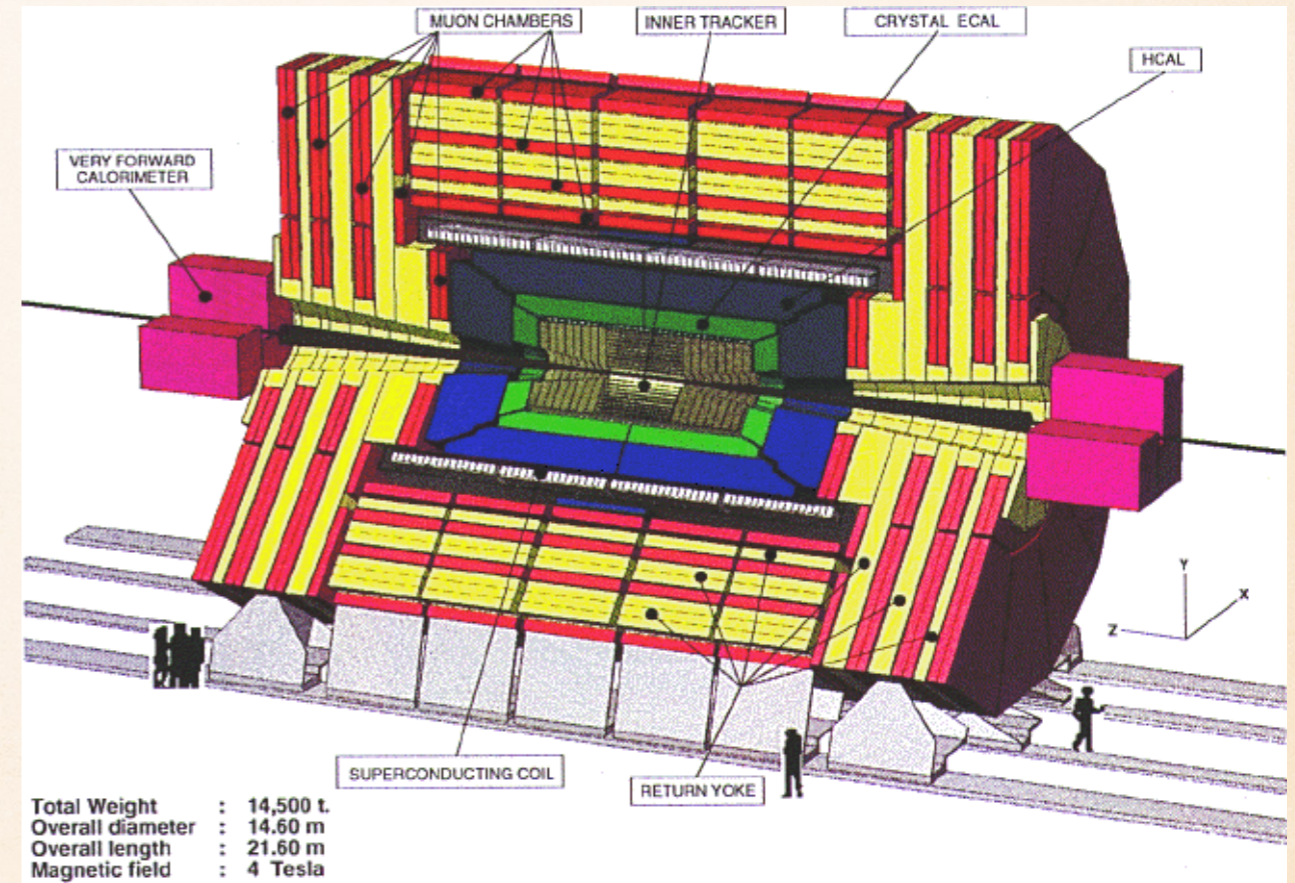
Детектори

- ❖ Модерни детектори су комплексне машине
- ❖ Више детаља - Итана Бубања

ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus

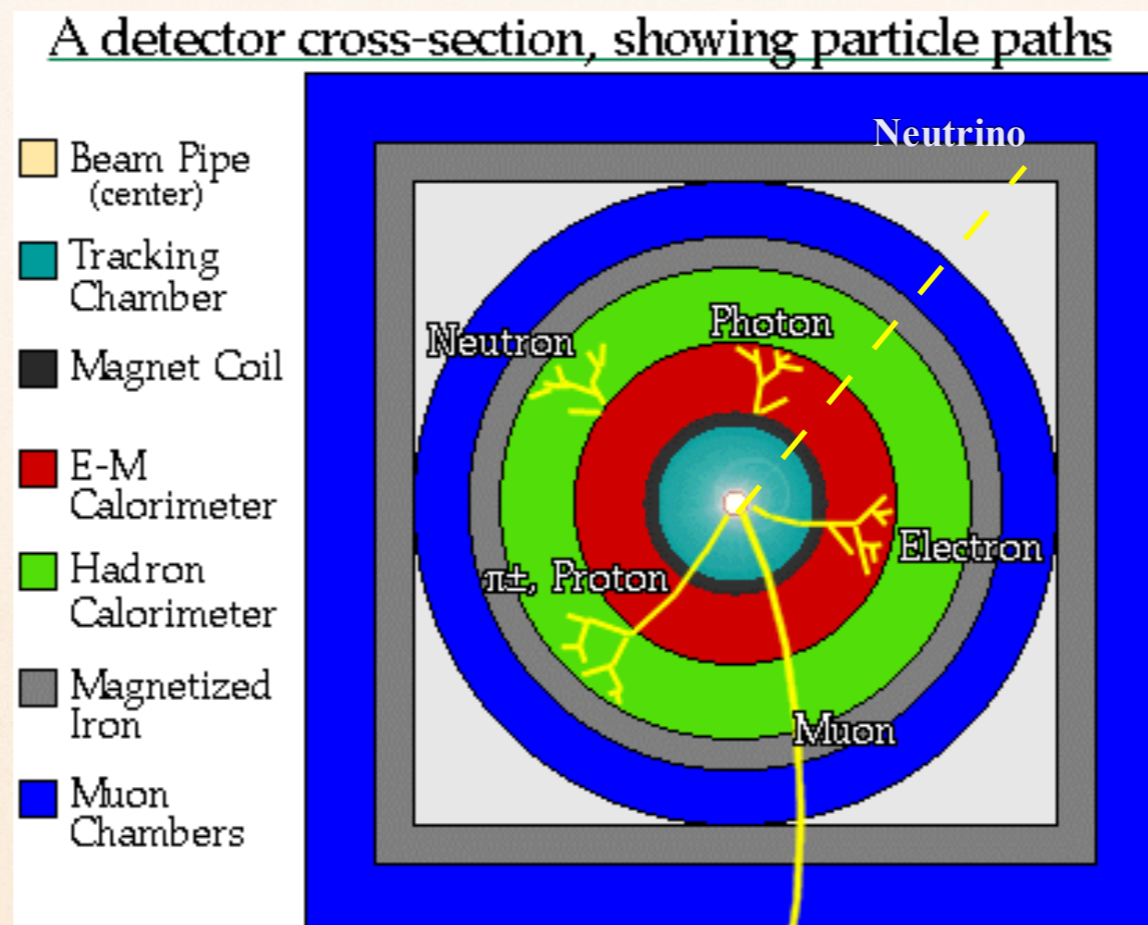


CMS: Compact Muon Solenoid

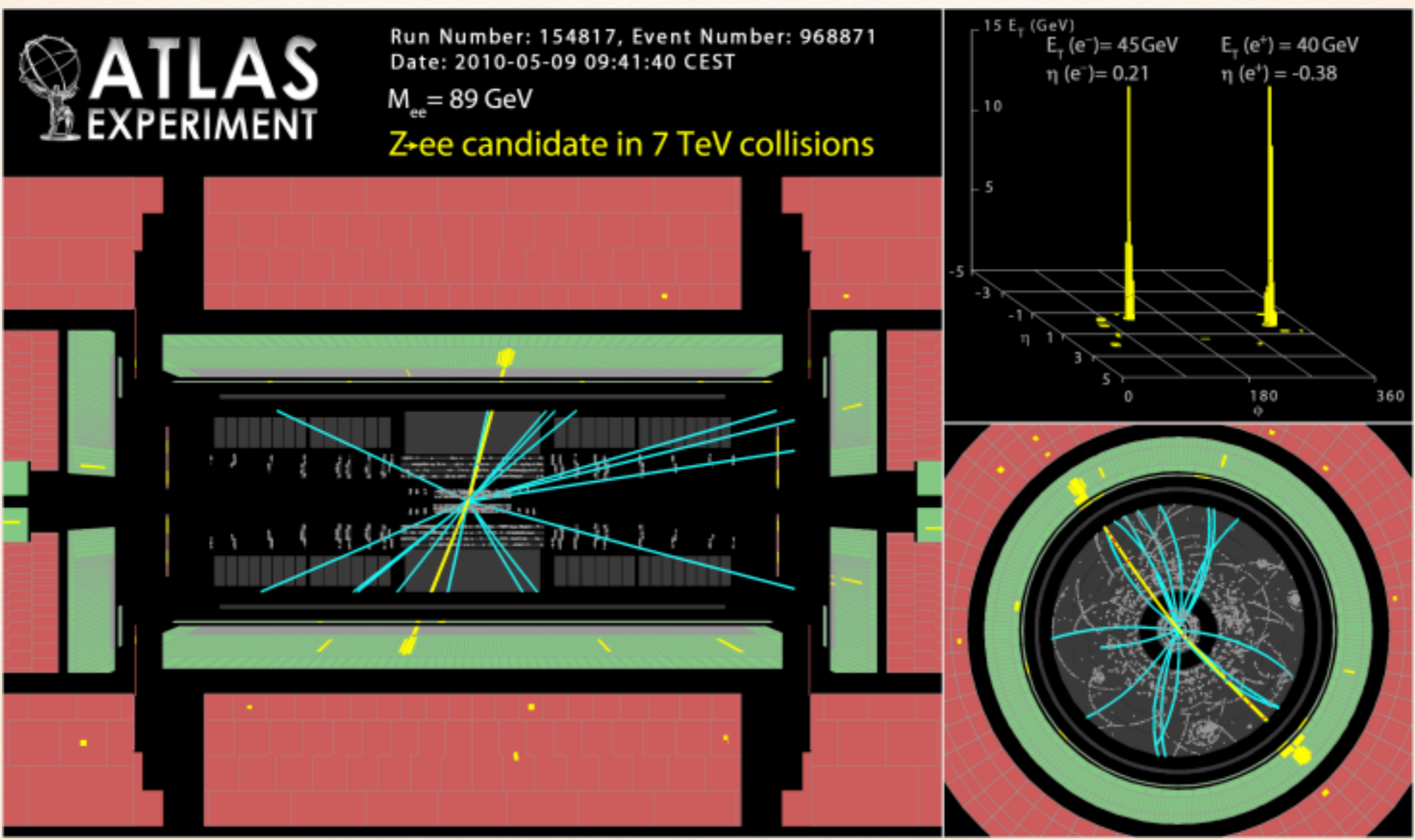


Детектори

- ❖ Модерни детектори су комплексне машине
- ❖ Више детаља - Итана Бубања
- ❖ На основу изгледа сигнала у детектору, идентификујемо честице и догађаје



Реконструкција догађаја - више о томе после ручка

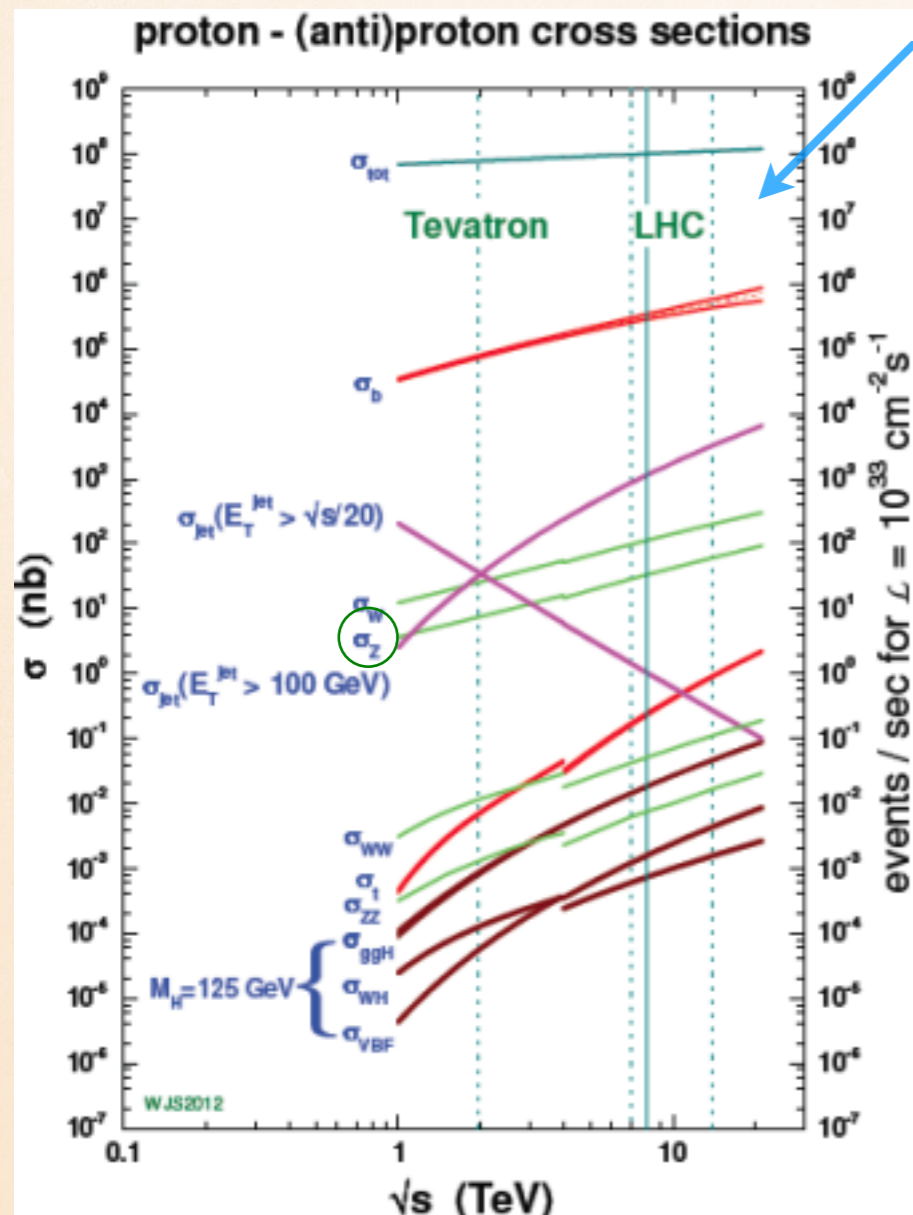


Укупан број догађаја

❖ Укупан број честица (N) = пресек (σ) * луминозност (L)

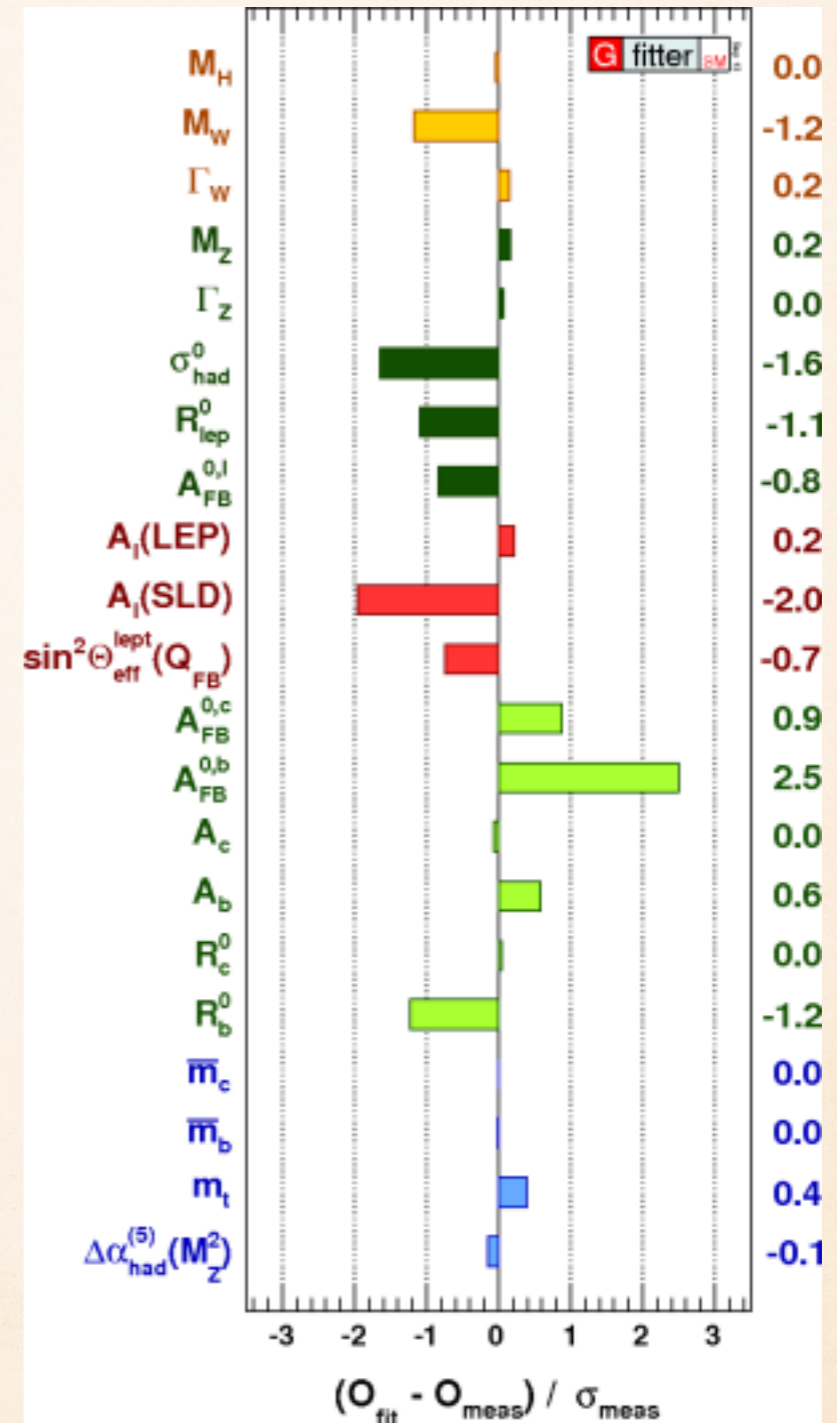
❖ Пресек зависи од енергије снопа

❖ Око 50 милиона Z бозона који се распадају на електроне или мионе регистровано је на АТЛАСу и на ЦМСу у 2012

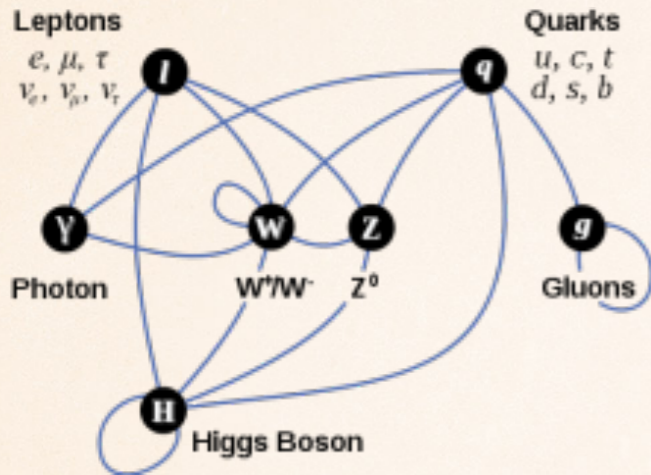


Стандардни модел

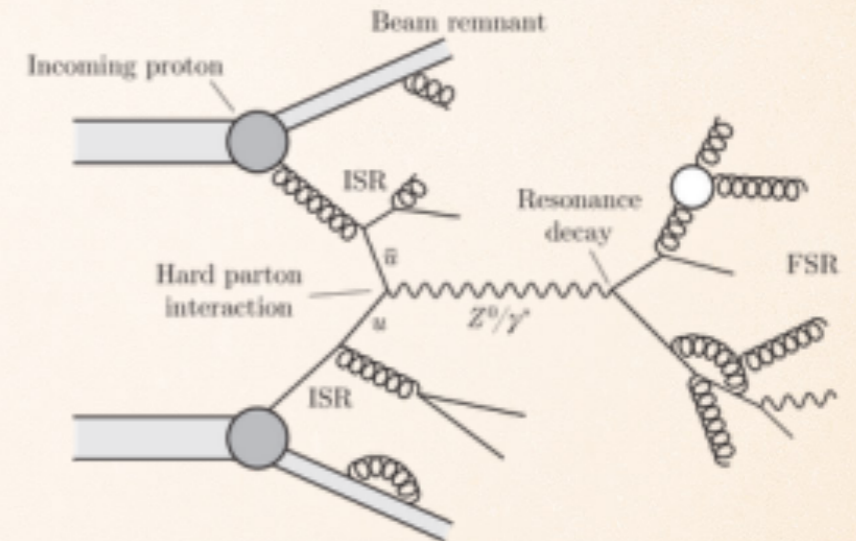
- ❖ Стандардни модел описује материју и интеракције
- ❖ Описан је теоријом са 18 параметара:
 - ❖ све је измерено са великом прецизношћу
- ❖ Откриће Хигсовог бозона је кулминација стандардног модела



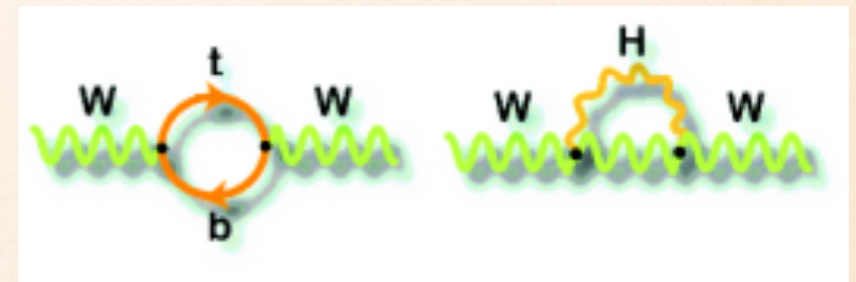
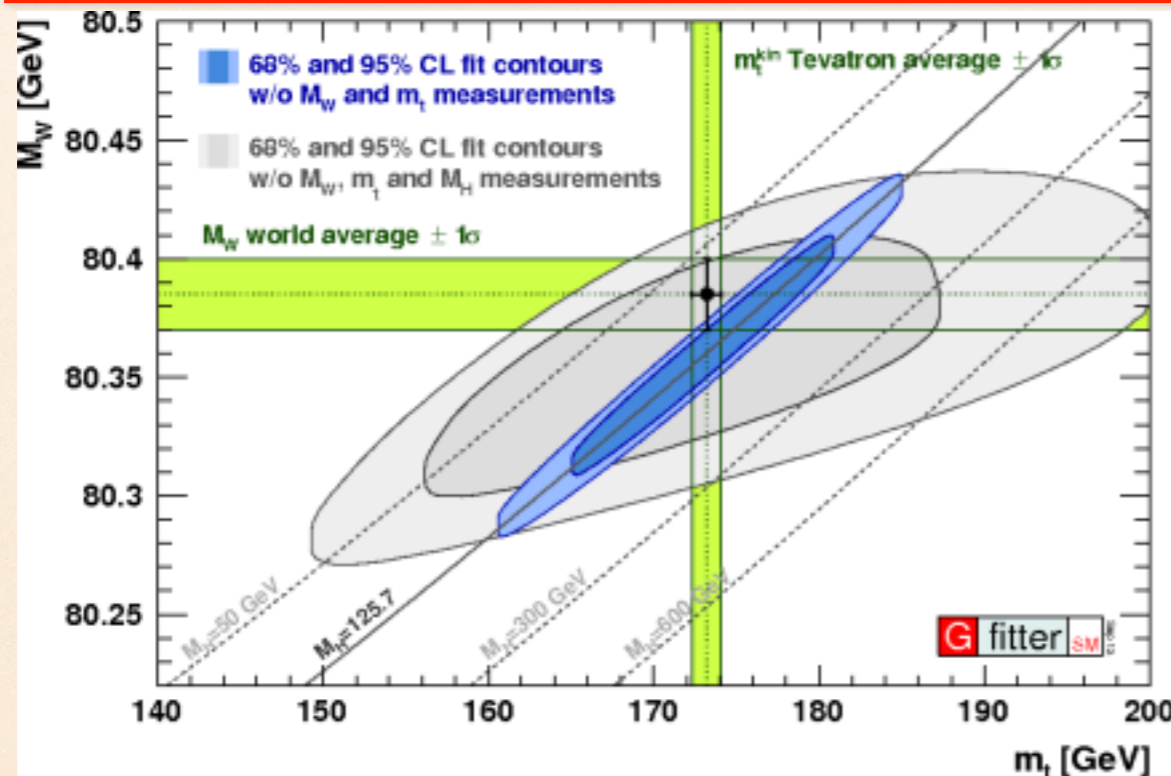
Стандардни модел



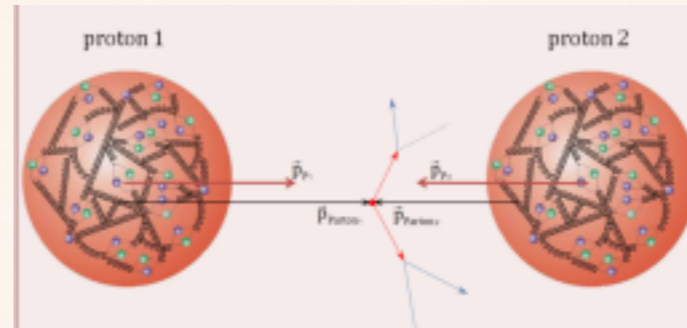
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



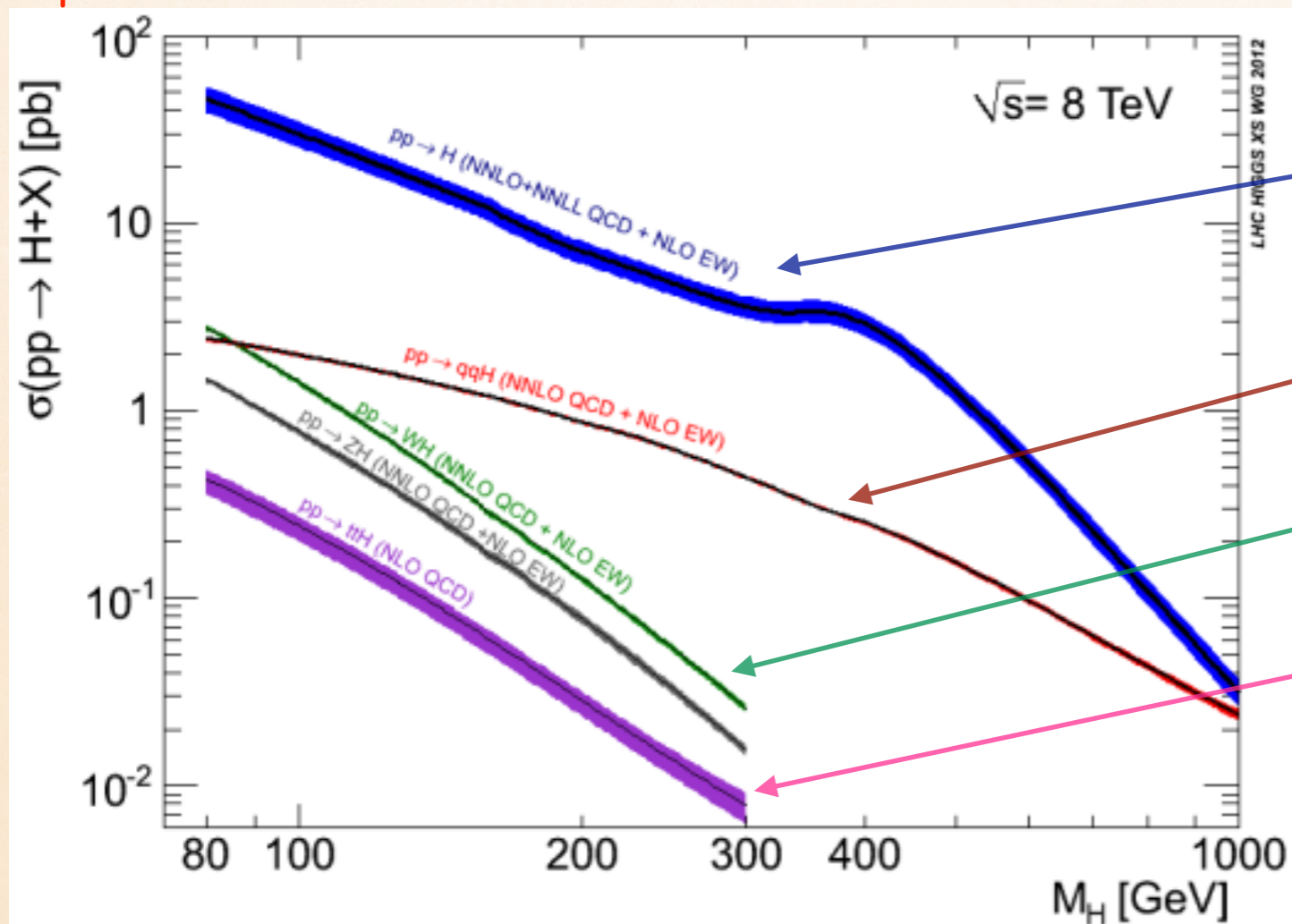
❖ **Описан је теоријом са 18 параметара**



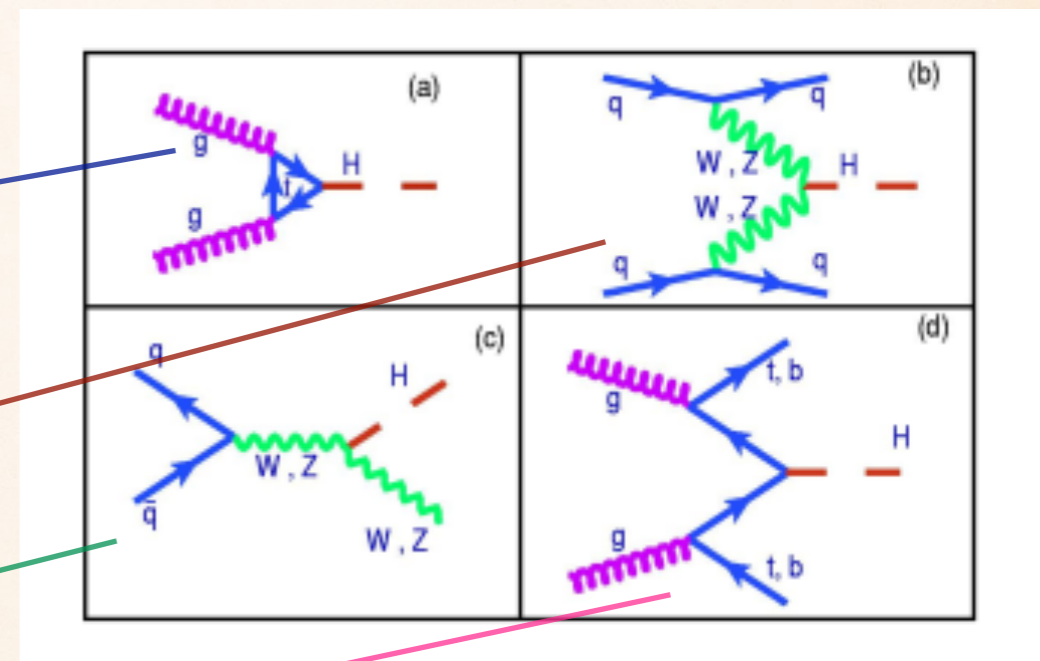
Продукција...



Пресек

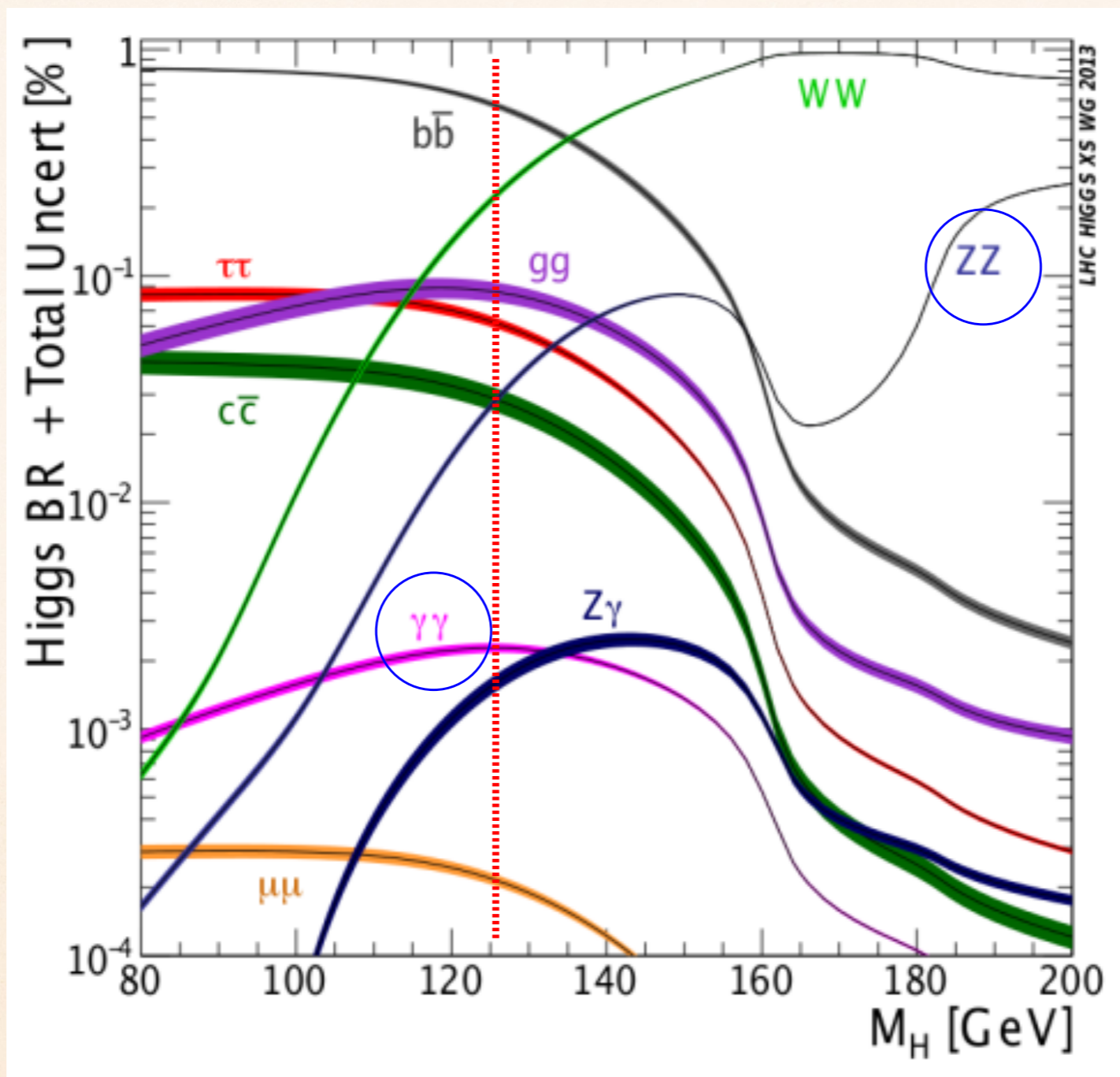


Маса



... и распад Хиггсового бозона

Вероятноћа
за распад

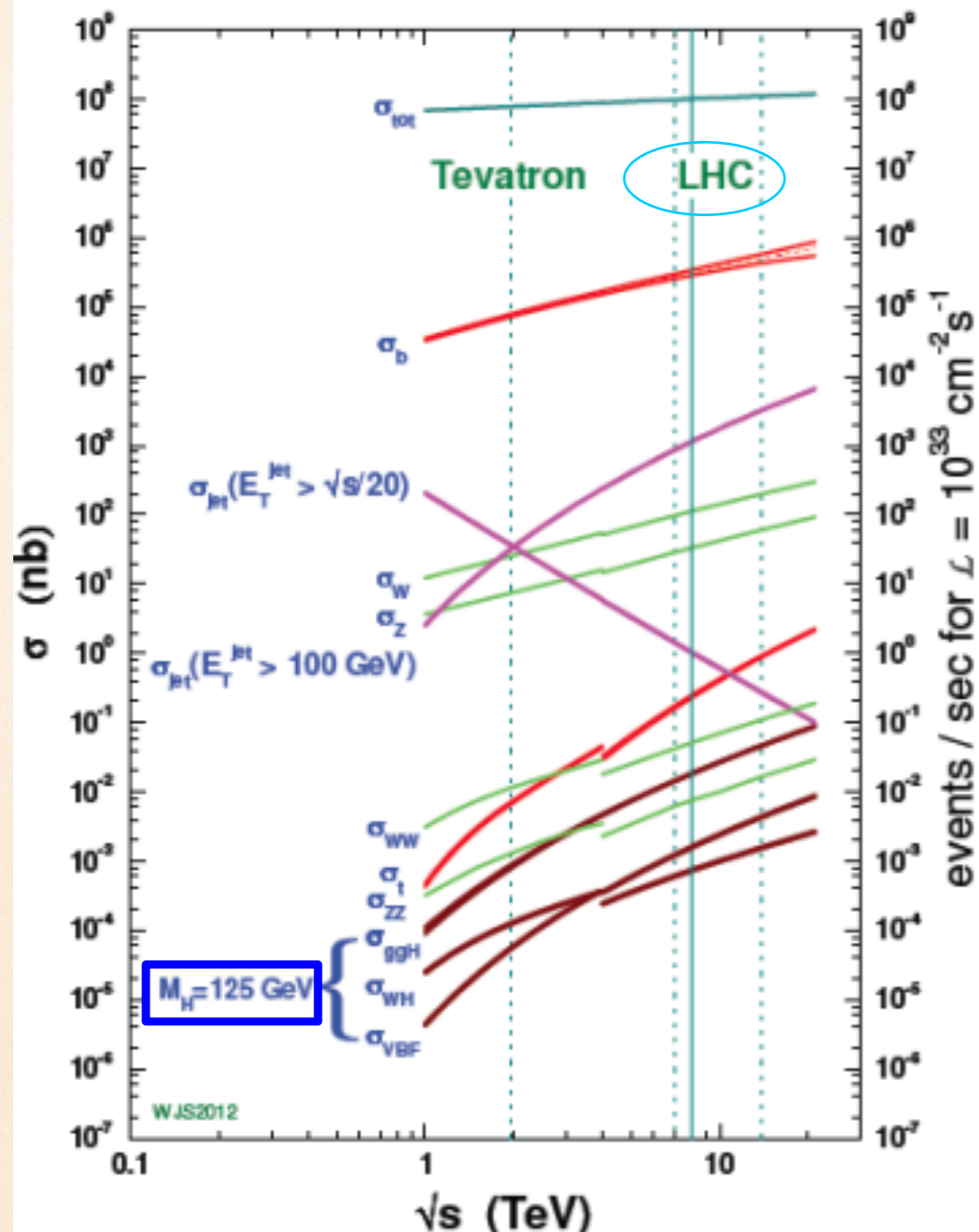


Маса

Како тражимо интресантне догађаје

Пресек

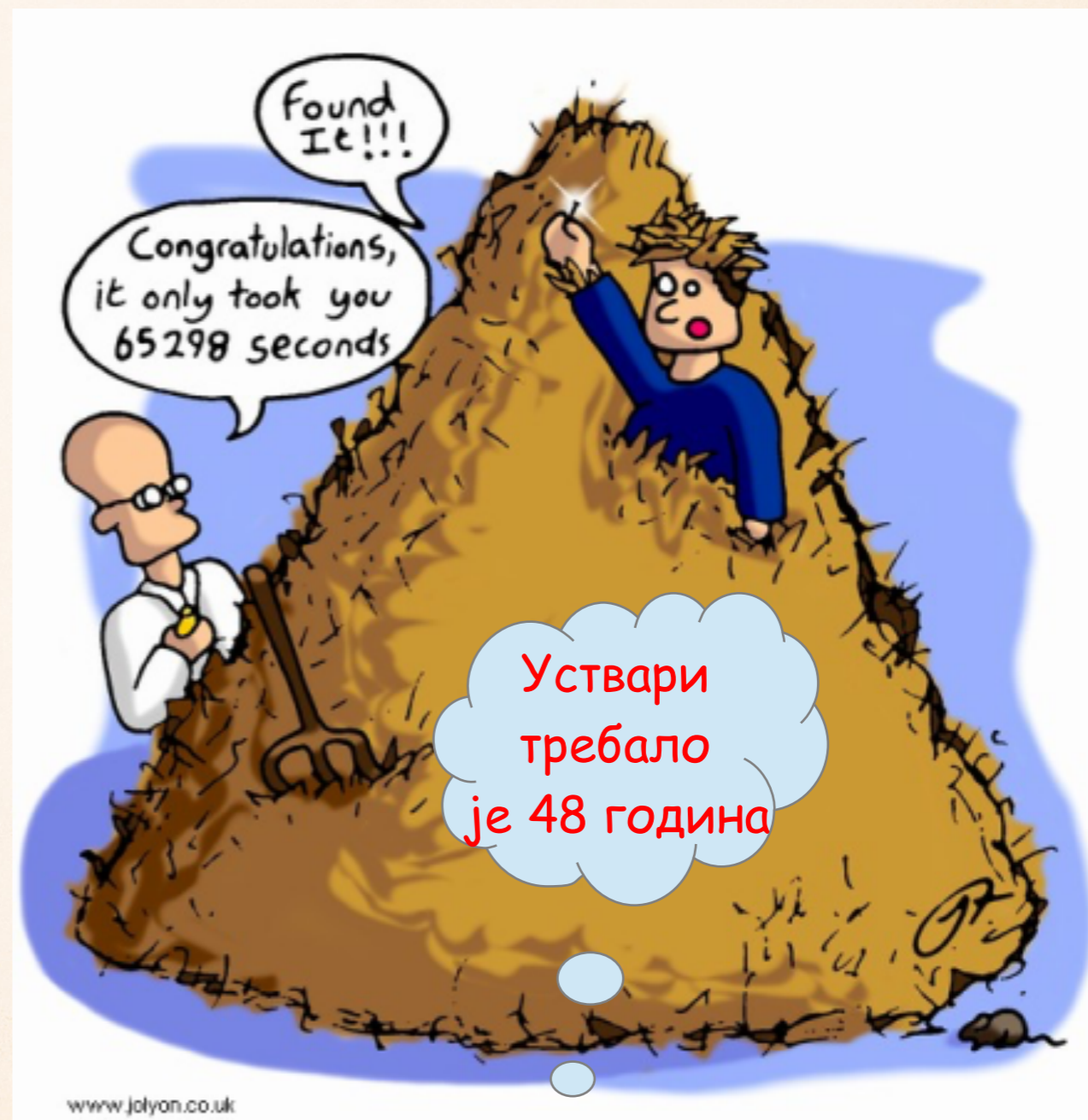
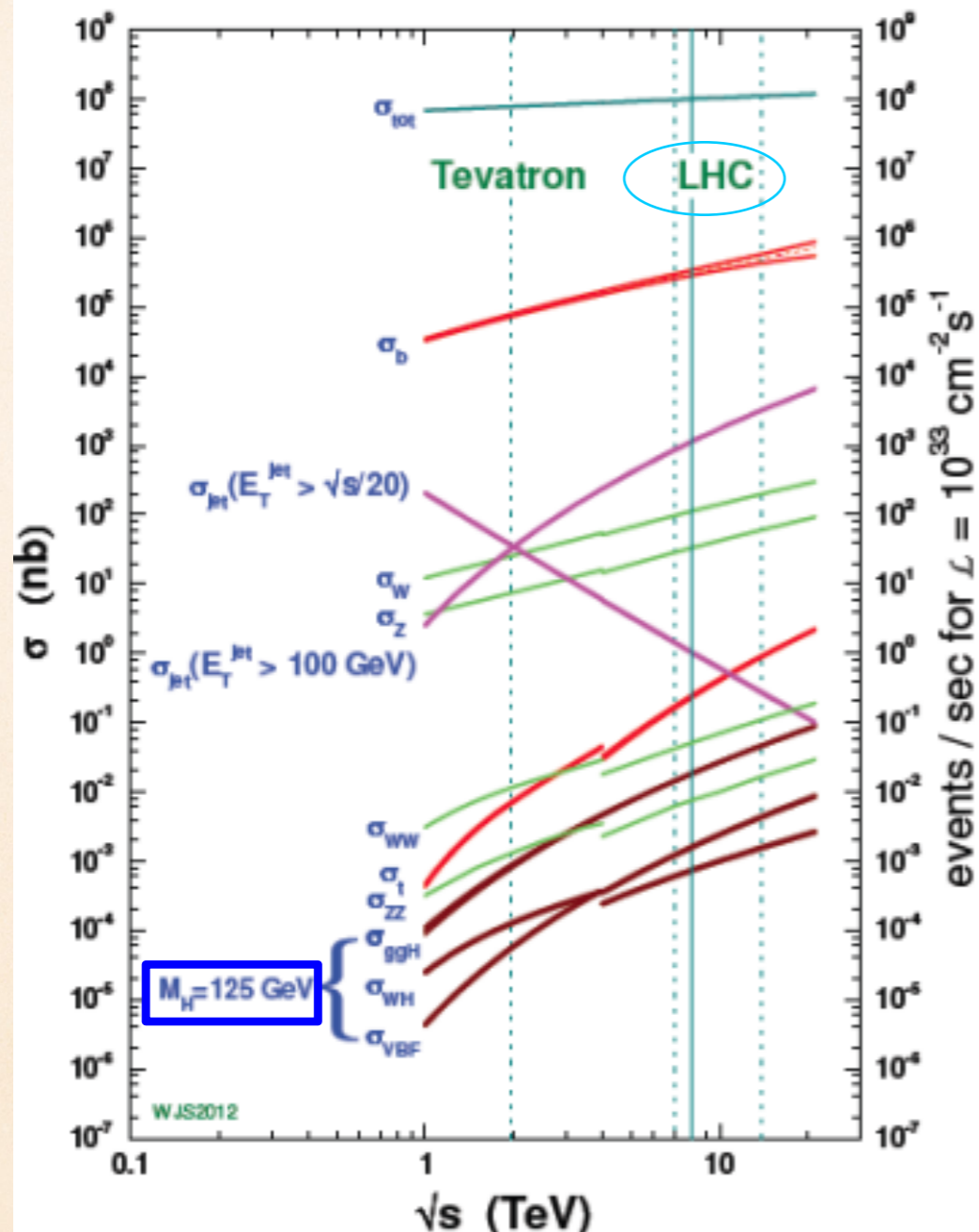
proton - (anti)proton cross sections



Како тражимо интресантне догађаје

Пресек

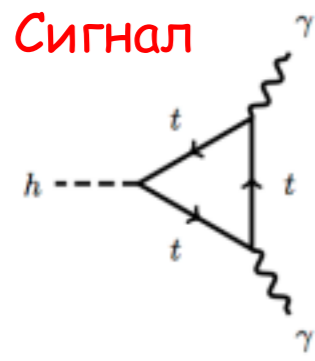
proton - (anti)proton cross sections



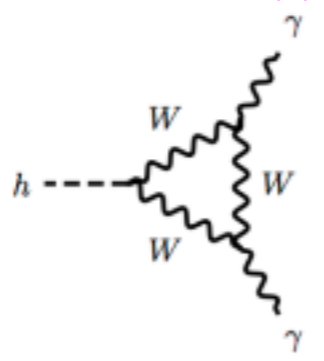
Сигнални и позадински процеси

- ❖ **Сигнал** је процес који нас занима, који желимо да видимо, нађемо и меримо - Хигсов бозон
- ❖ **Позадински** процес је процес који се у детектору види исто као сигнал
 - Или има исте честице у финалном стању
 - Или неке честице погрешно идентификујемо
- ❖ **Позадина** обично има пресек који је већи неколико пута

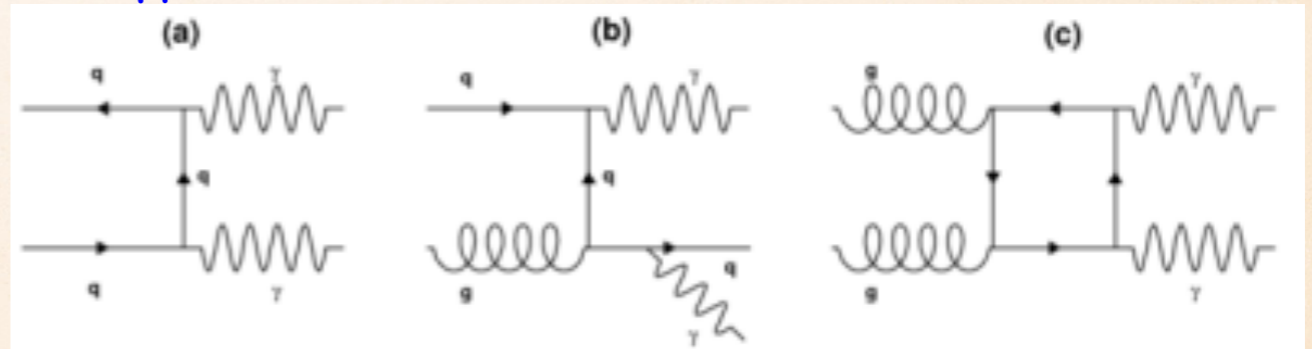
Сигнал



$H \rightarrow \gamma\gamma$



Позадина



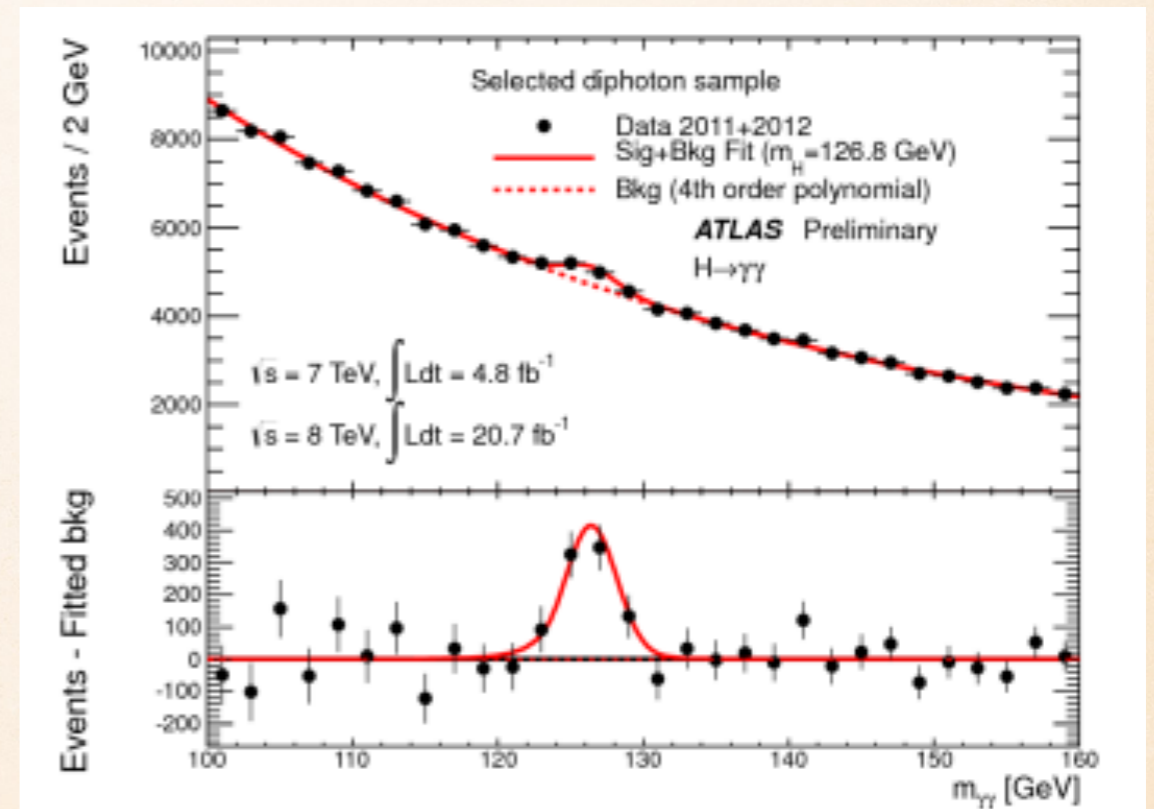
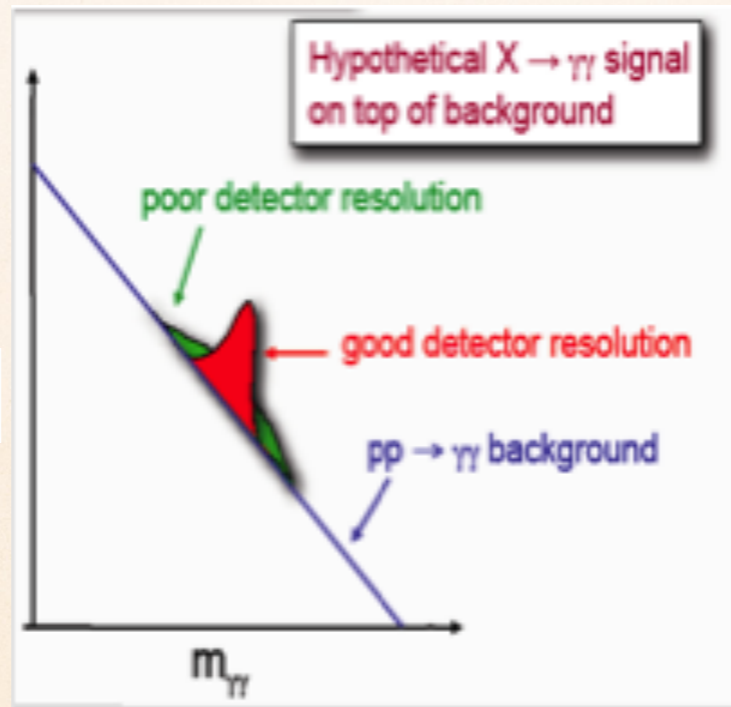


- ❖ Сигнал карактеришу два добро дефинисана фотона која долазе од резонантне честице
 - Може да се реконструише маса резонантне честице
- ❖ Позадина има опадајући спектар масе два фотона

$$E = m \cdot c^2 \rightarrow m^2 = E^2 - \vec{p}^2$$

$$m_{12}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos\theta)$$

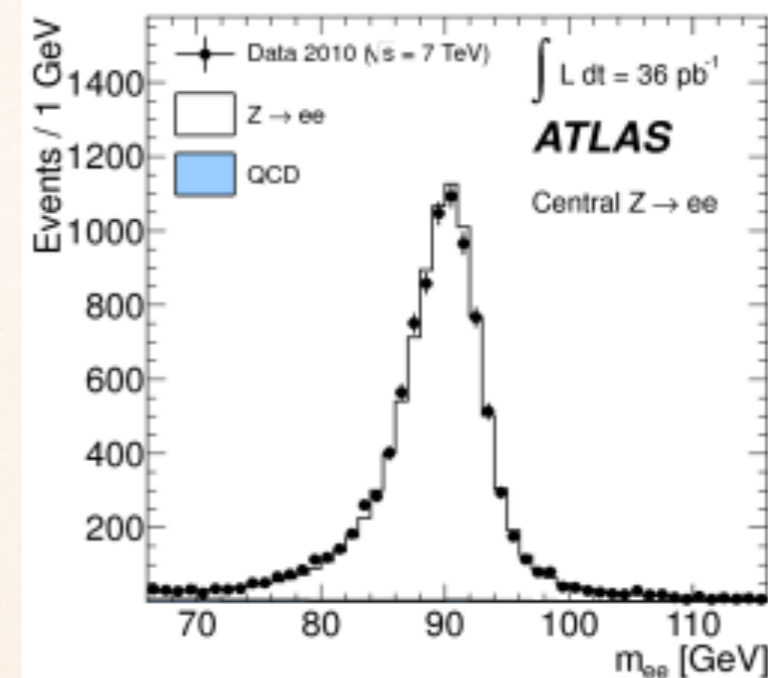
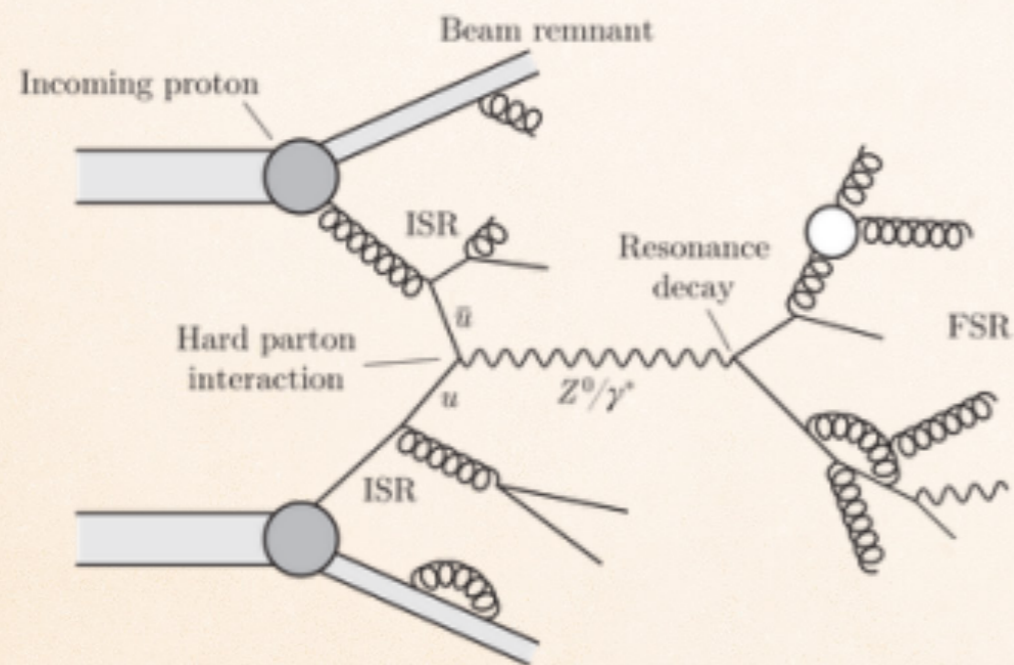


Шта меримо?

Measurement of the inclusive W^\pm and Z/γ^* cross sections in the e and μ decay channels in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector

Phys. Rev. D 85, 072004 – Published 23 April 2012

G. Aad et al. (ATLAS Collaboration)

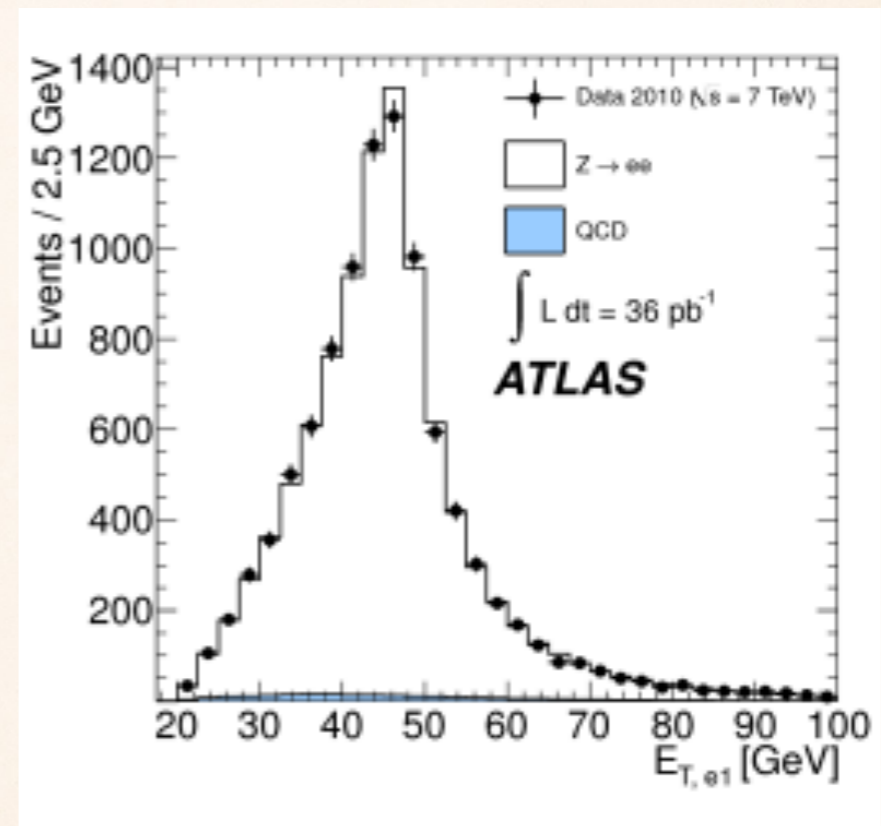
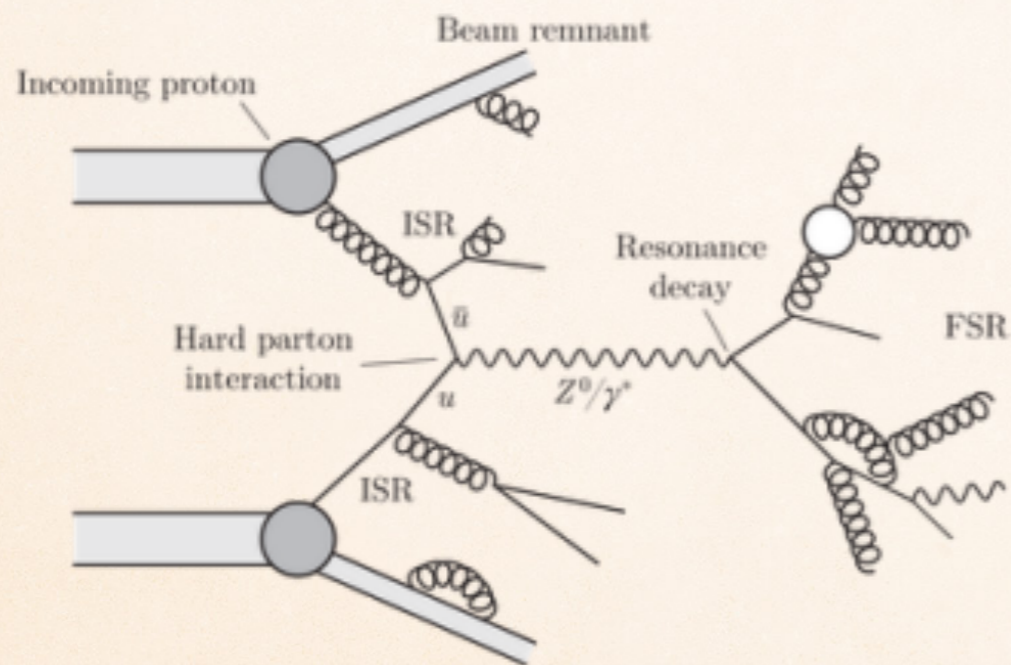


- ❖ Процес који нас занима је $Z \rightarrow ll$ (e, μ), predstavljamo ga pomoću neke osobine, у овом случају масе бозона (91 GeV)

$$m^2(Z) = E^2(Z) - \vec{p}^2(Z) = [E(e_1) + E(e_2)]^2 - [\vec{p}(e_1) + \vec{p}(e_2)]^2$$

Шта меримо?

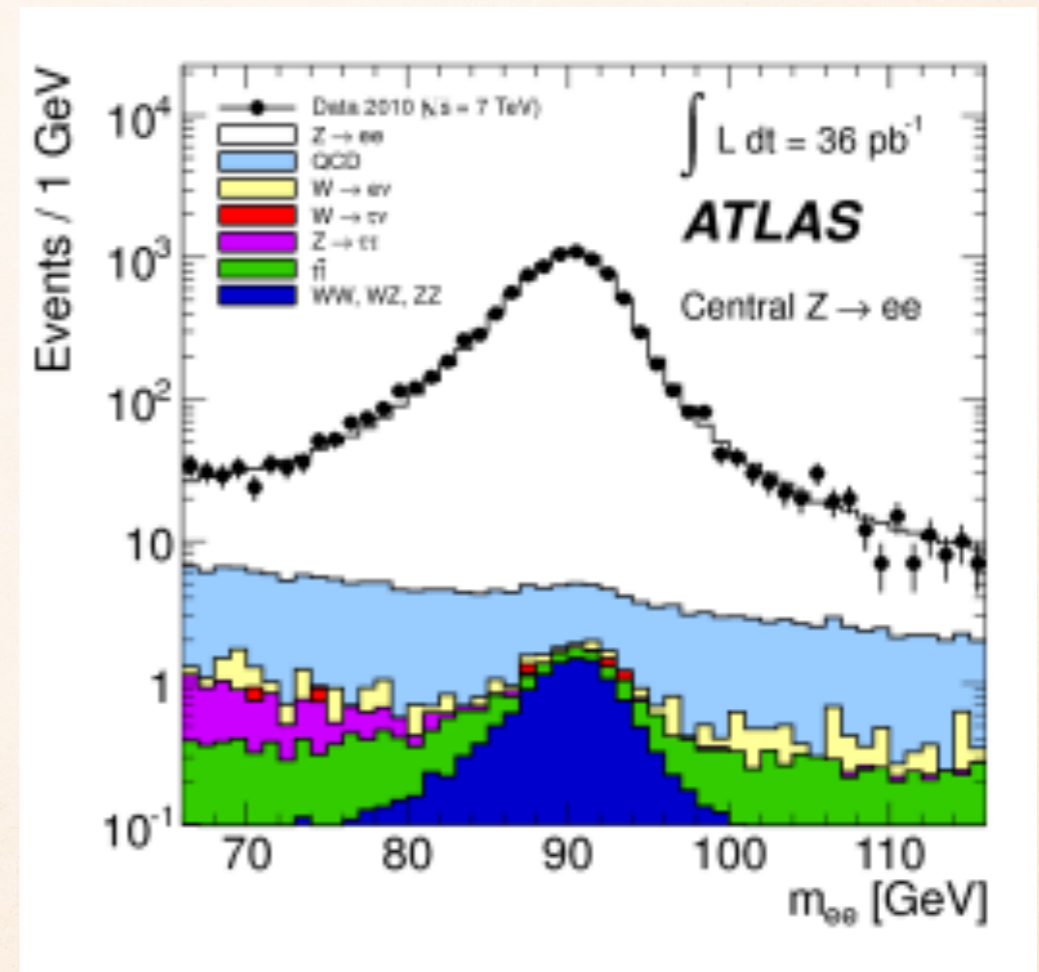
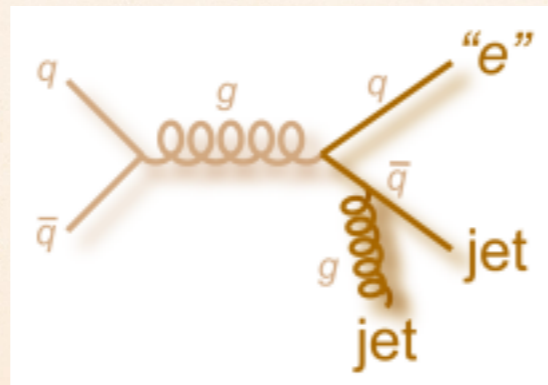
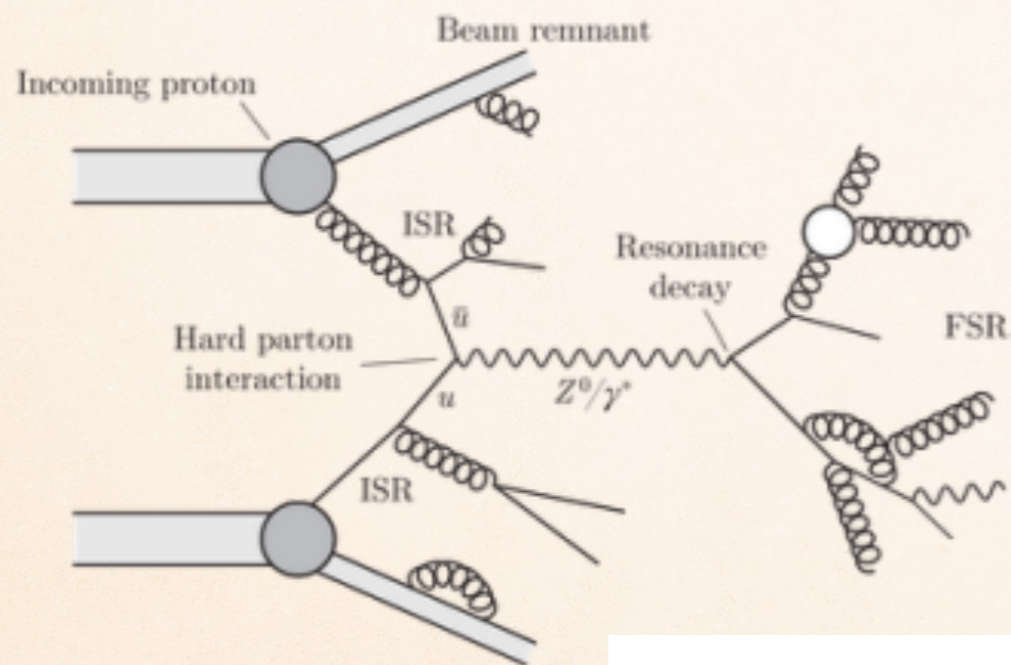
- ❖ Селекција догађаја $Z \rightarrow ll$ (e, μ)



- ❖ Два електрона или миона са великим p_T са инваријантном масом у околини масе Z бозона

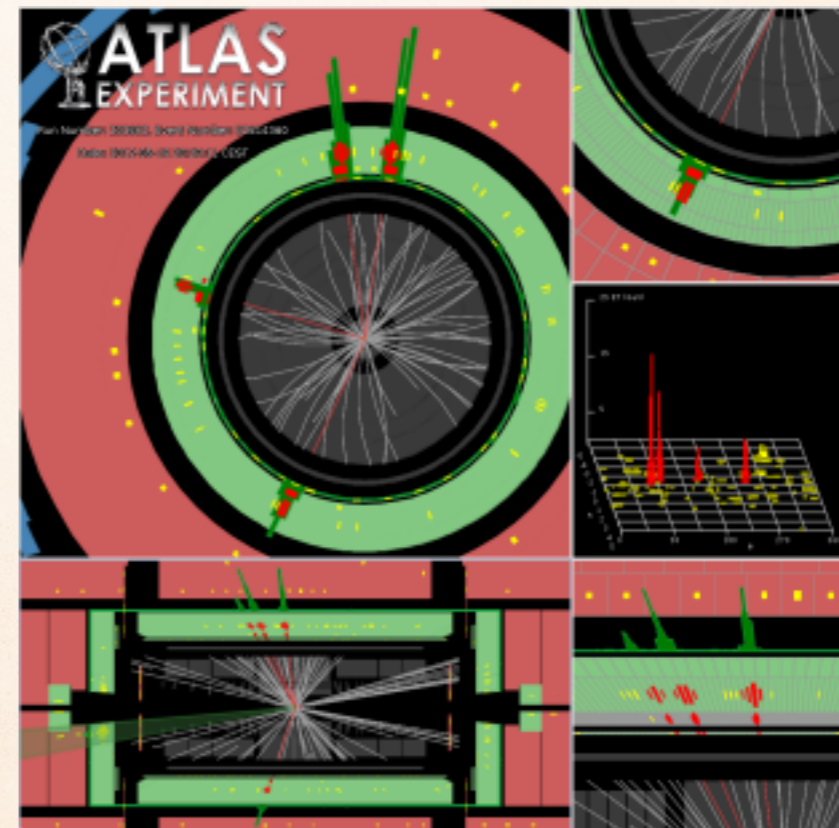
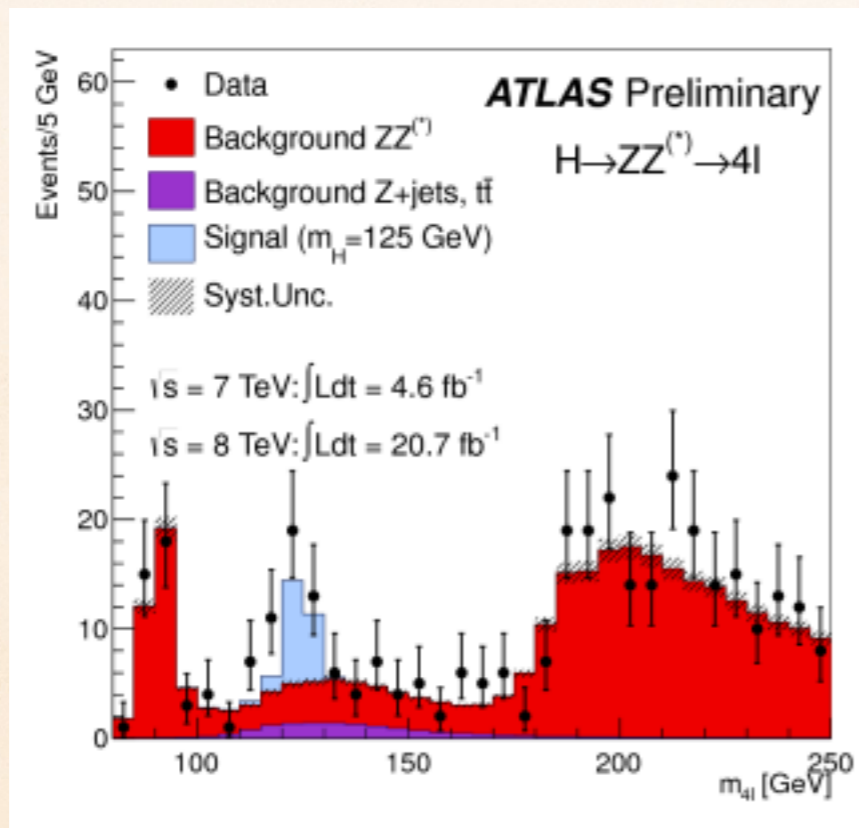
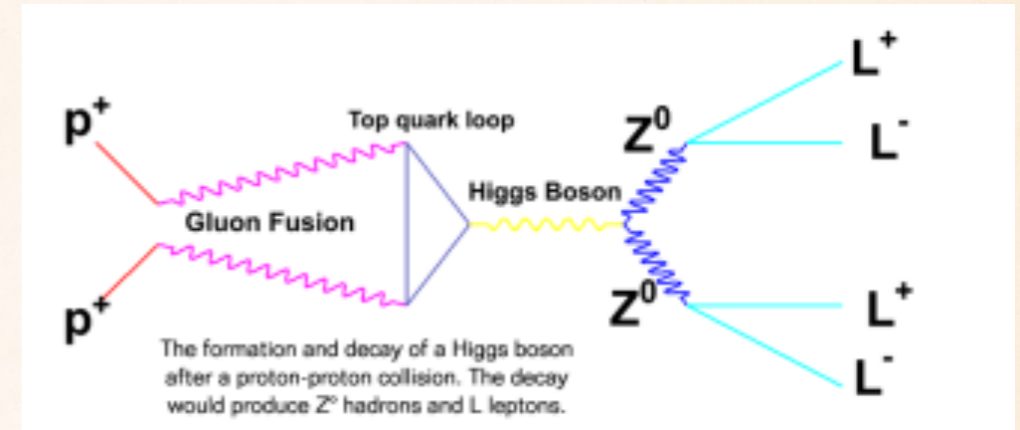
Шта меримо?

- ❖ Позадински процеси - сви ostali процеси који личе на сигнал

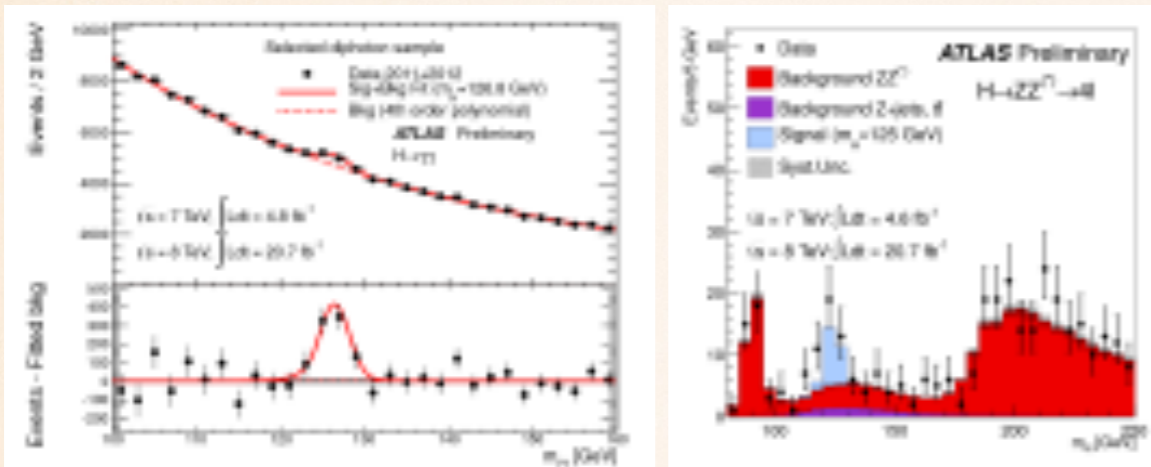


Хигсов бозон, $H \rightarrow ZZ$

- ❖ Z бозон није стабилан, поред осталог, распада се на два електрона или два миона
 - Финално стање садржи 4e, 4μ, или 2e2μ
 - Веома је јасно и лако се разликује од позадинских процеса



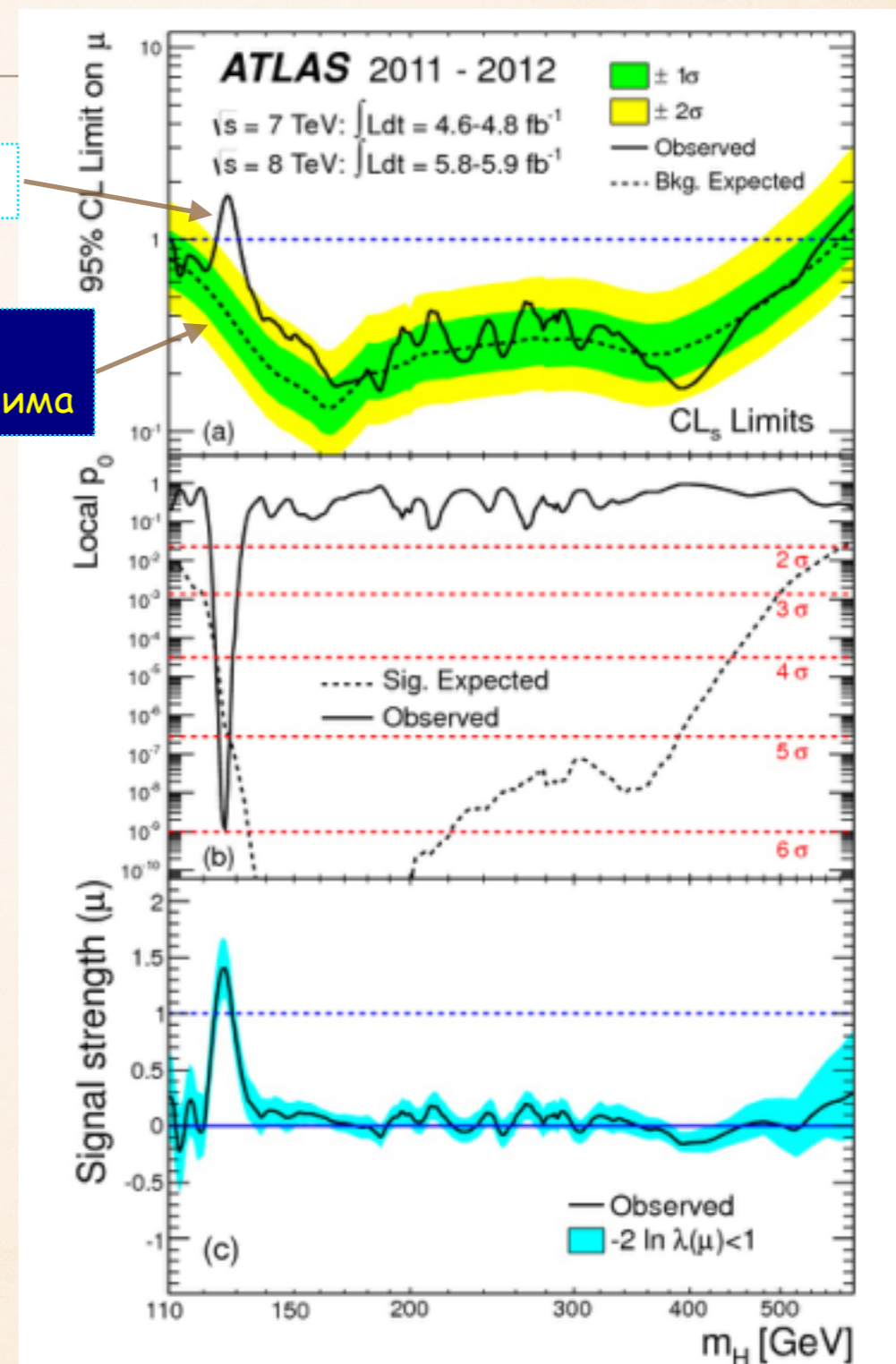
Откриће!



Из података

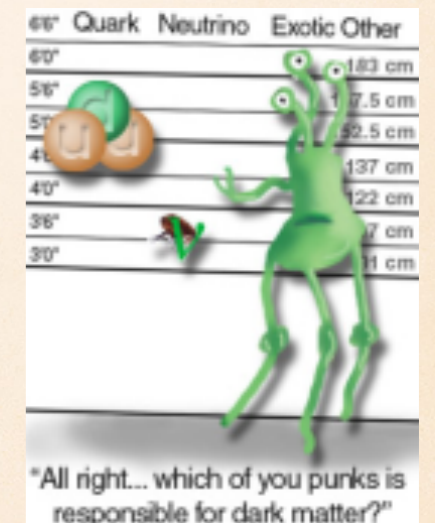
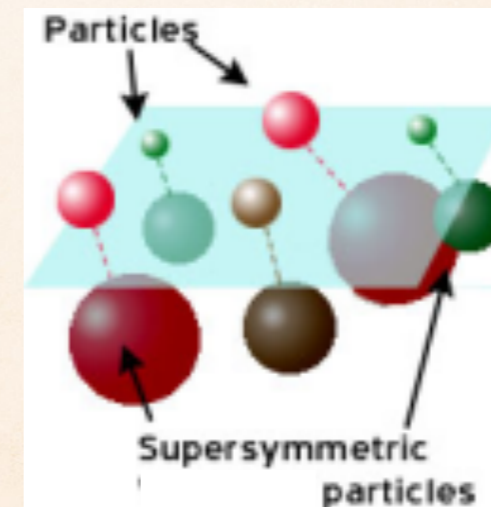
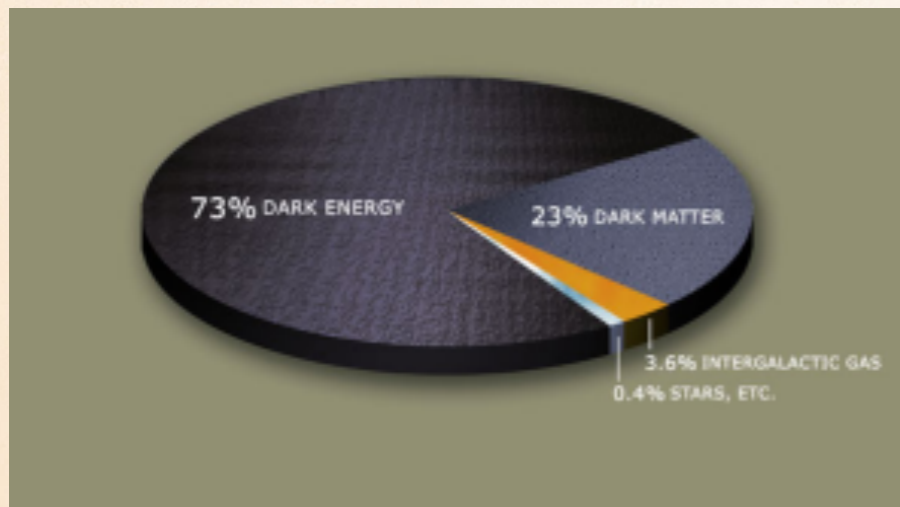
Из симулације
са неодређеностима

- ❖ Због малог пресека у поређењу са позадинским процесима, комбинује се резултат из више канала
- ❖ Јула 2012 објављено је откриће нове честице са особинама сличним Хигсовом бозону
- ❖ До данас, Хигсов бозон је виђен у следећим каналима распада:
 - ❖ $\gamma\gamma$, ZZ , WW , $b\bar{b}$ и $\tau\tau$



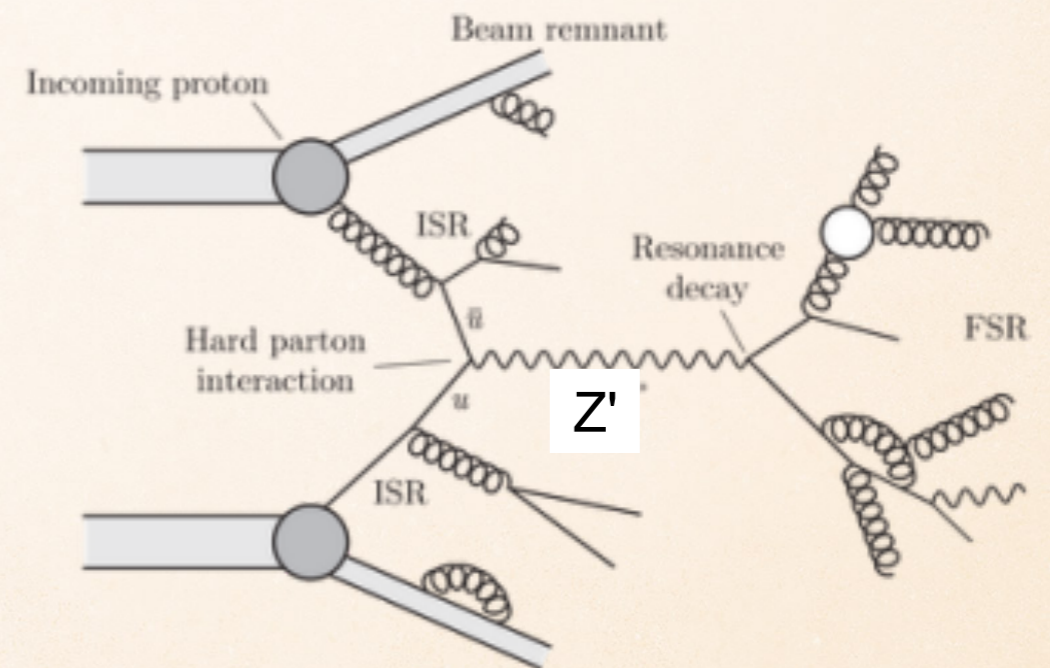
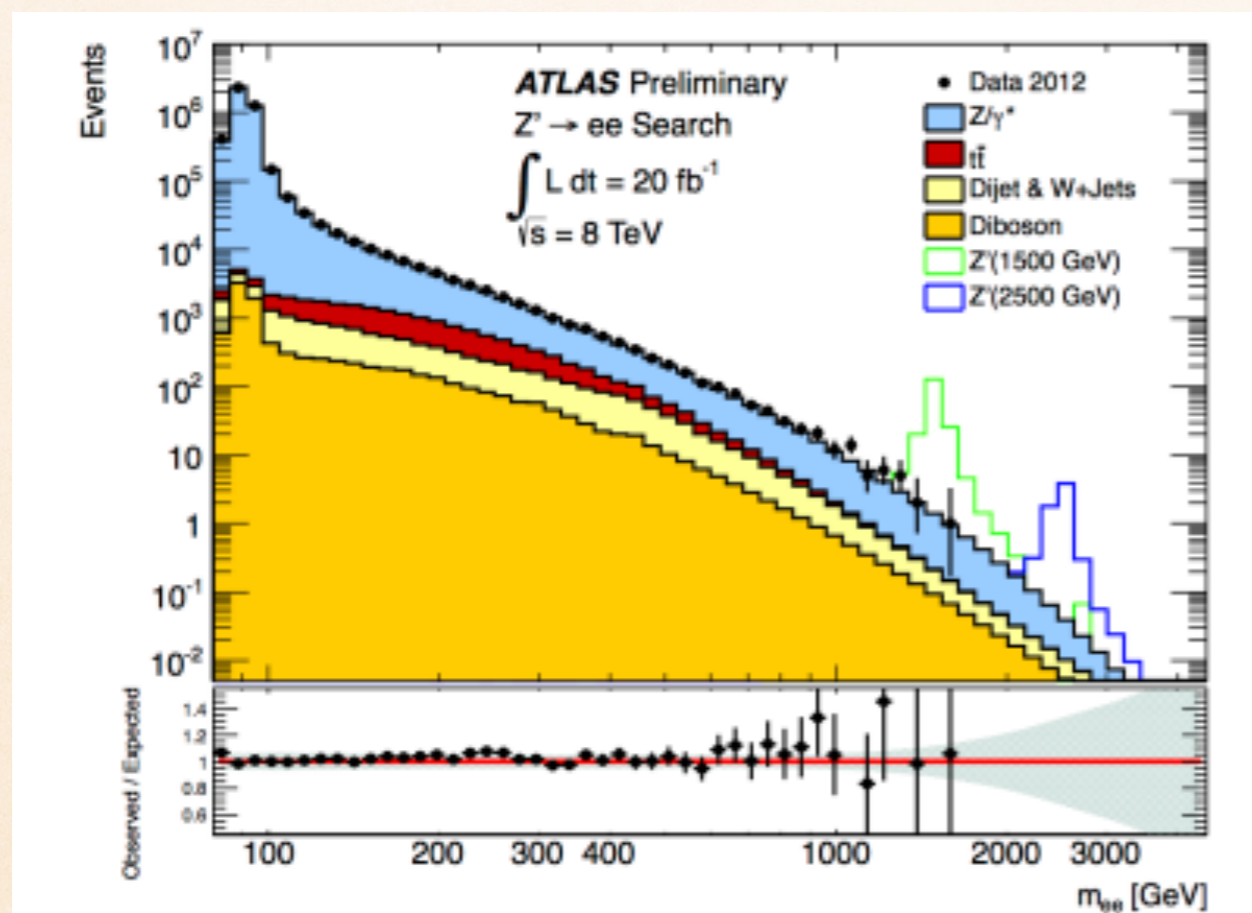
Физика изван стандардног модела

- ❖ Стандардни модел комплетиран је открићем Хигсовог бозона, али не описује све
- ❖ Постоје многи необјашњени проблеми - тамна материја, више материје у односу на антиматерију, гравитација...
- ❖ Нове теорије покушавају да објасне неке од тих феномена



Потрага за честицама ван стандарног модела - Z' бозон

- Многе теорије предвиђају постојање додатних тешких бозона \Rightarrow производи се и распада на сличан начин као Z бозон



Наши програми

<http://beamline-for-schools.web.cern.ch>

Рок за пријаву 31 март 2018



<http://www.physicsmasterclasses.org>



<https://home.cern/students-educators/teacher-programmes>

CERN Teachers Programs

Студентски програми

<https://home.cern/students-educators/summer-student-programme>