

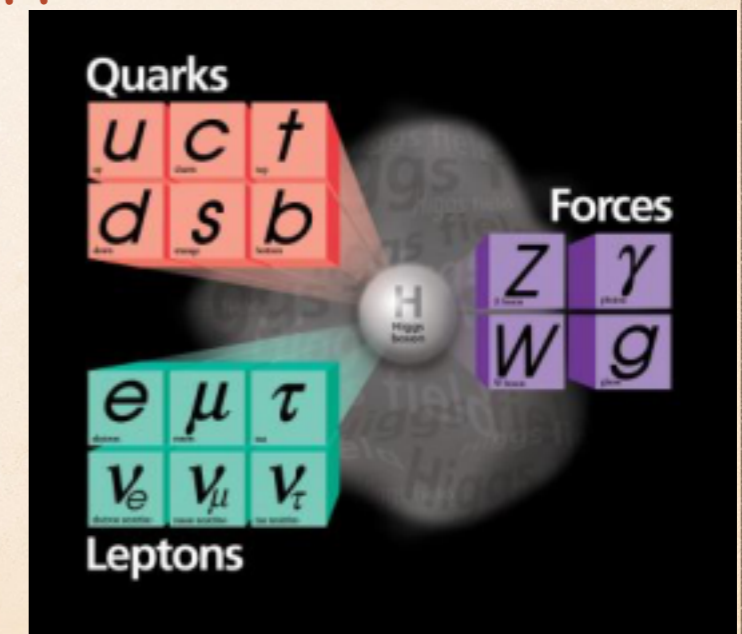
Цернов јавни час - Мастерклас
Србија, 4. април 2022.

Физика на експериментима Великог сударача хадрона

Лидија Живковић,
Институт за физику Београд

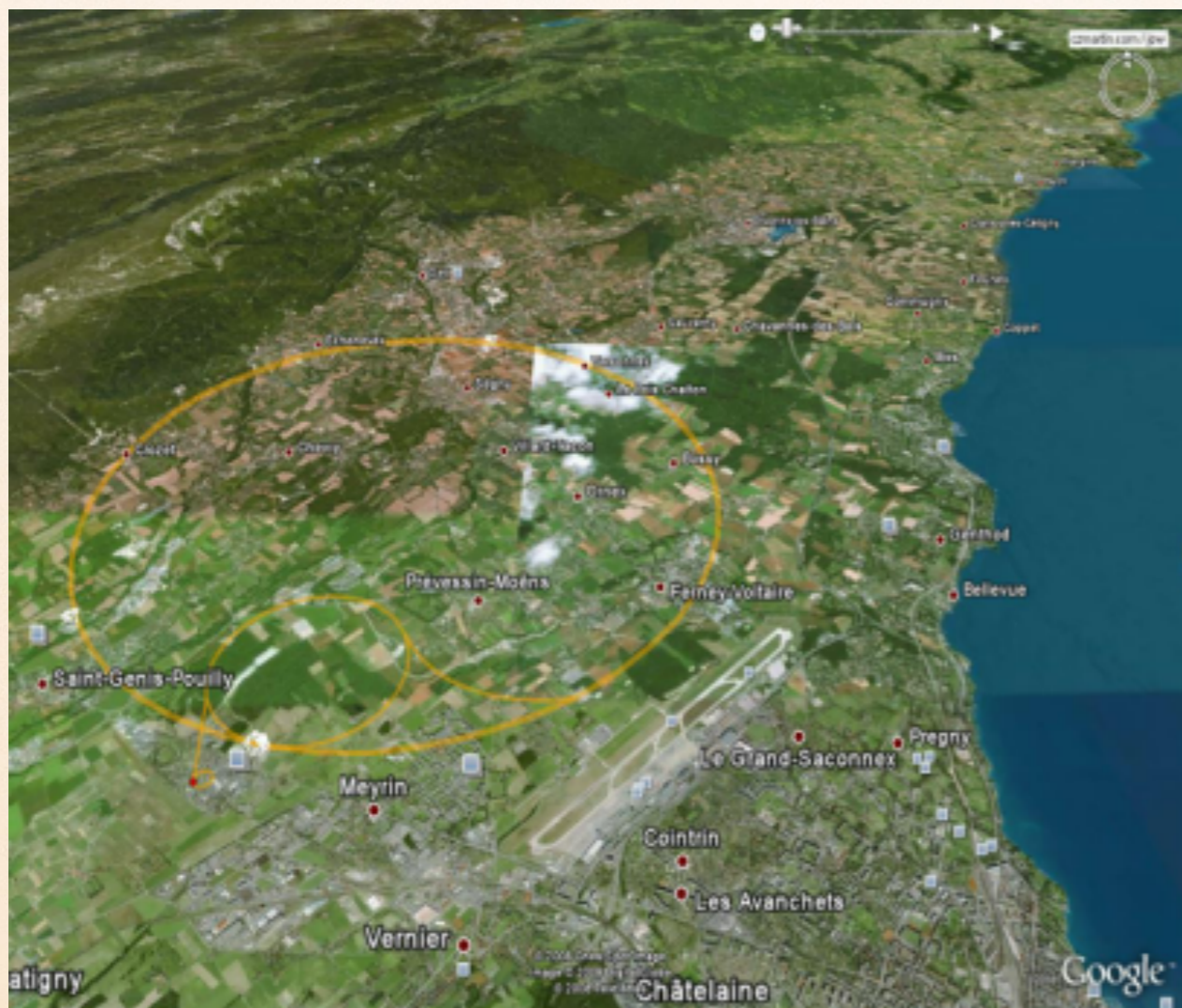


$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. + \bar{\psi}_i \gamma_j \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Павле Савић

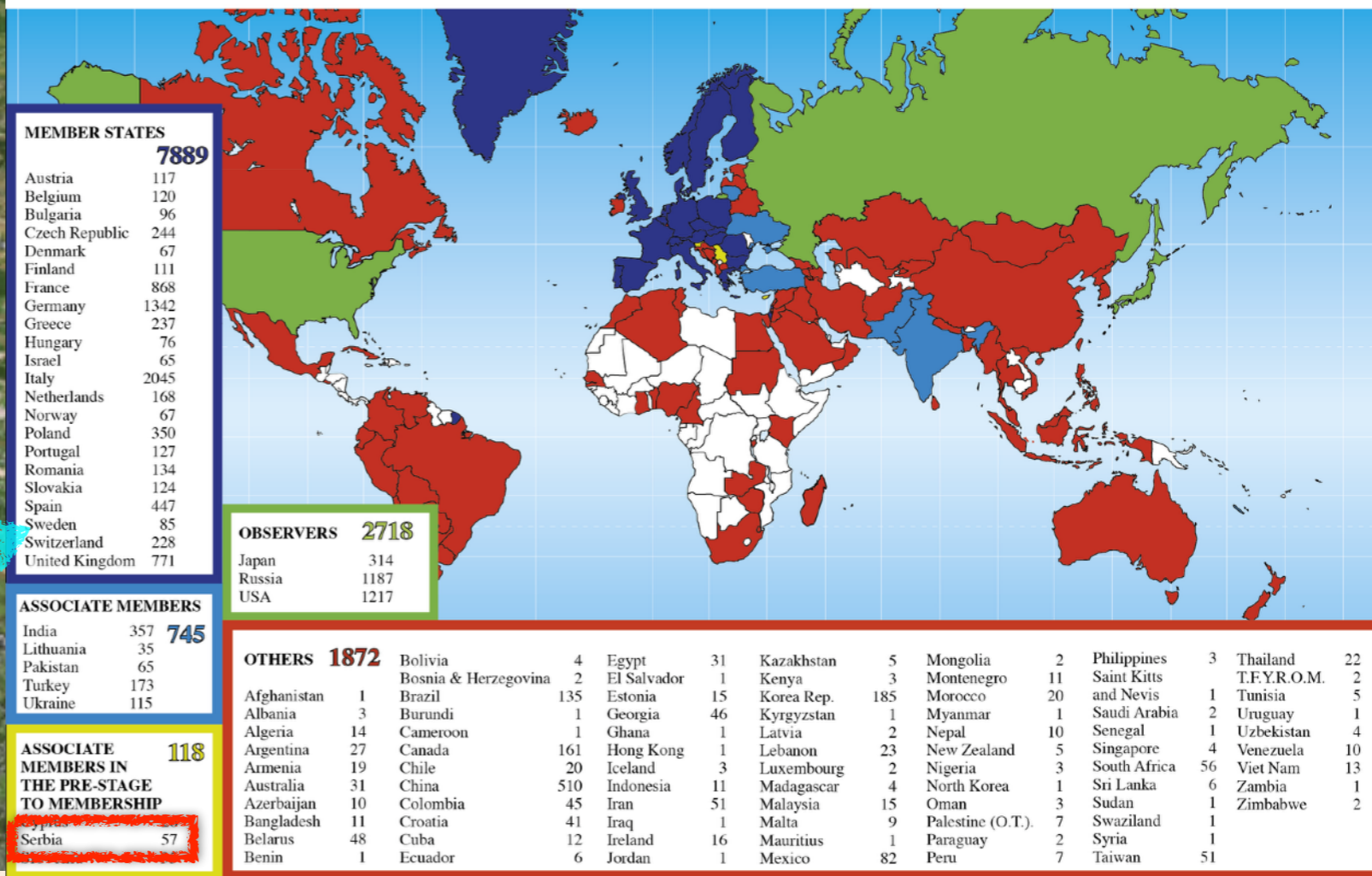
О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

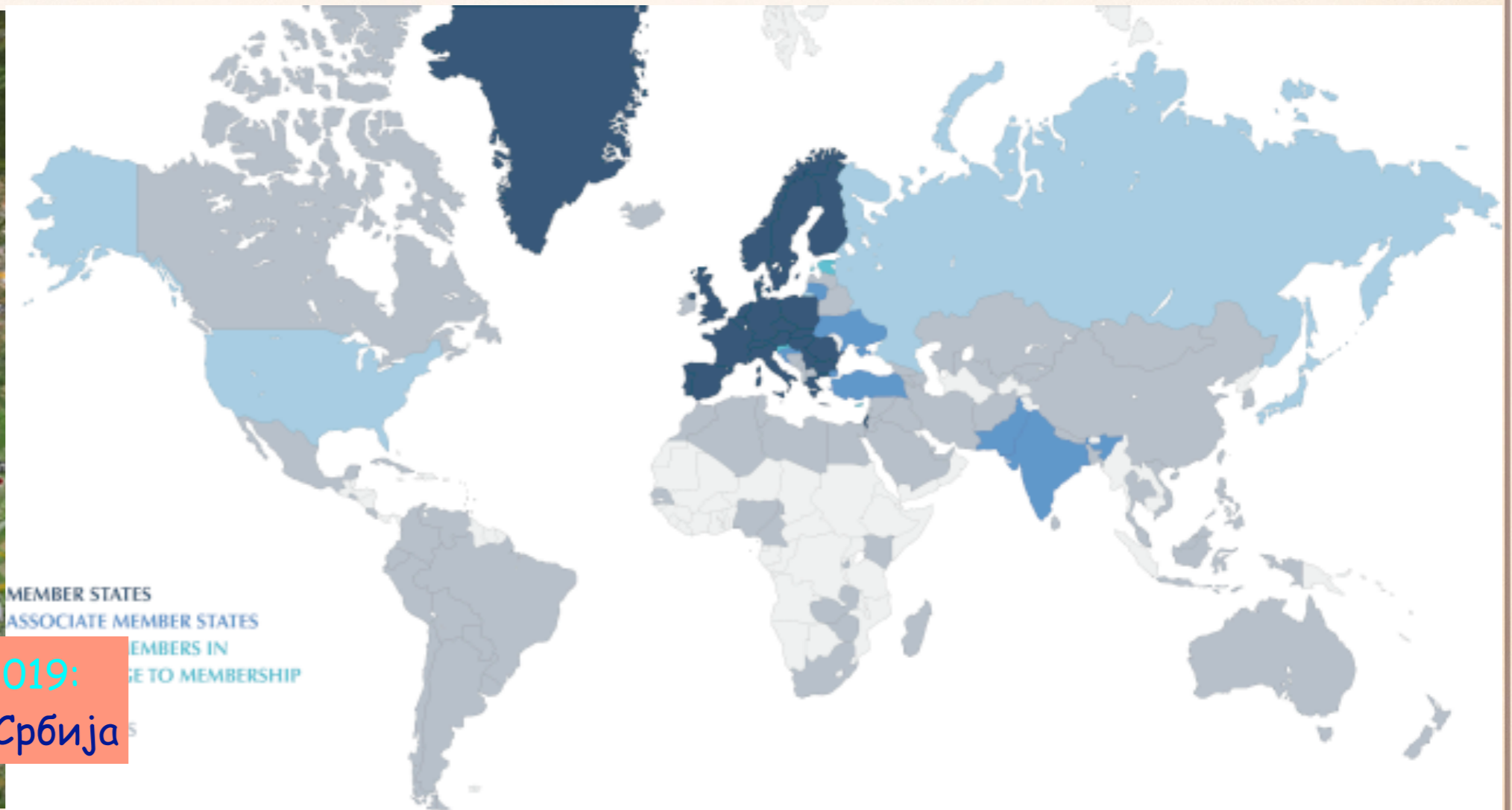
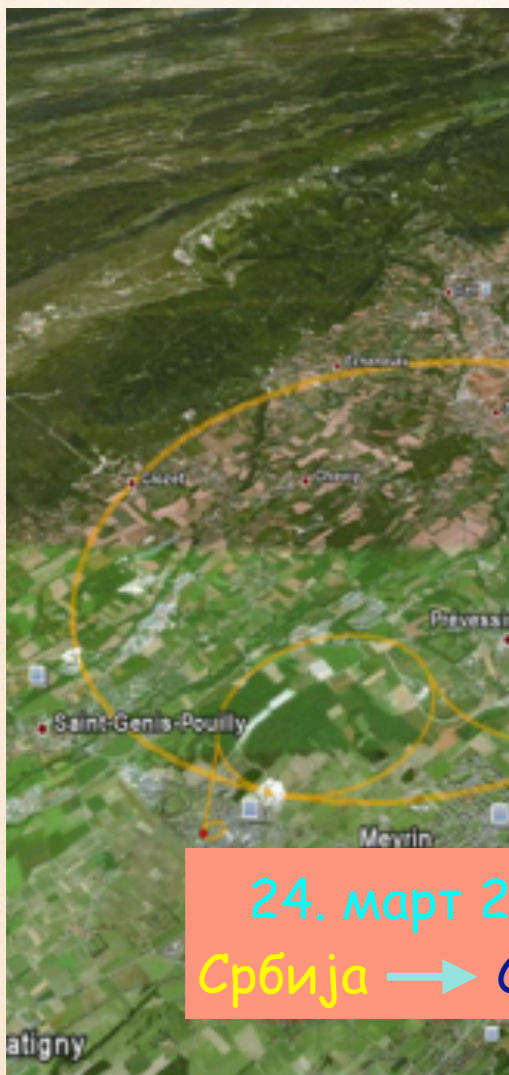


24. март 2019:
Србија → Србија



О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



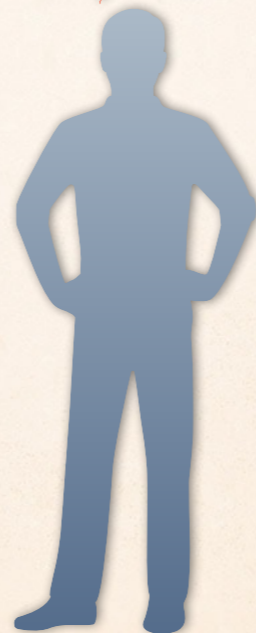
24. март 2019:
Србија → Србија

О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Шта чланство у Церну
значи за мене?

Па можеш да будеш
фризчар :)



24. март 2019:
Србија → Србија

О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Шта чланство у Церну
значи за мене?

~~Па можеш да будеш
физичар :)~~

Можеш да будеш
шта год хоћеш!



24. март 2019:
Србија → Србија

О Церну

1954
CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Шта чланство у Церну
значи за мене?

- ❖ Церн нуди разне могућности
- ❖ образовање кроз разне студентске праксе
- ❖ Постдипломско усавршавање различитих профила
 - ❖ од физике до управљања људским ресурсима
- ❖ Запослење
- ❖ Сарадњу са нашом индустријом
 - ❖ Укључијући ИТ и трансфер технологије

Можеш да будеш
шта год хоћеш!

24. март 2019:
Србија → Србија

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 (ЛЕП)

❖ 1995: Прва синтеза анти-водоника

❖ 2012: Хигсов Бозон (ЛХЦ)

❖ Техника

❖ 1989 Први web сервер из кога је настао модеран интернет

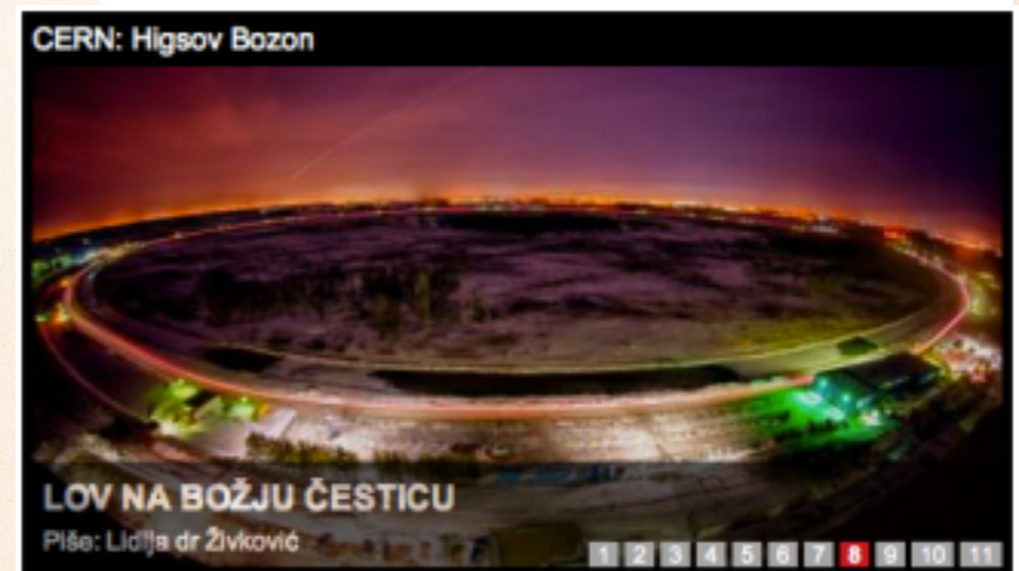
❖ Допринос у развоју технологија...

❖ Мноштво експеримената

❖ ЛХЦ је само део приче

Да се вратимо на науку - нова честица

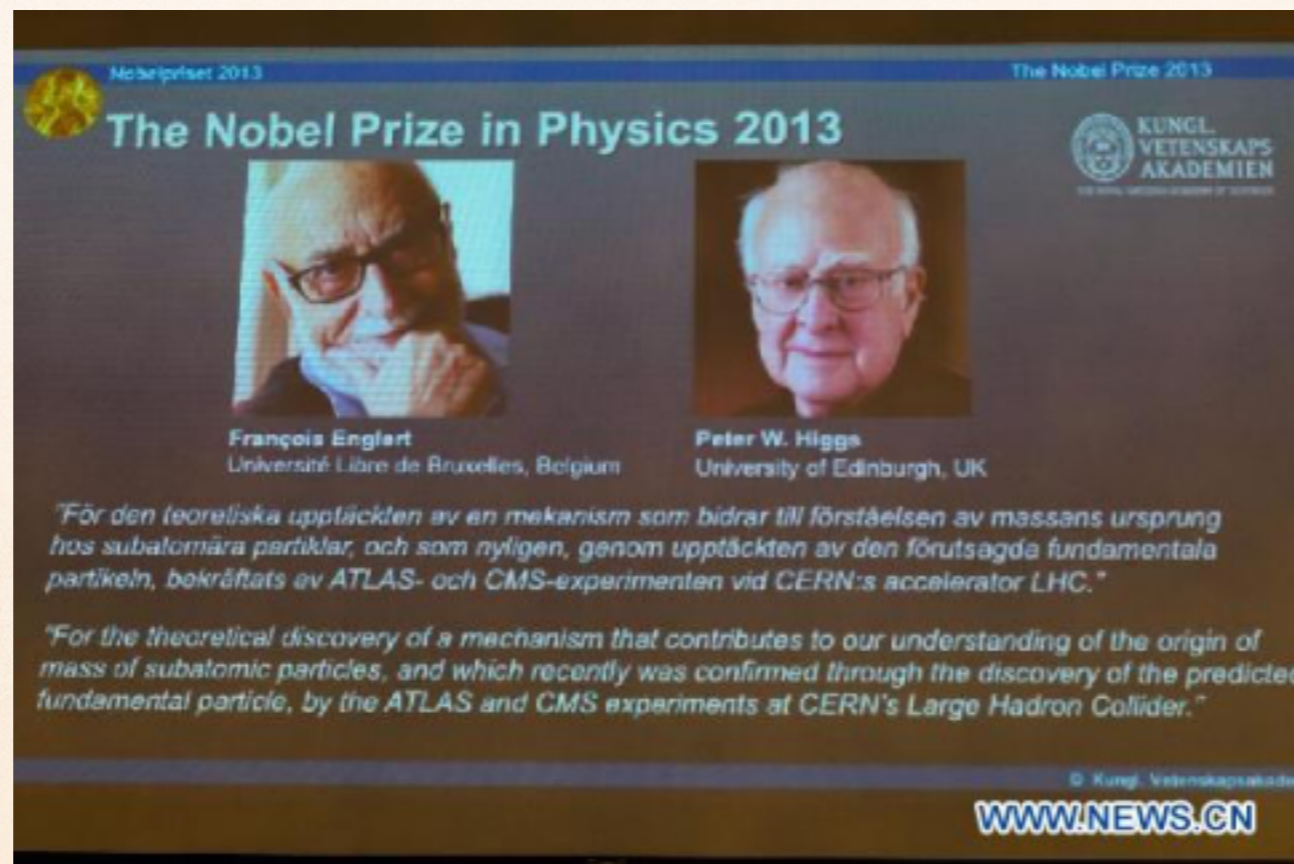
- ❖ У јулу 2012 ударна вест на свим светским медијима била је из науке, физике
 - **Откривена је нова честица - Хигсов бозон**
- ❖ Резултати су објављени у Церну уз директан пренос који су пратили научници широм света



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

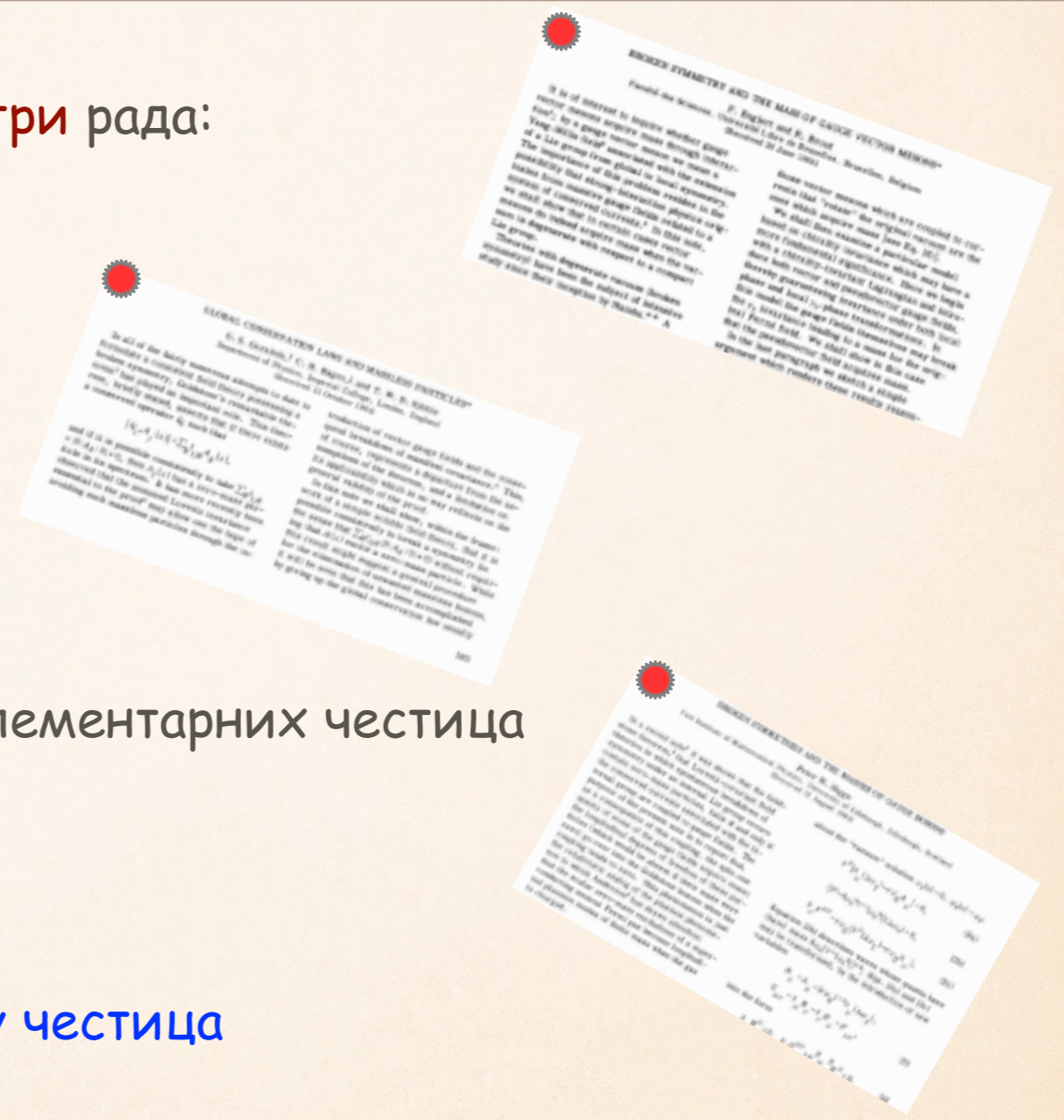
❖ Питер Хигс

❖ Радови представљају револуцију у физици елементарних честица

❖ Објашњавају порекло масе

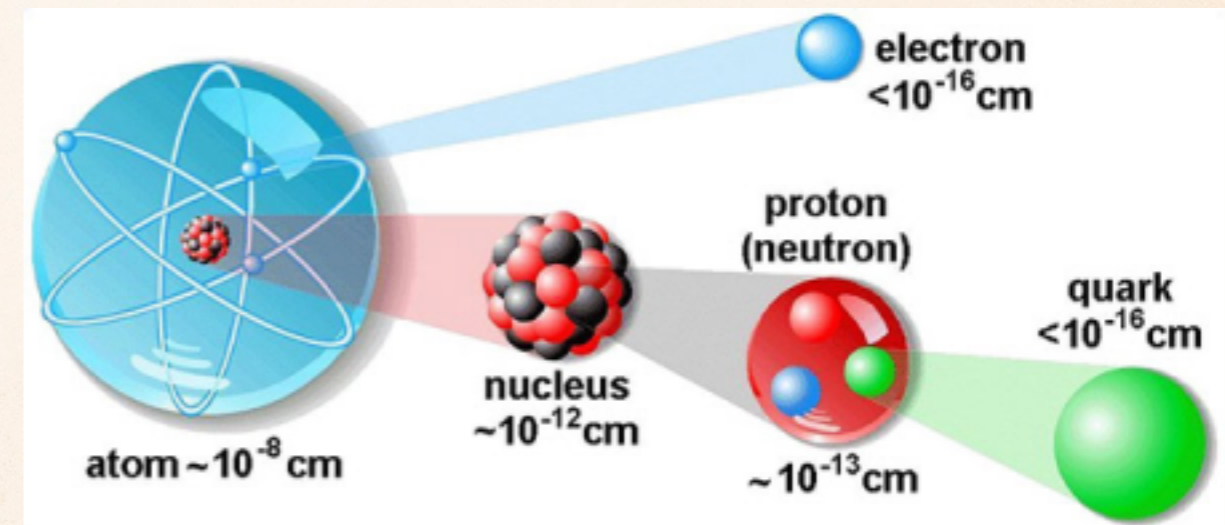
❖ Уводе принцип нарушења симетрије у физику честица

❖ 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 → **áтоџов (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
- ❖ Детаљи су у претходном предавању



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

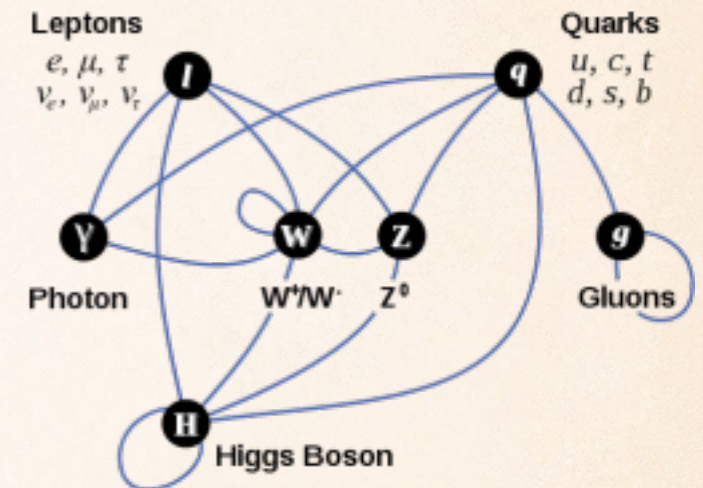
❖ Преносиоци: глуони - g , слаби бозони W^\pm, Z , и фотон

❖ Честице материје: Лептони и кваркови

❖ И спонтано нарушење симетрије: Комплексно скаларно поље

❖ Које нарушава:

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



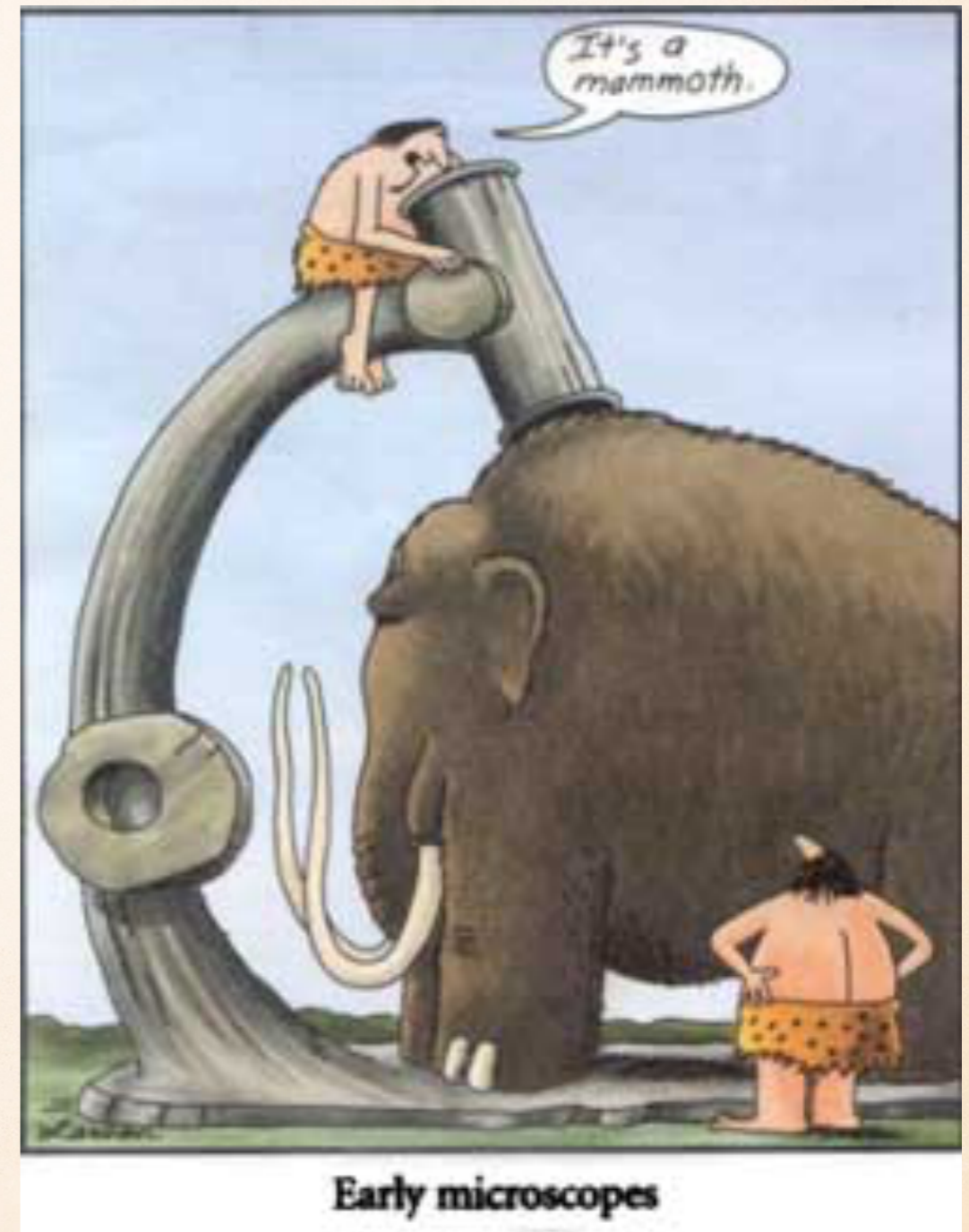
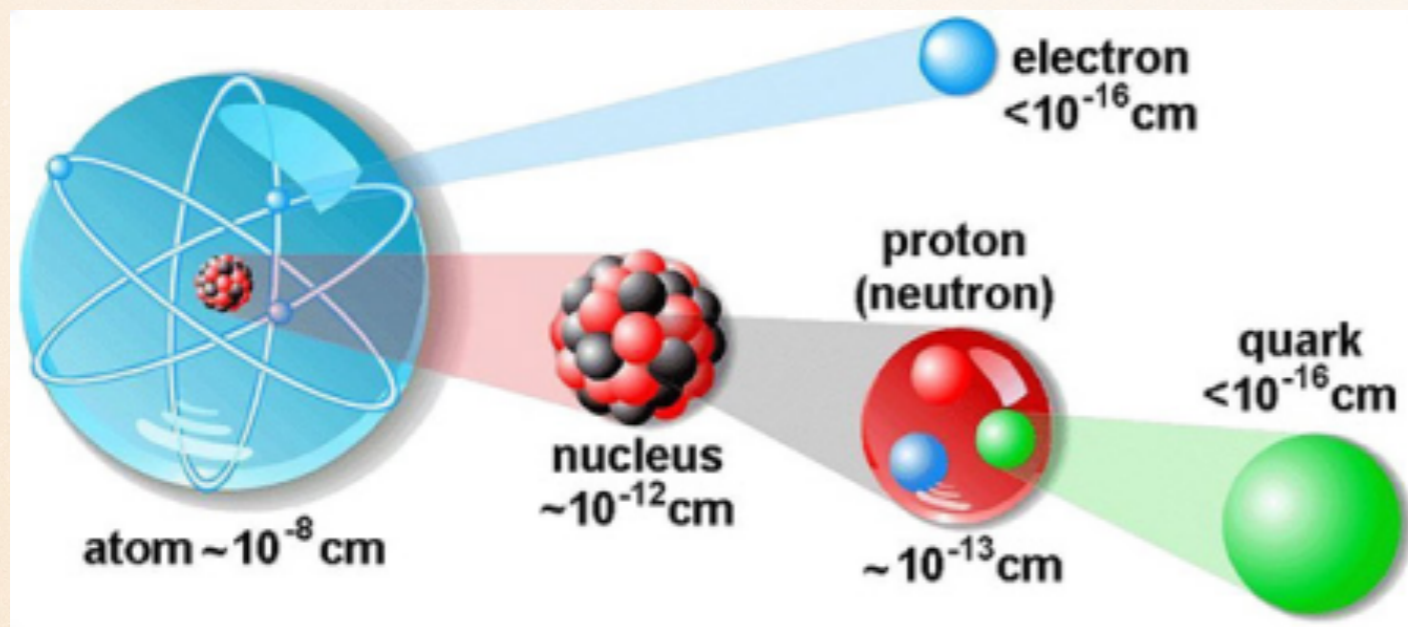
Three Generations of Matter (Fermions)

	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)

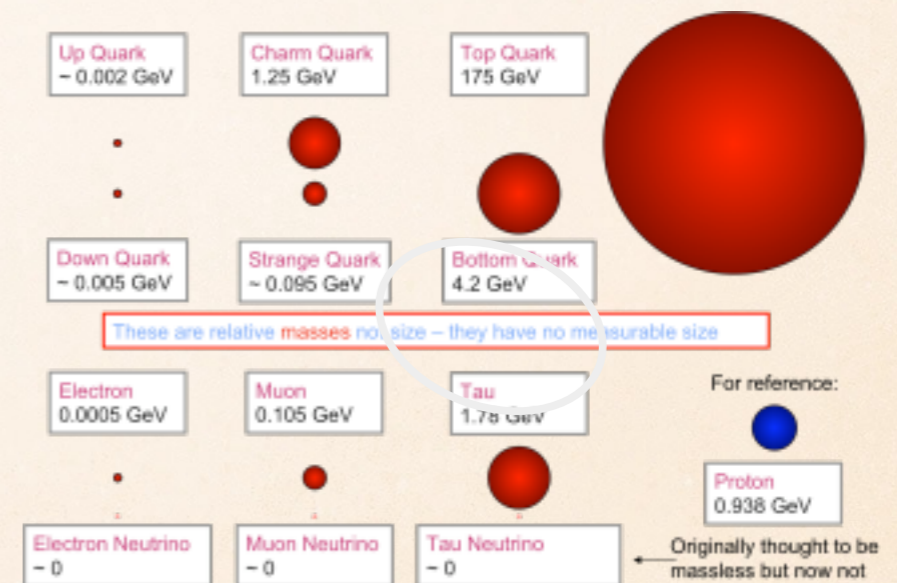
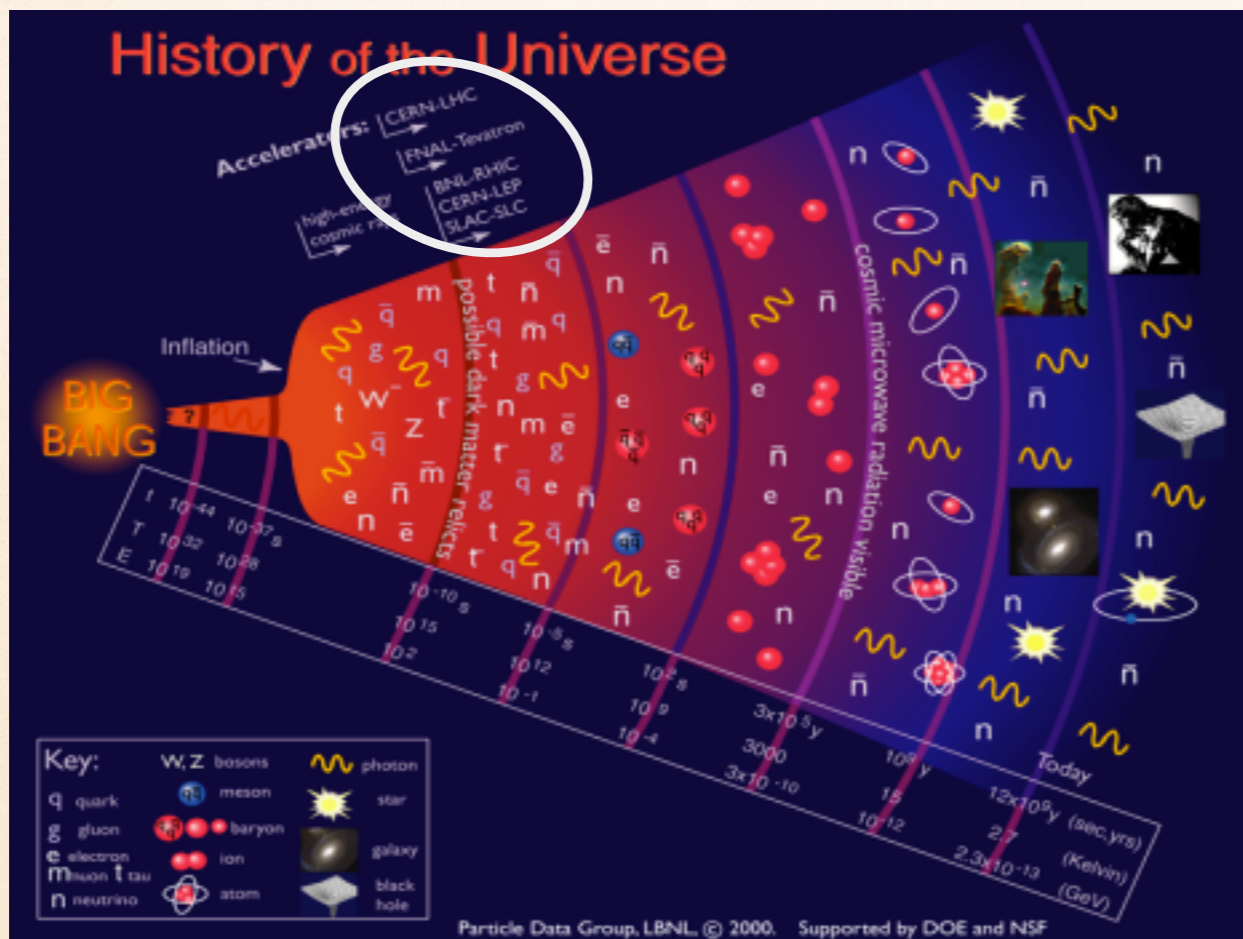
Како се детектују честице

- ❖ 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

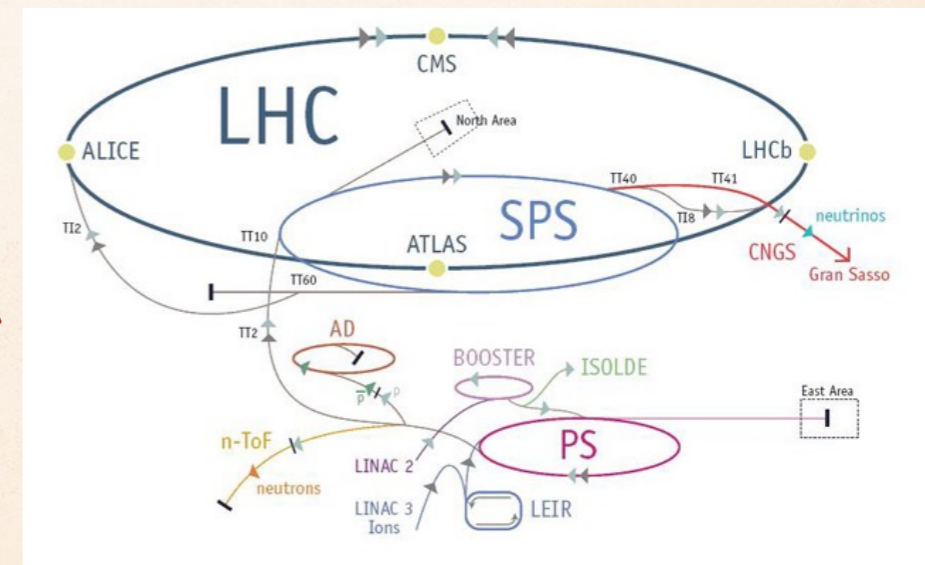
- ❖ Акцелератори су машине за убрзавање честица
- ❖ **Линеарни** - користе електрично поље за убрзавање наелектрисаних честица



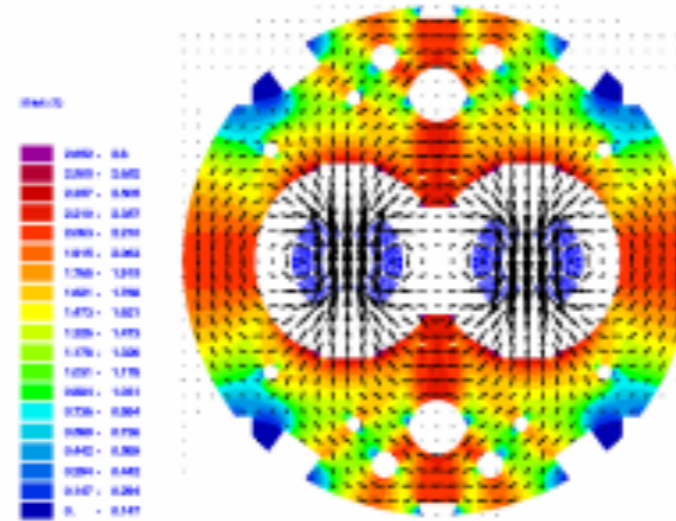
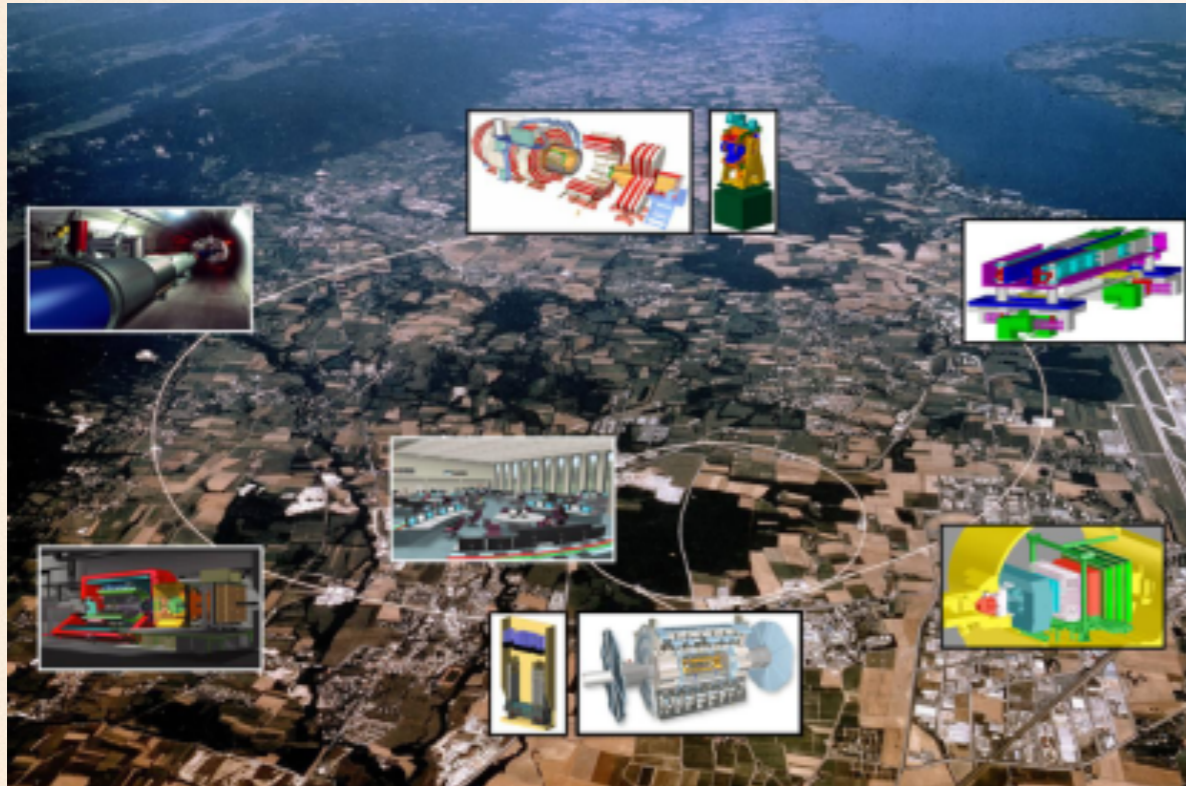
- ❖ **Кружни** - користе електрично поље за убрзавање наелектрисаних честица и магнетно поље за њихово скретање



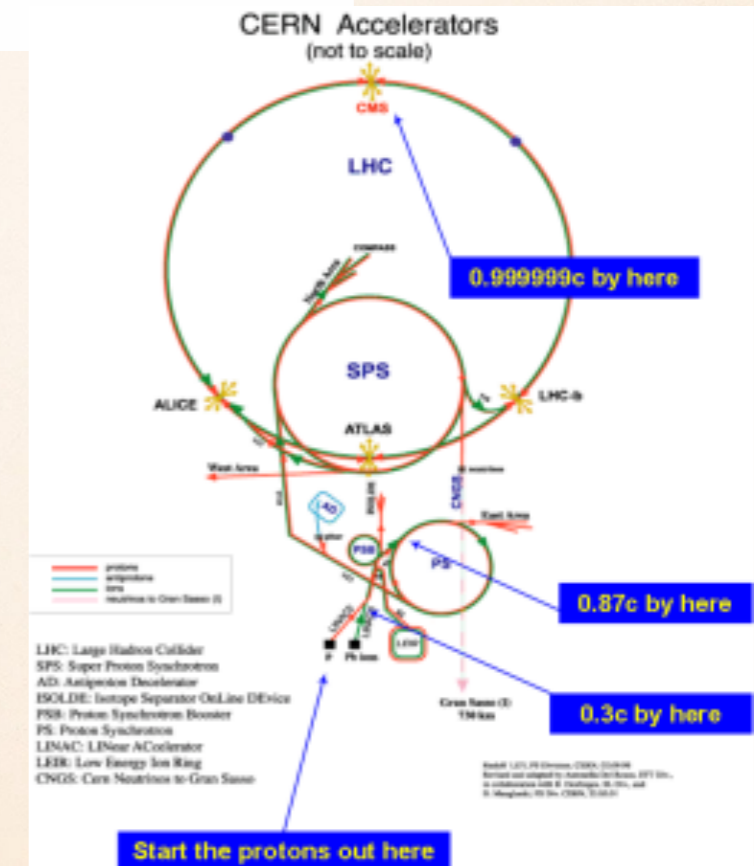
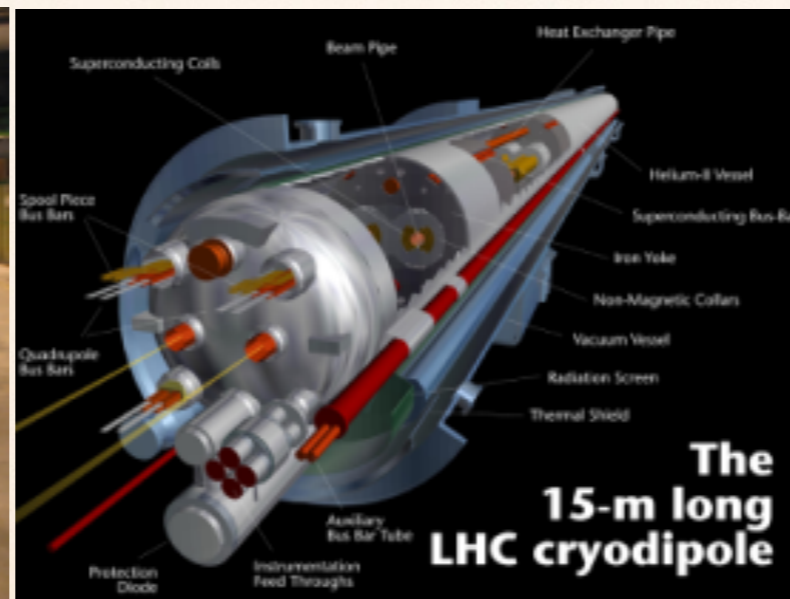
- ❖ Модерне машине су **комбинација** више технологија



Велики хадронски сударач (Large Hadron Collider - LHC)



Филм

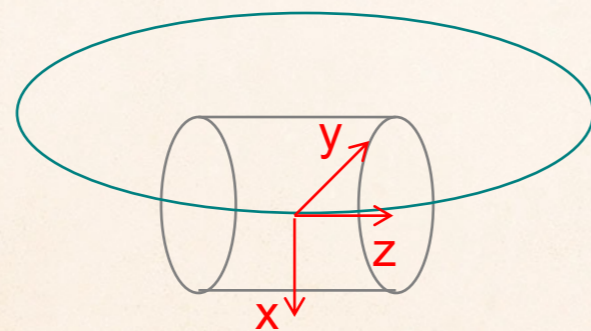
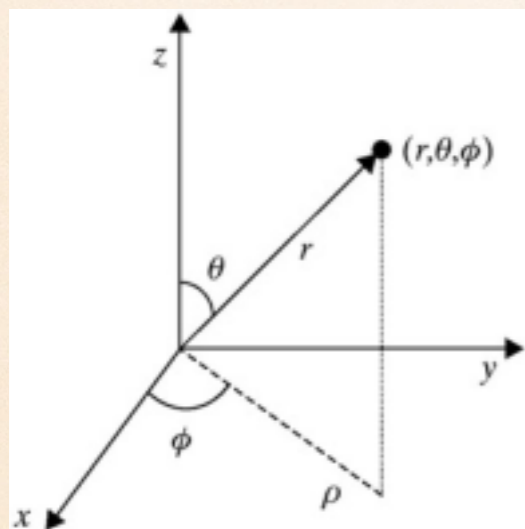
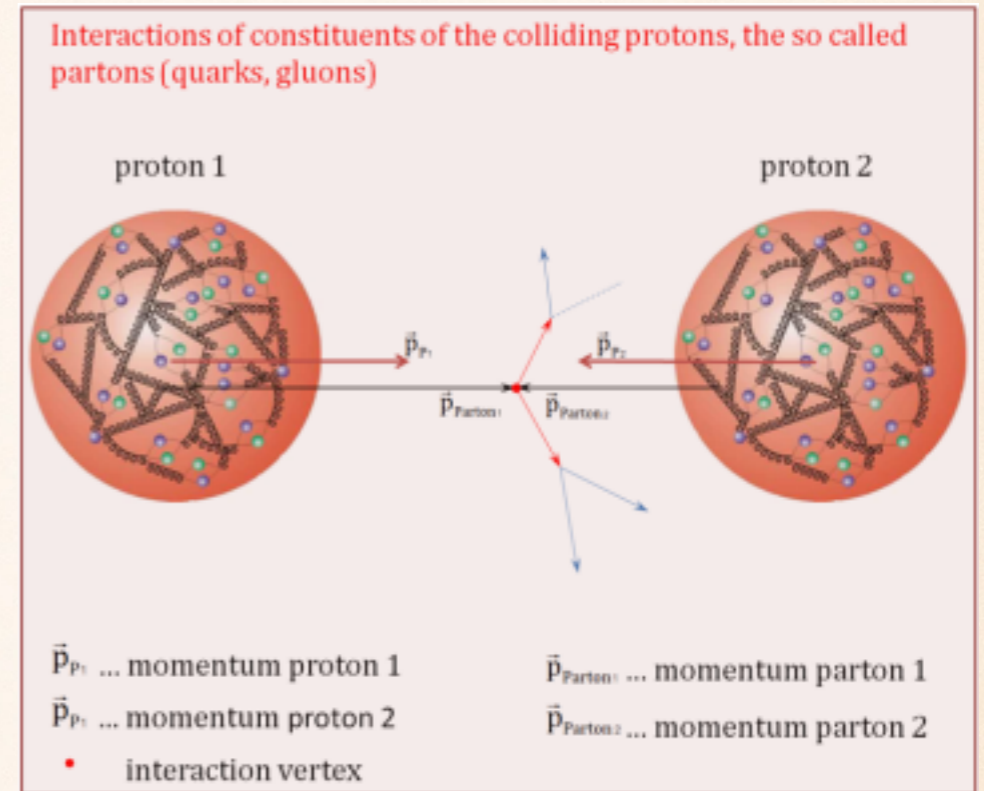


Велики хадронски сударач (Large Hadron Collider - LHC)



Хадронски колајдери и детекција честица

- У судару учествују сложене честице, протони (uud)
- 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	пресек у pb
c=1	(1 barn = 10 ⁻²⁴ cm ²)
Енергија, маса, импулс у GeV	Луминозност 1/fb

Укупни број честица
=Луминозност *Пресек

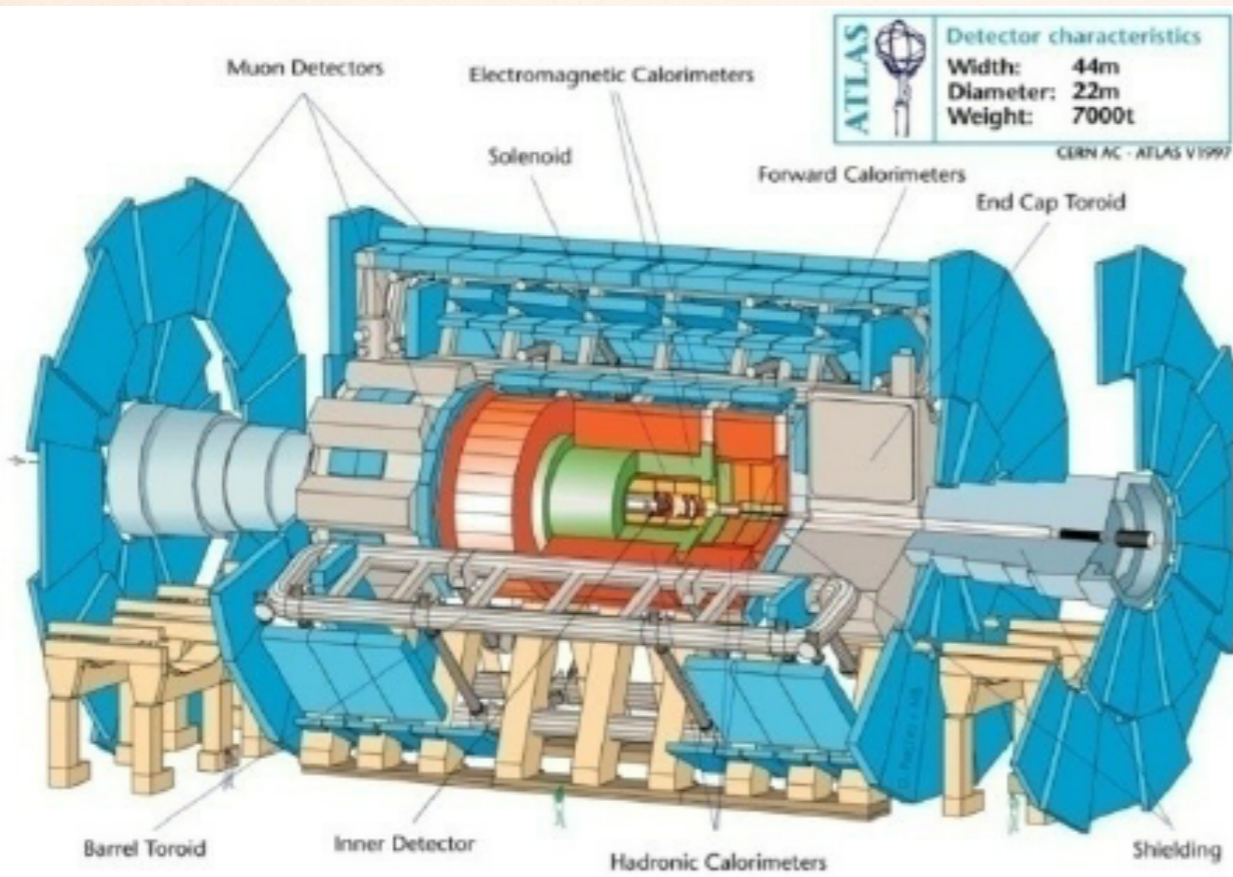
Хадронски колајдери и детекција честица

- ❖ 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)

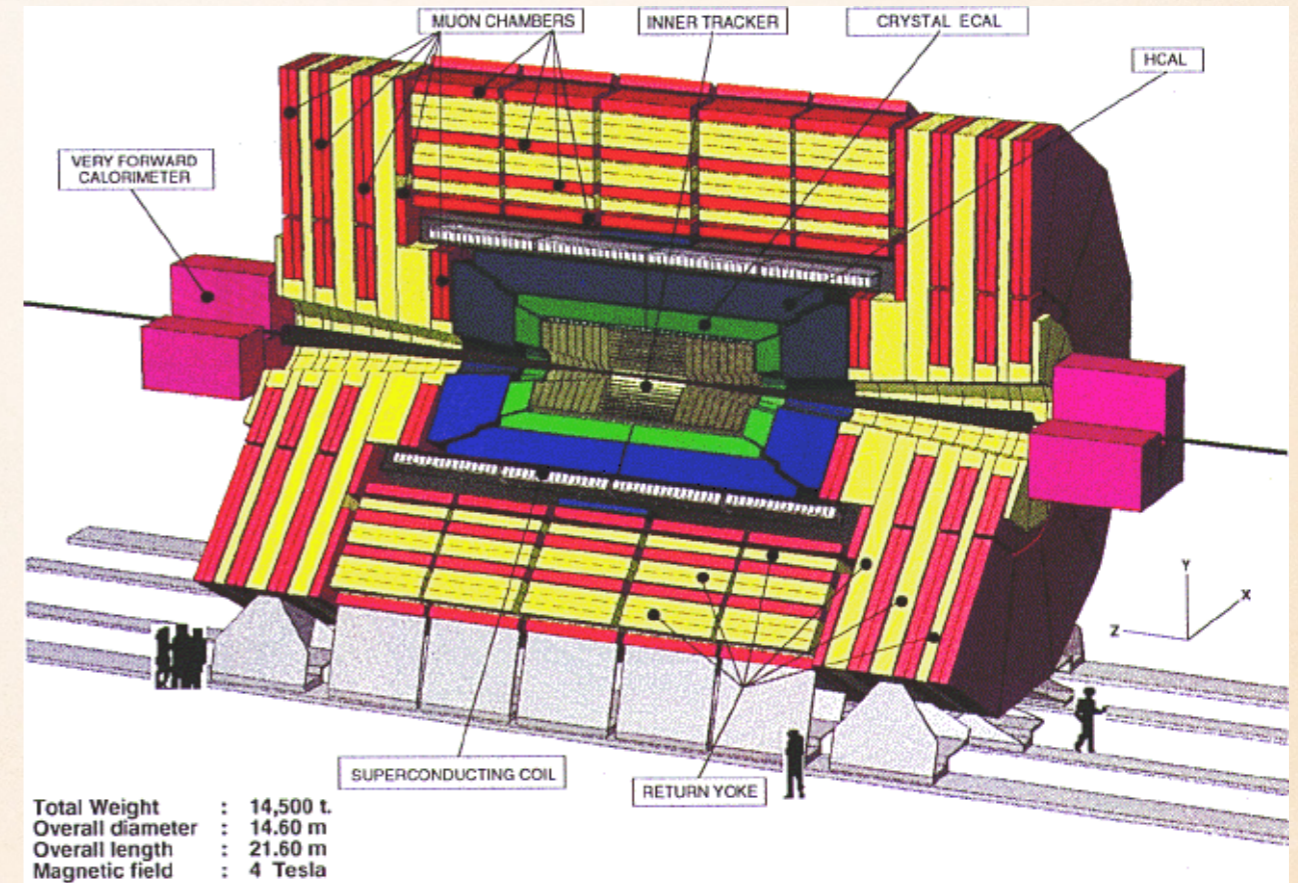
Детектори

- ❖ Модерни детектори су комплексне машине
- ❖ Више детаља - после ручка

ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus

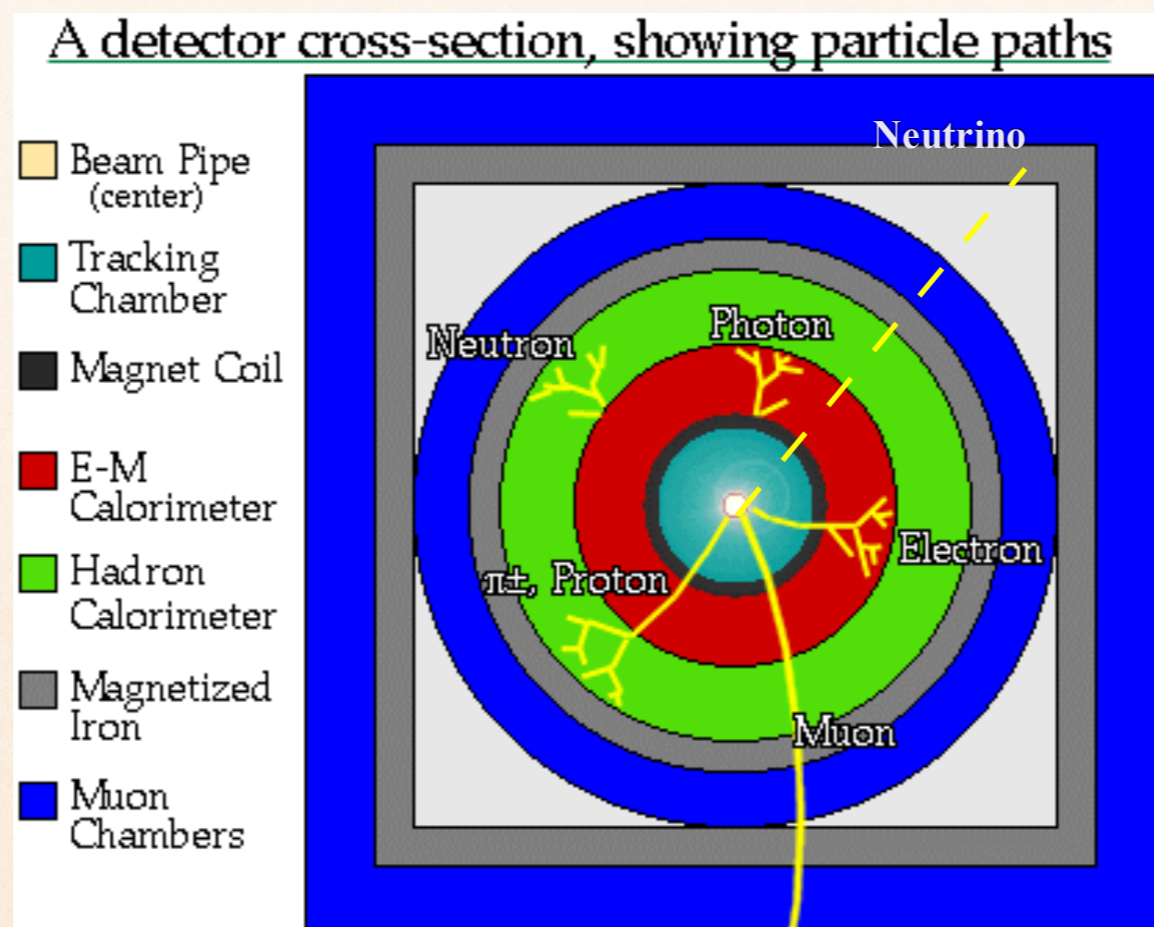


CMS: Compact Muon Solenoid

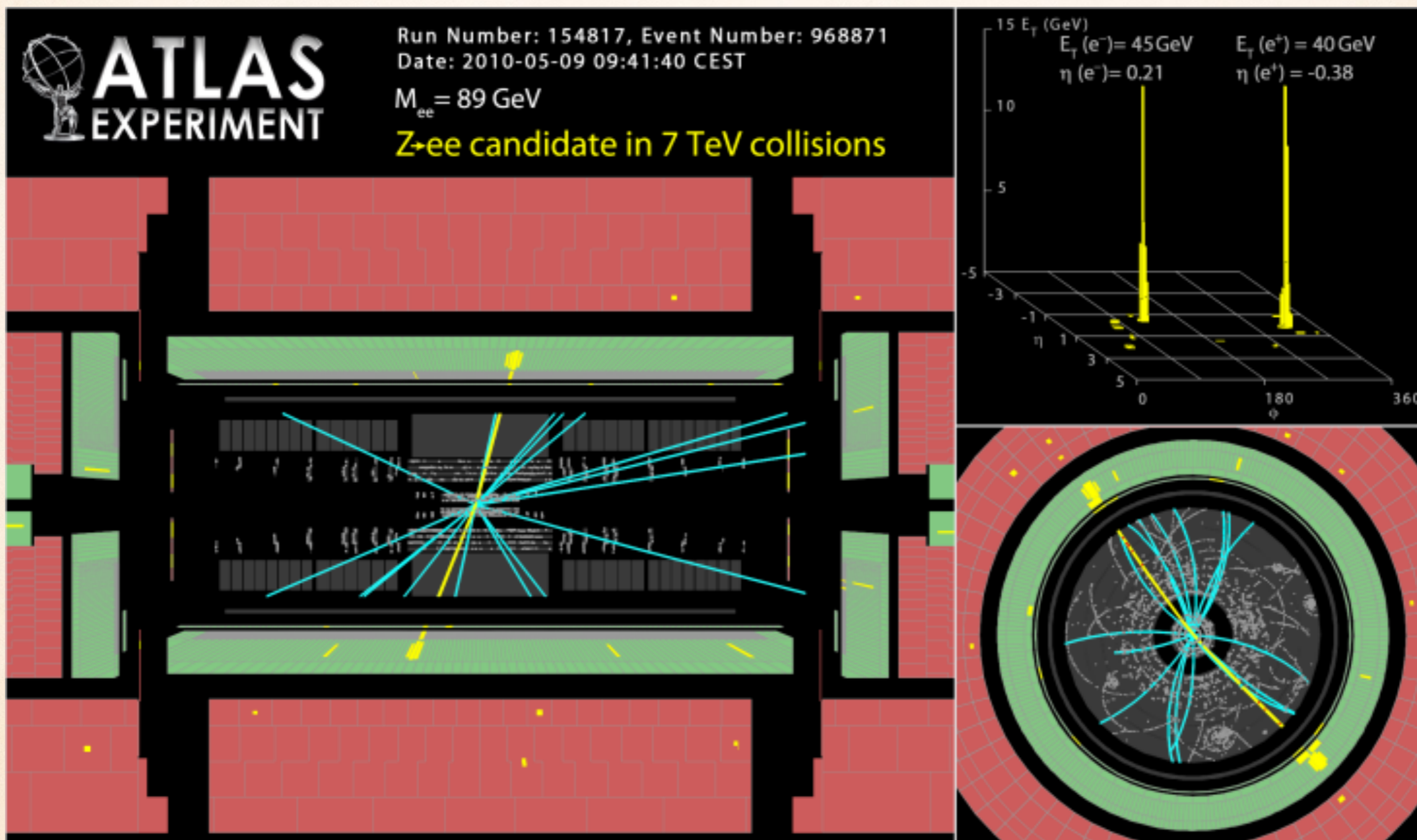


Детектори

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

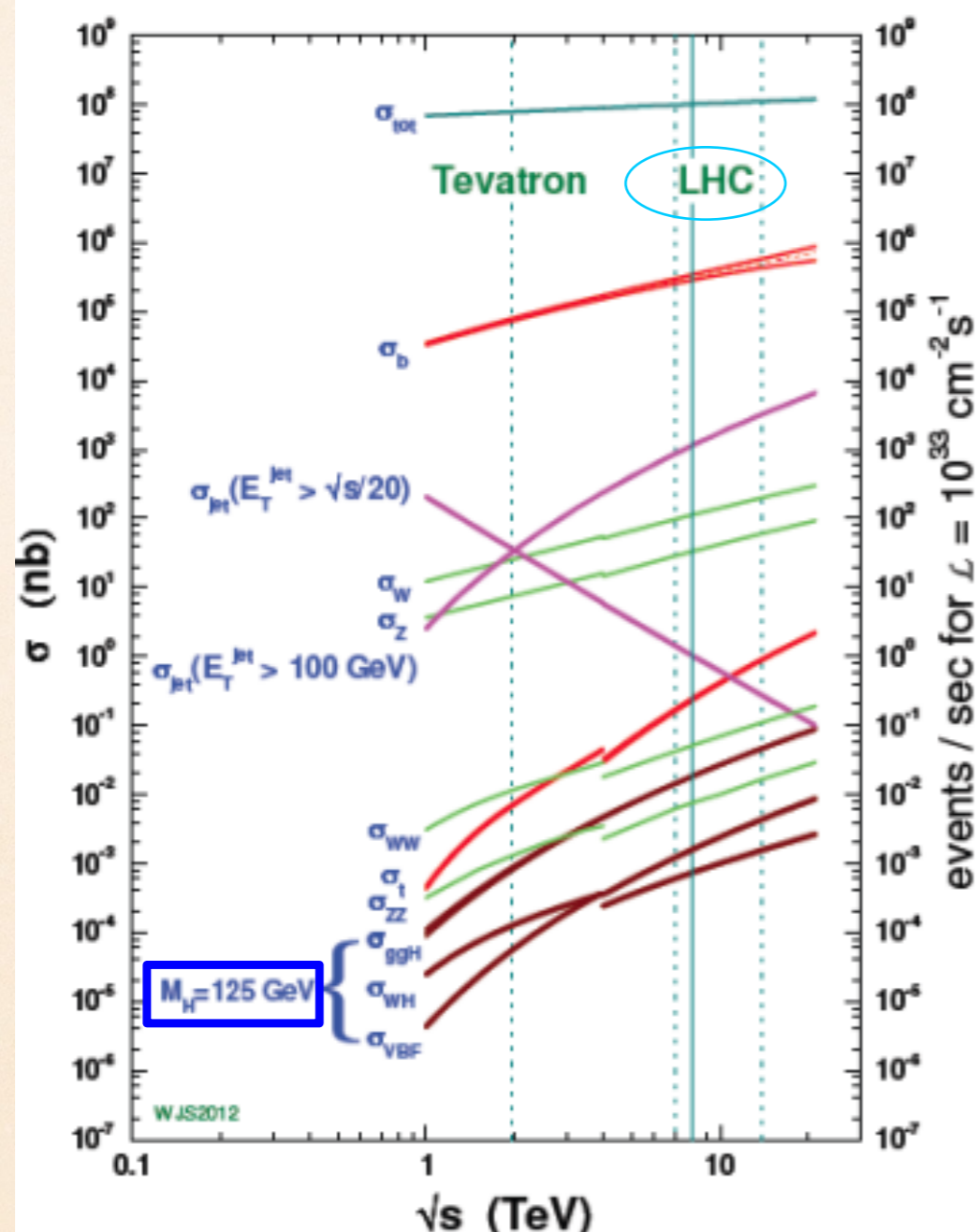


Реконструкција догађаја - више о томе после ручка



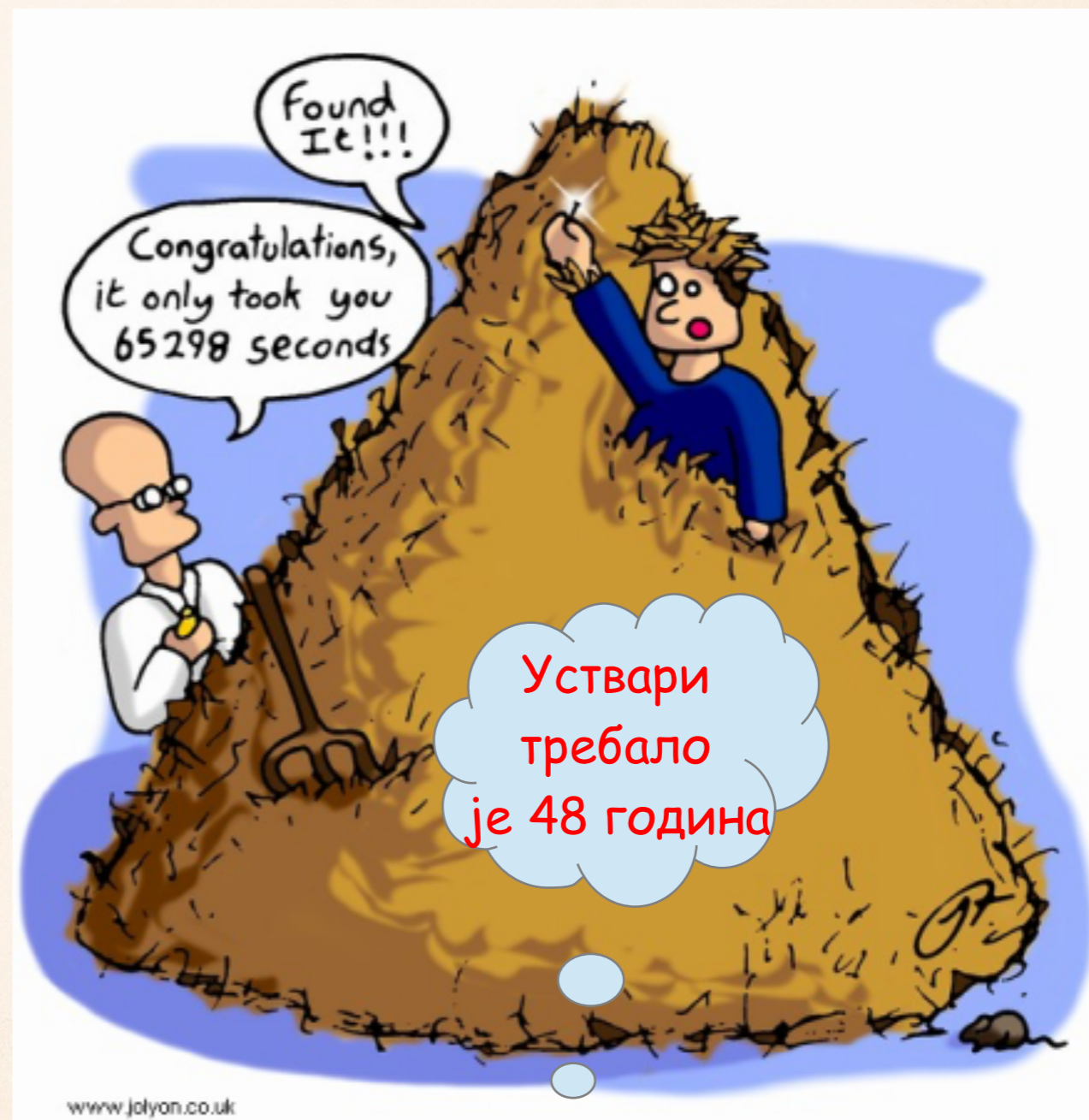
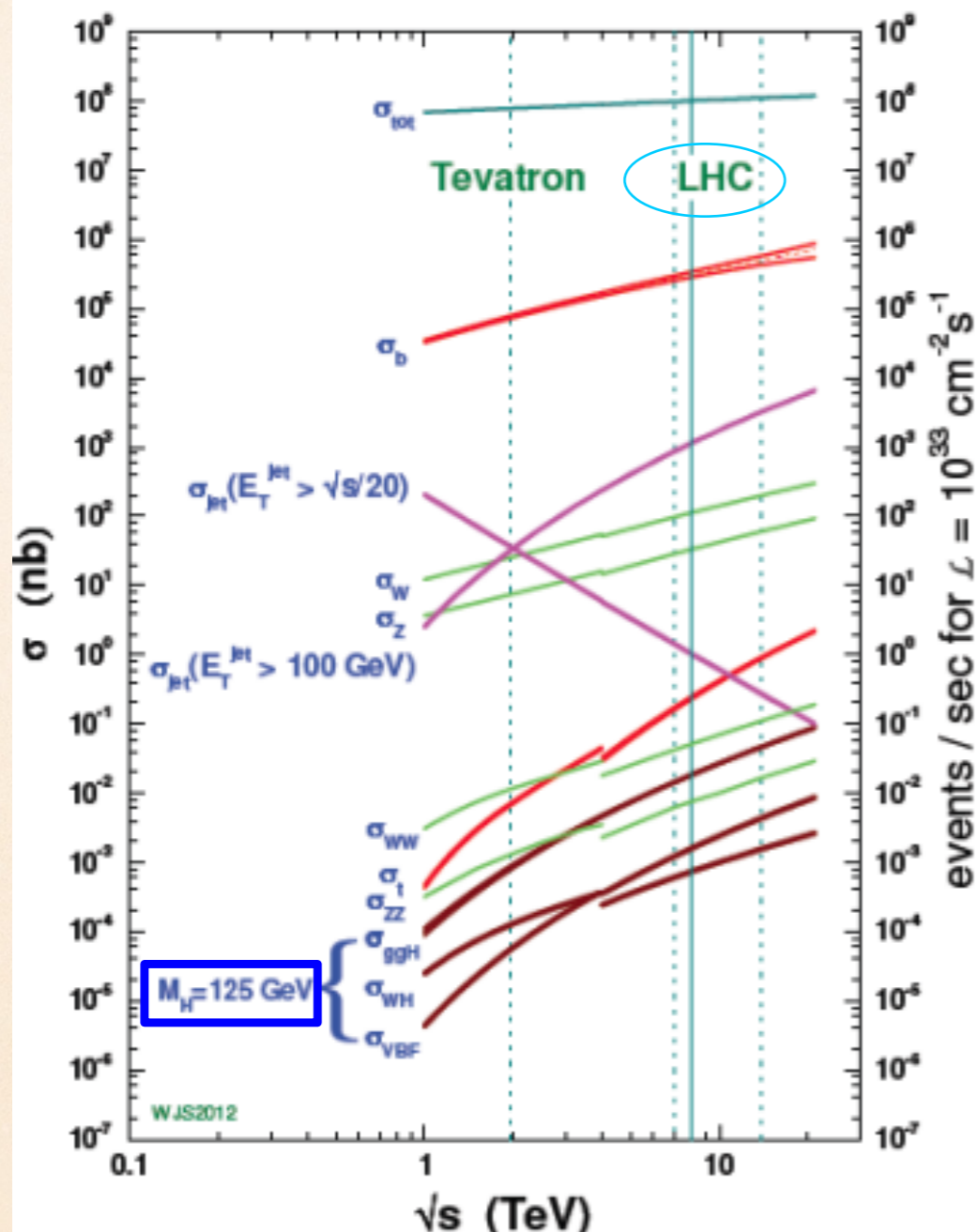
Како тражимо интресантне догађаје

Пресек proton - (anti)proton cross sections



Како тражимо интресантне догађаје

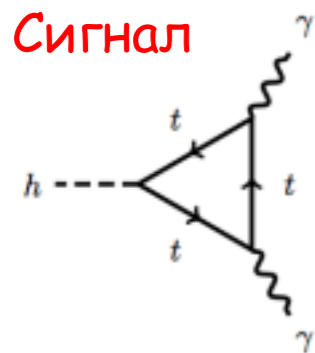
Пресек proton - (anti)proton cross sections



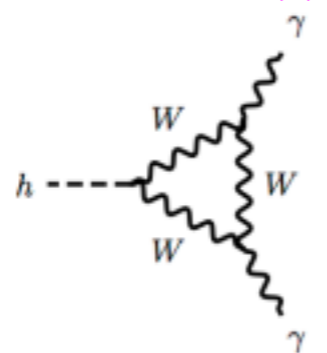
Сигнални и позадински процеси

- ❖ **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

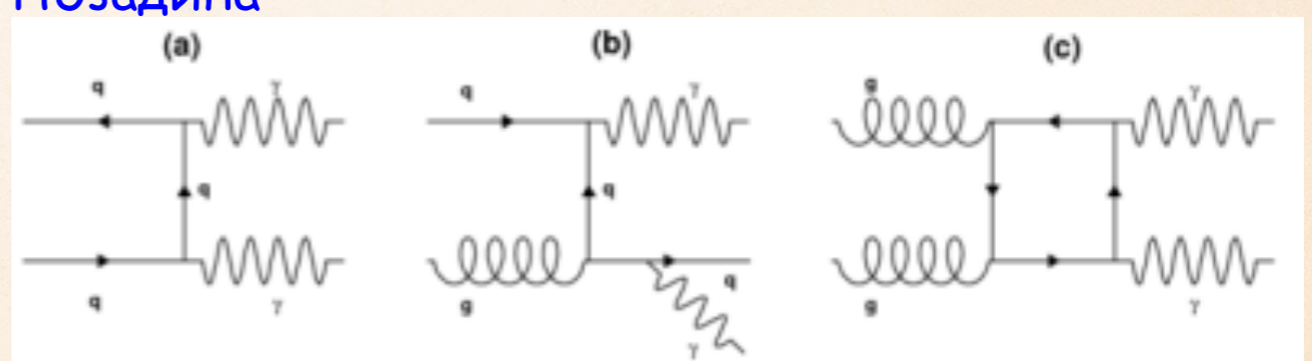
Сигнал



$H \rightarrow \gamma\gamma$



Позадина



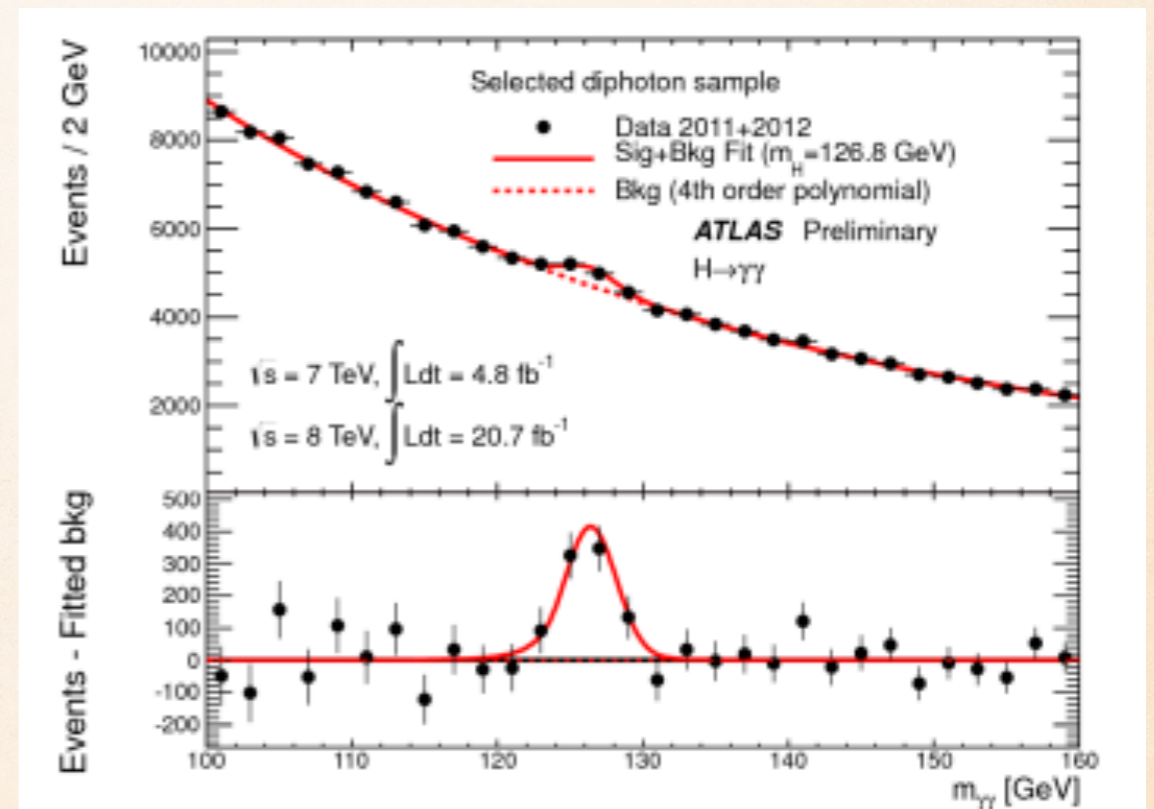
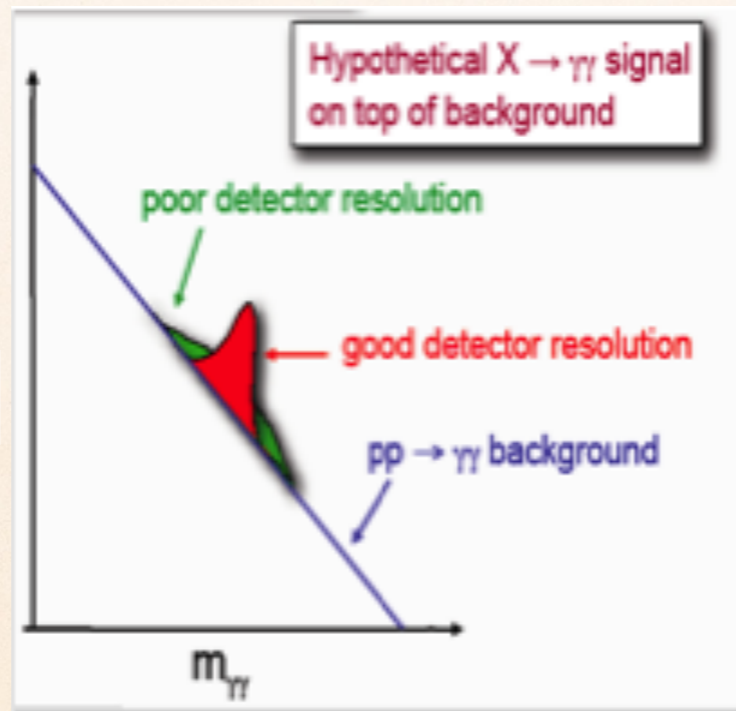


- ❖ Сигнал карактеришу два добро дефинисана фотона која долазе од резонантне честице
 - Може да се реконструише маса резонантне честице
- ❖ Позадина има опадајући спектар масе два фотона

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

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

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

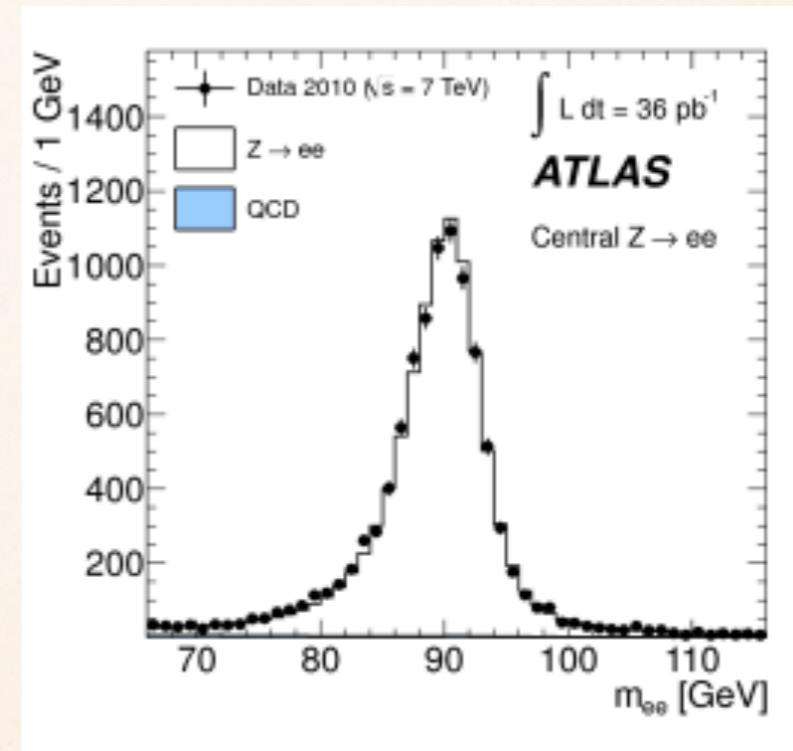
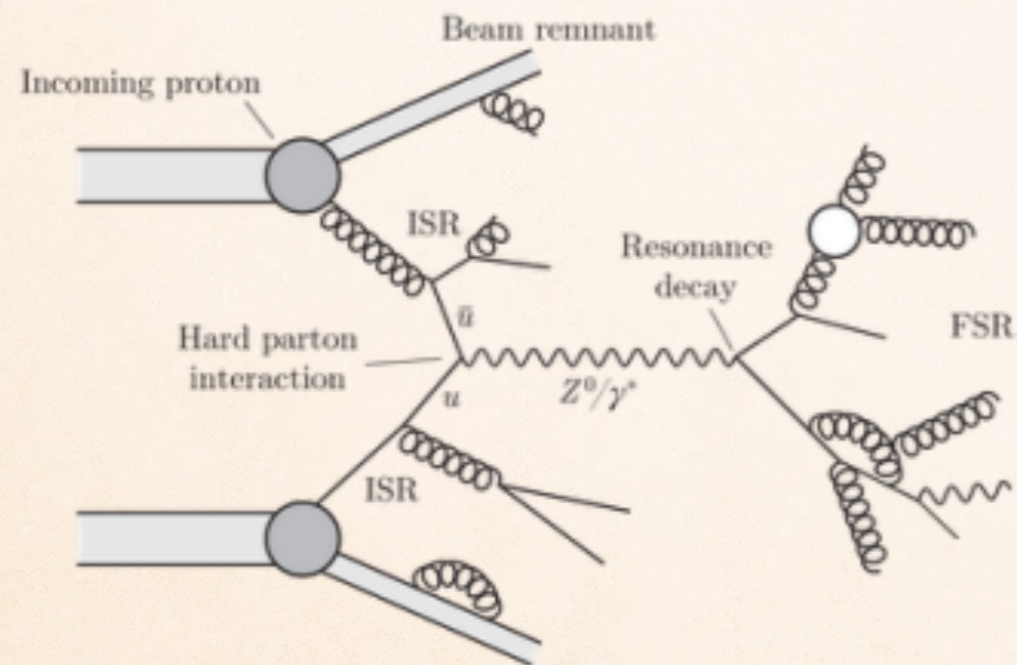


Шта меримо?

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)

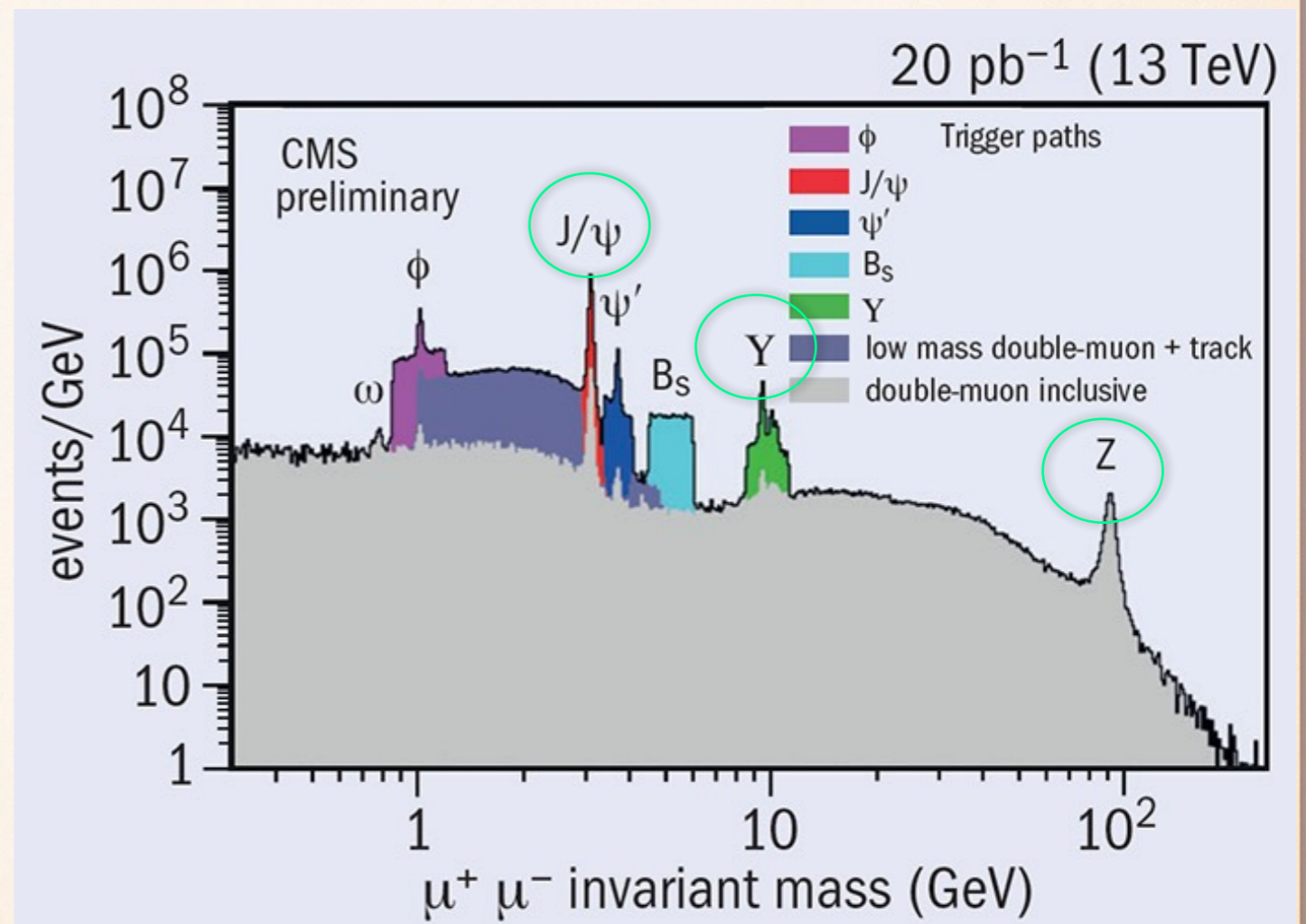
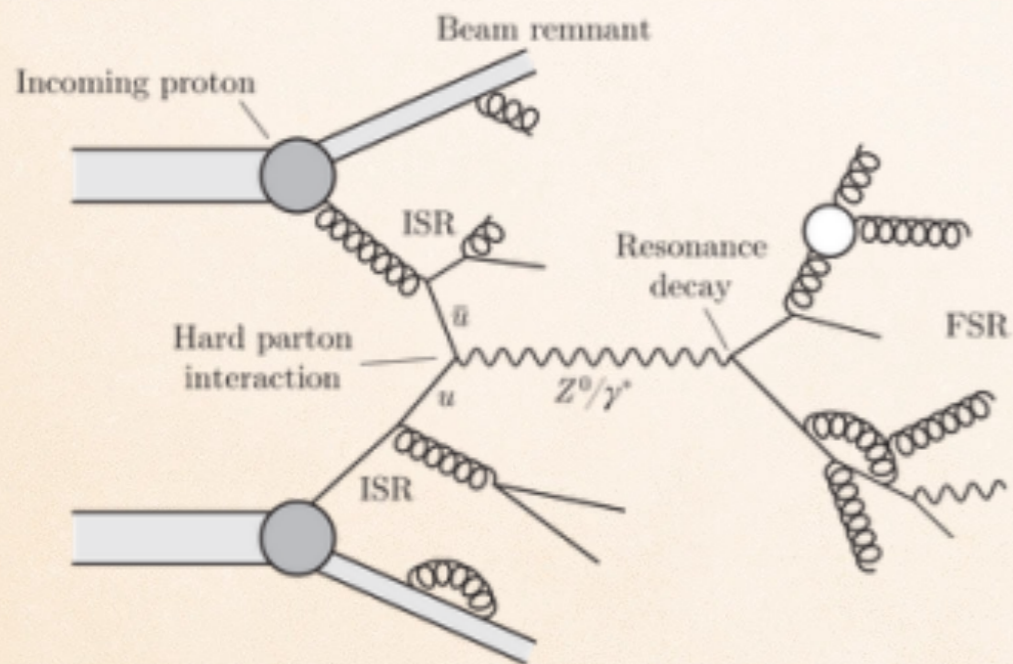
$$m^2(Z) = E^2(Z) - \vec{p}^2(Z) = [E(e_1) + E(e_2)]^2 - [\vec{p}(e_1) + \vec{p}(e_2)]^2$$

Шта меримо?

❖ Шармонијум J/ψ , везано стање с кваркова, $m=3.1 \text{ GeV}$

❖ Ипсилон, везано стање b кваркова, $m=9.5 \text{ GeV}$

❖ Z бозон, $m=91 \text{ GeV}$

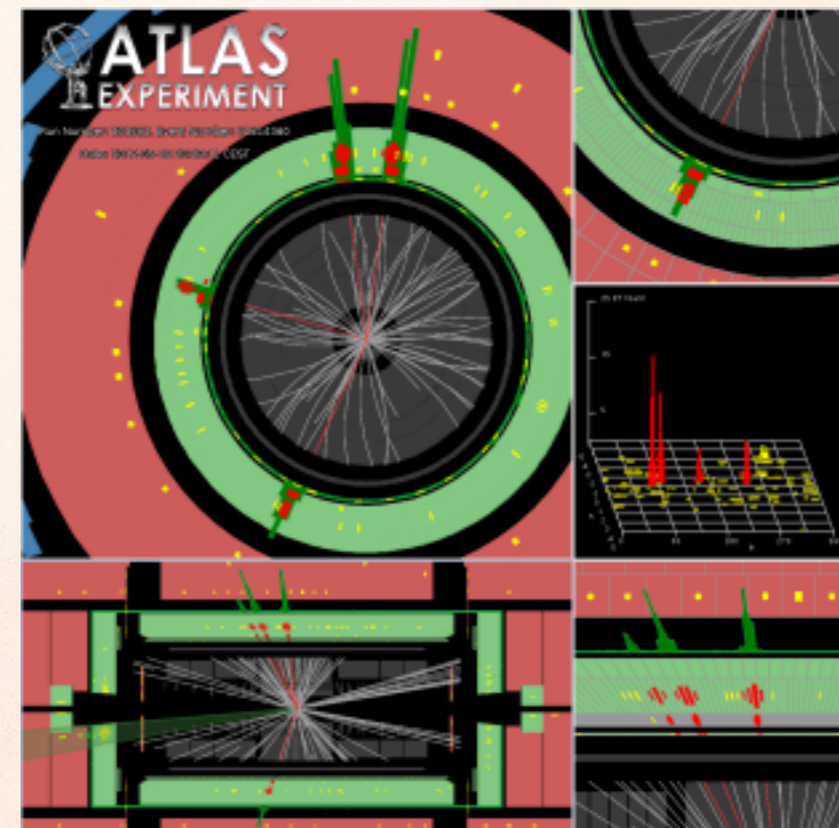
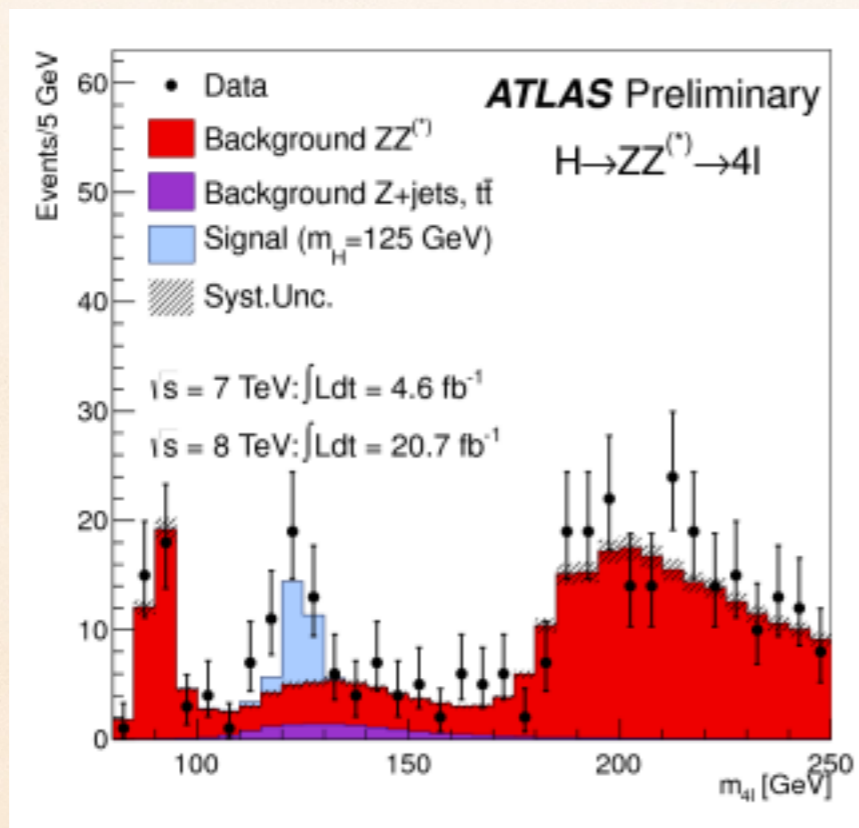
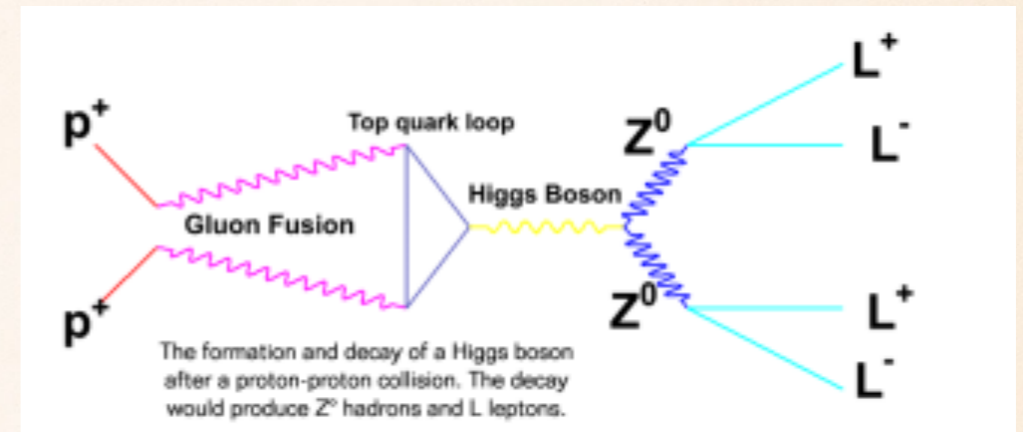


❖ Уствари, добићемо цео спектар честица са два лептона у коначном стању

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

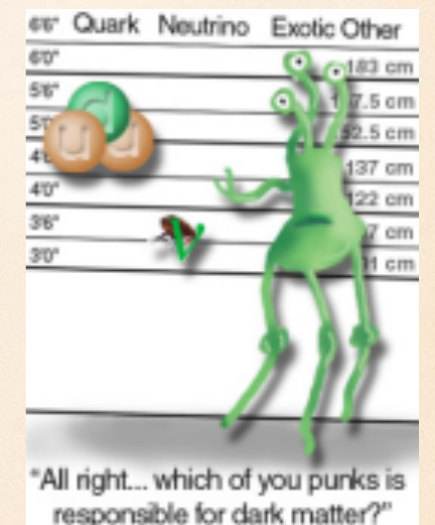
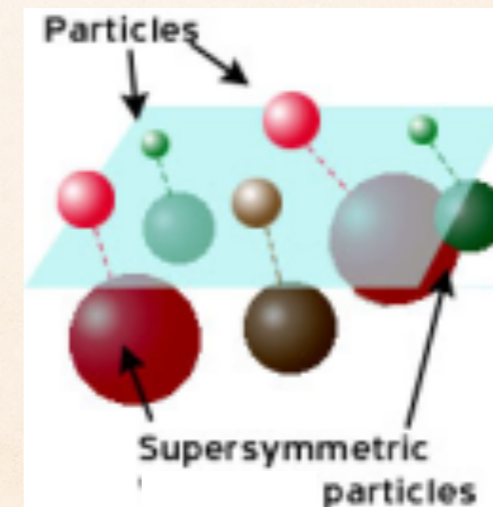
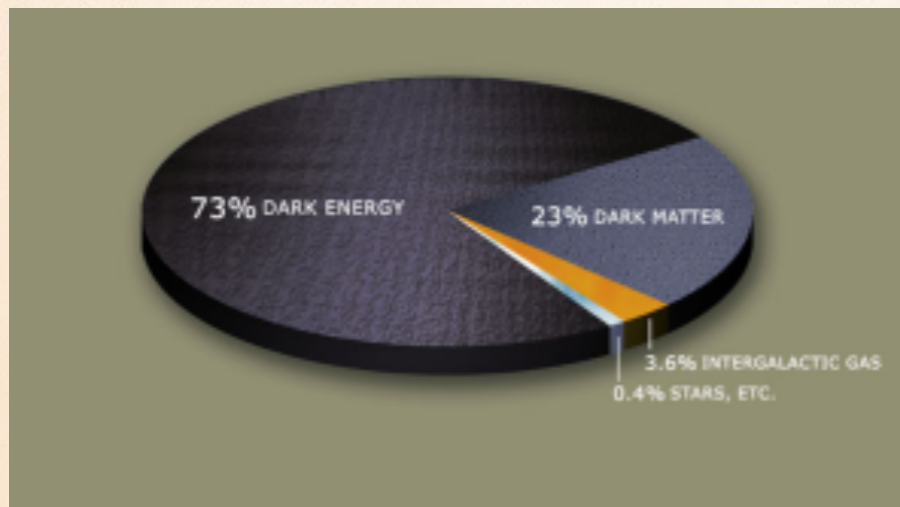
Хигсов бозон, $H \rightarrow ZZ$

- ❖ 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



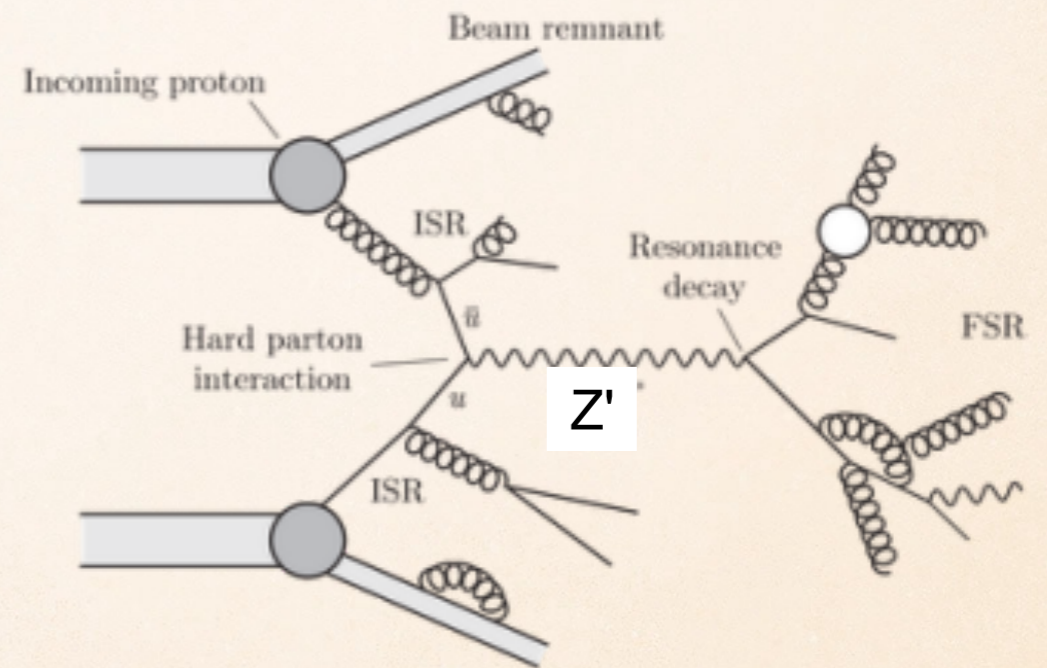
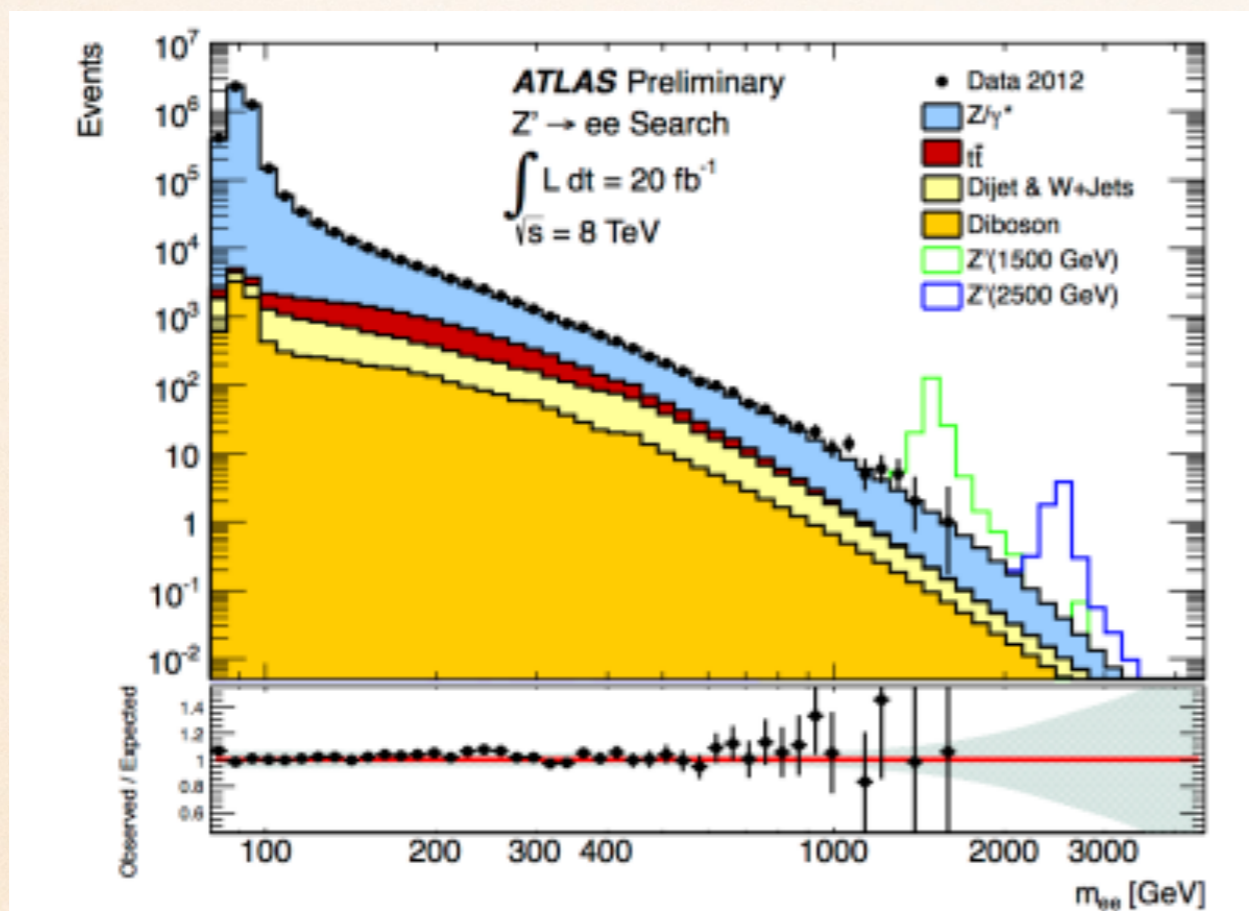
Физика изван стандардног модела

- ❖ 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 15 април 2022



<http://www.physicsmasterclasses.org>



<https://teacher-programmes.web.cern.ch>

CERN Teachers Programs

Студентски програми

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

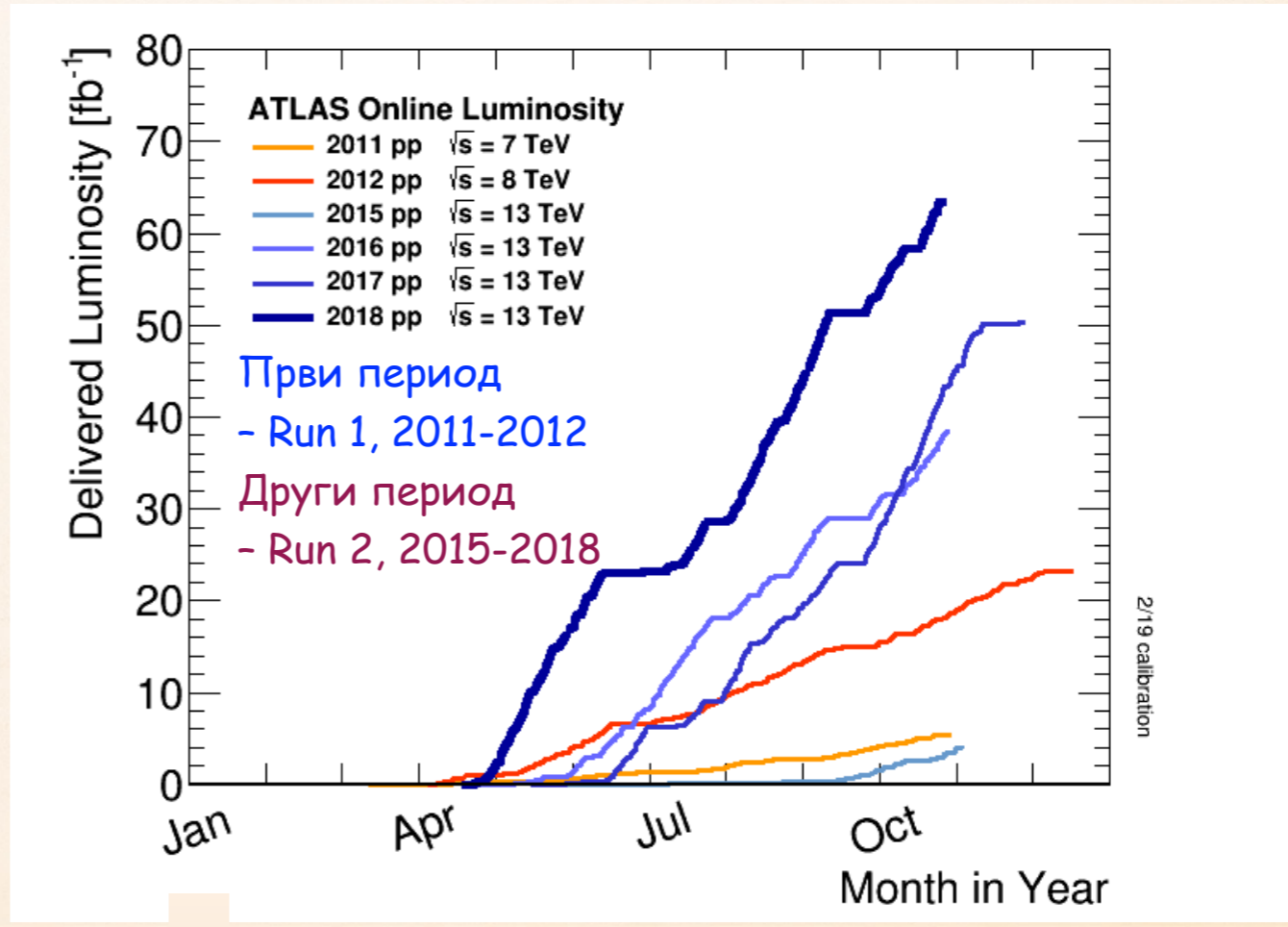
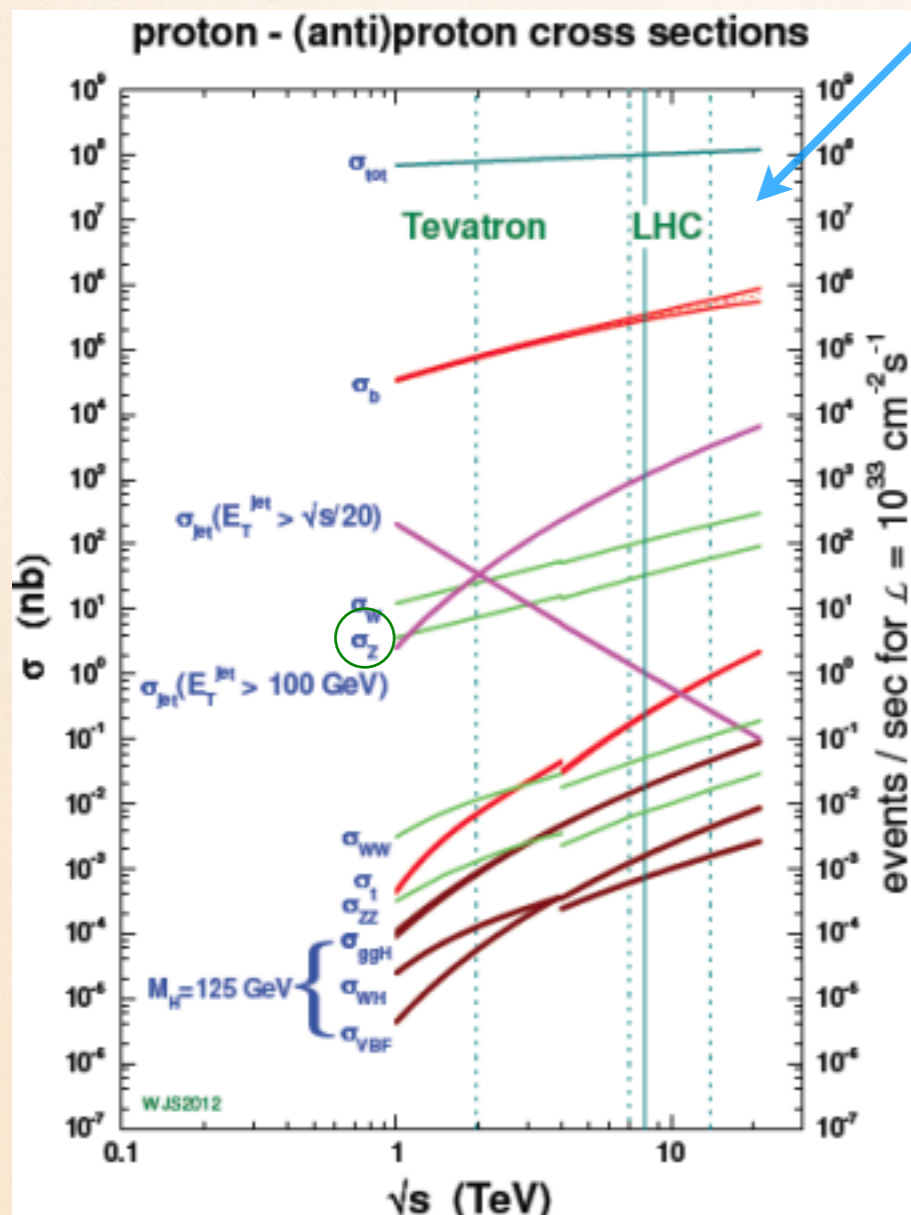
Подршка

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

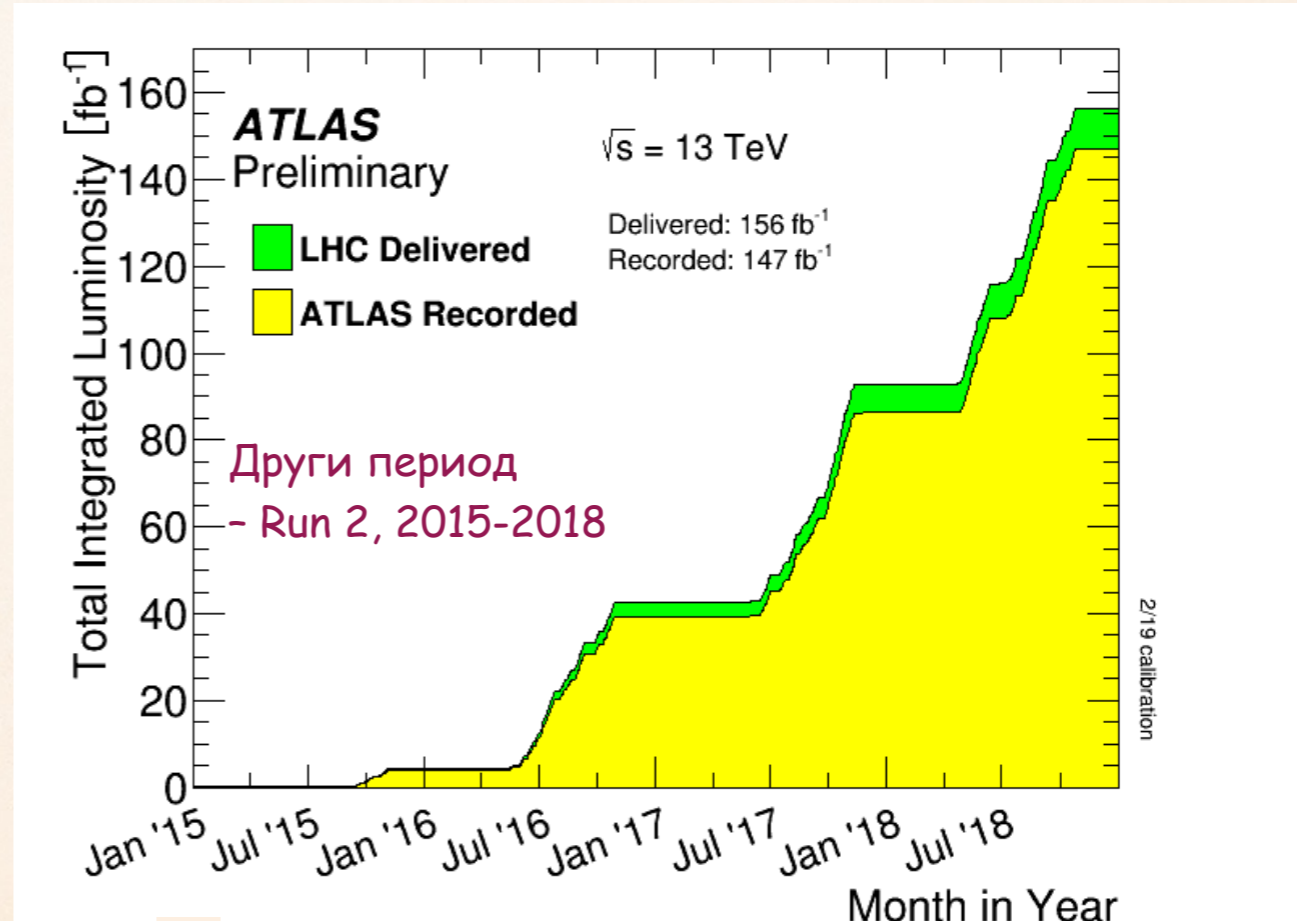
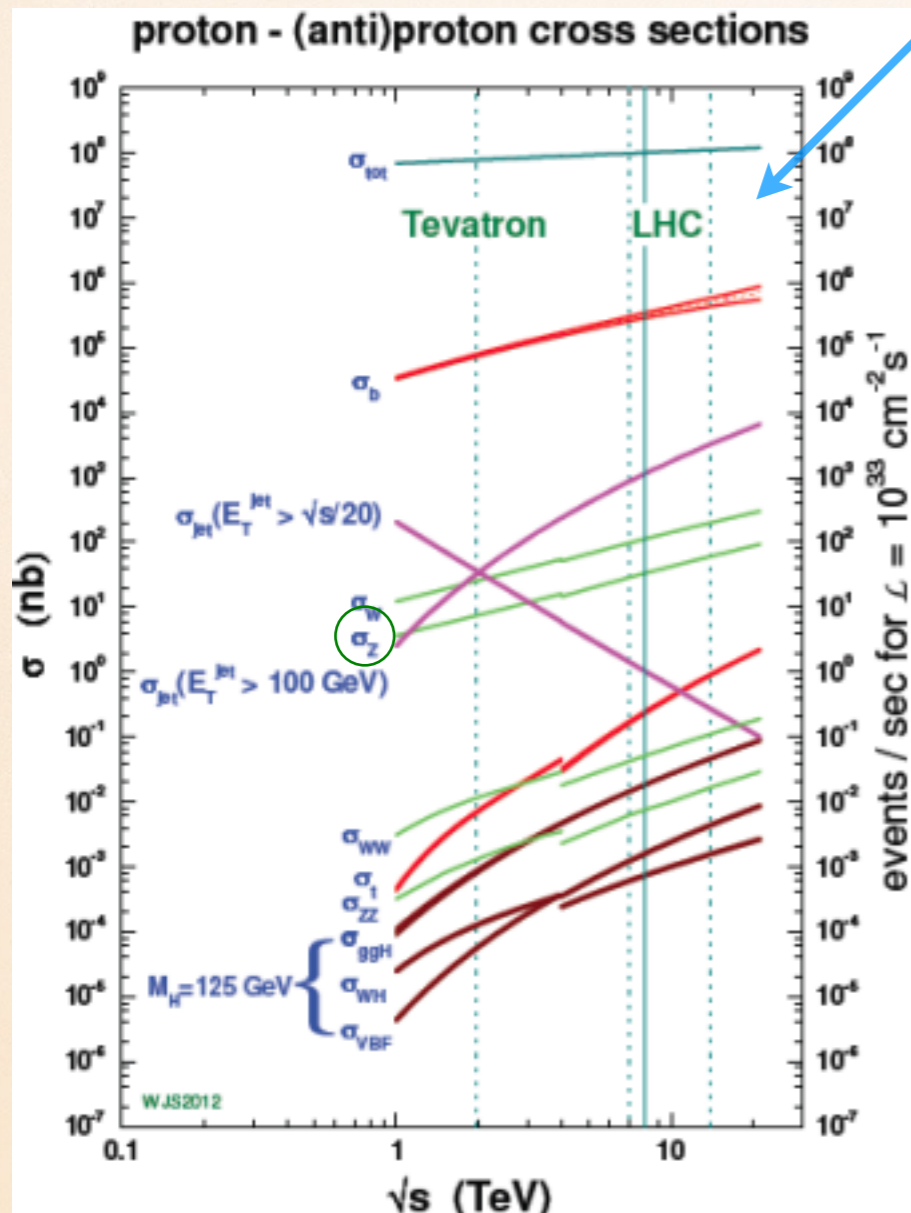


Укупан број догађаја

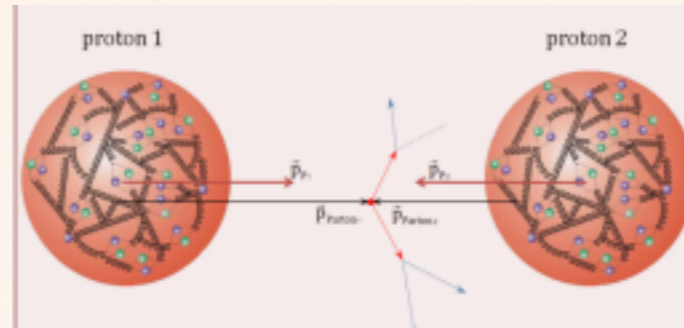
❖ Укупан број честица (N) = пресек (σ) * луминозност (L)

❖ Пресек зависи од енергије снопа

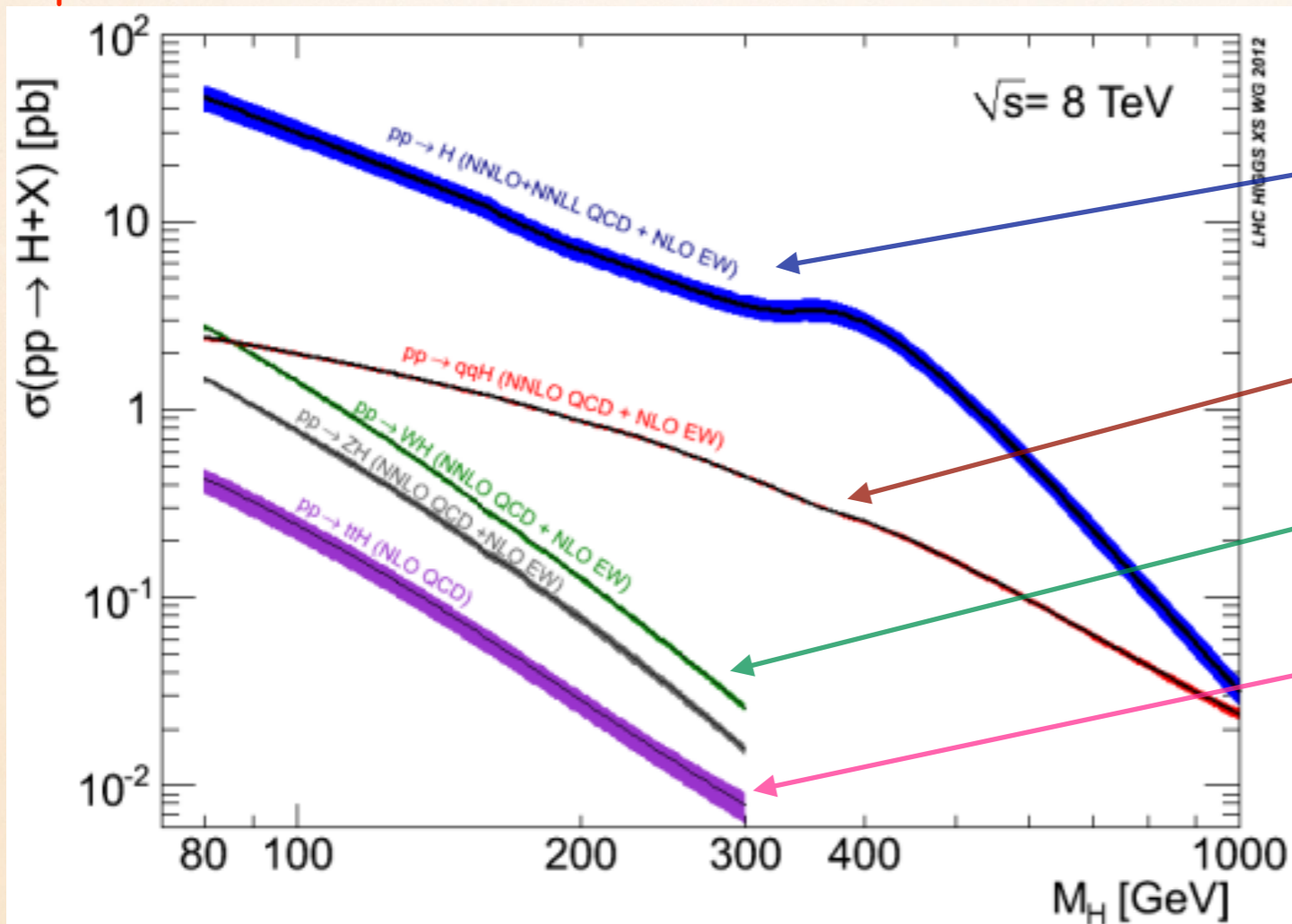
❖ Око 50 милиона Z бозона који се распадају на електроне или мионе регистровано је на АТЛАСу и на ЦМСу у 2012



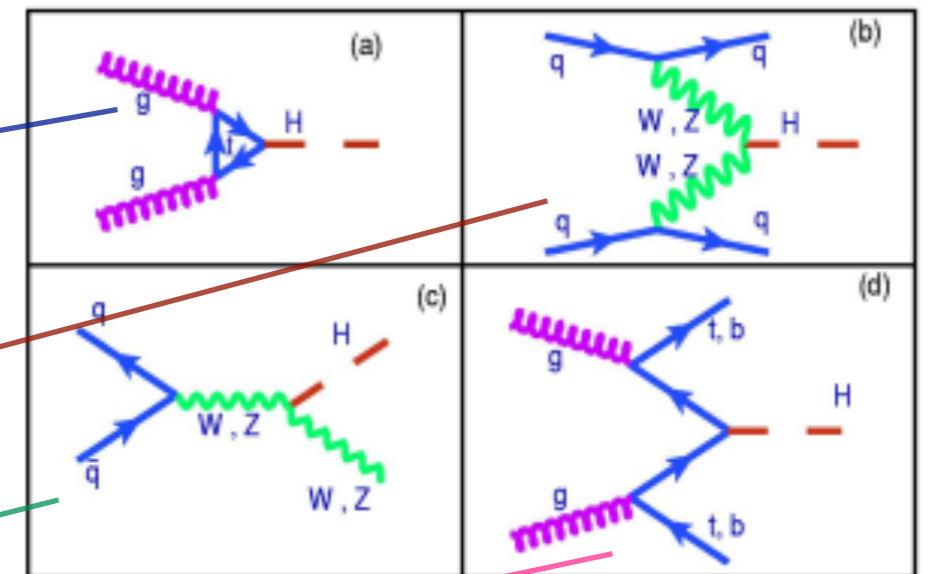
Продукција...



Пресек

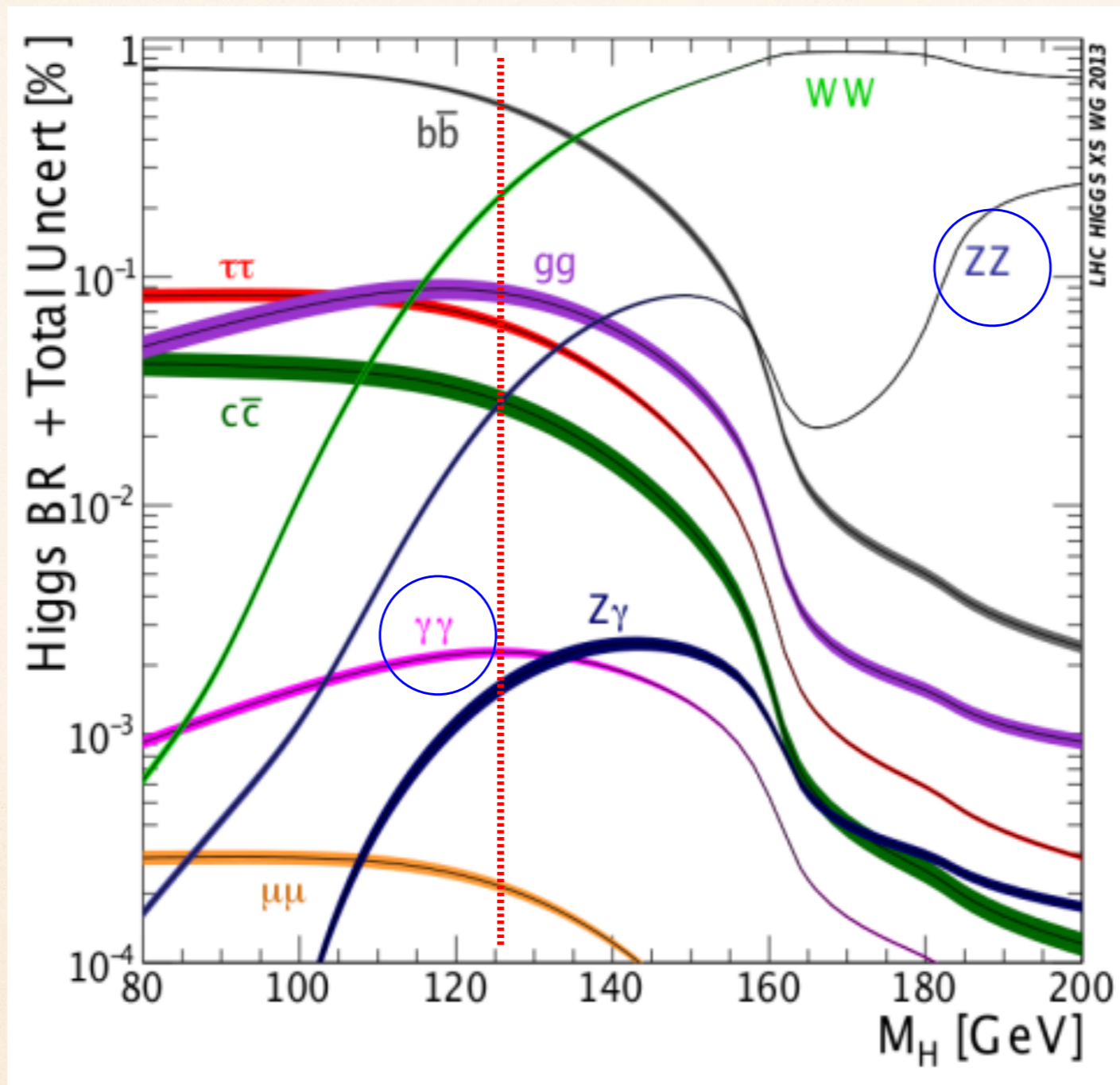


Маса



... и распад Хиггсовога бозона

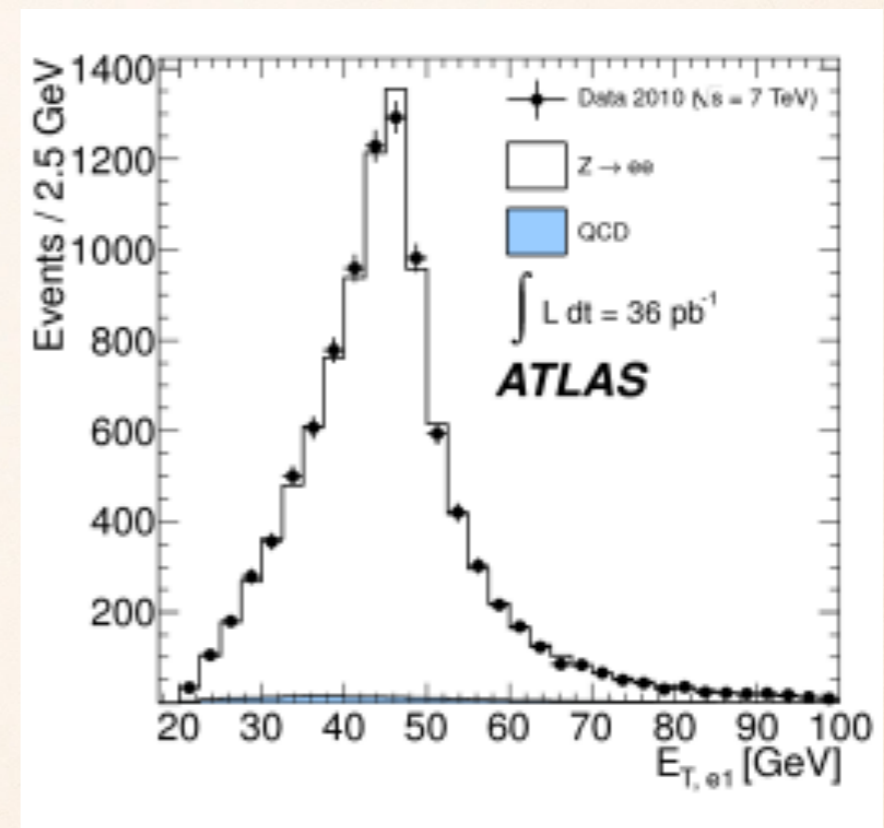
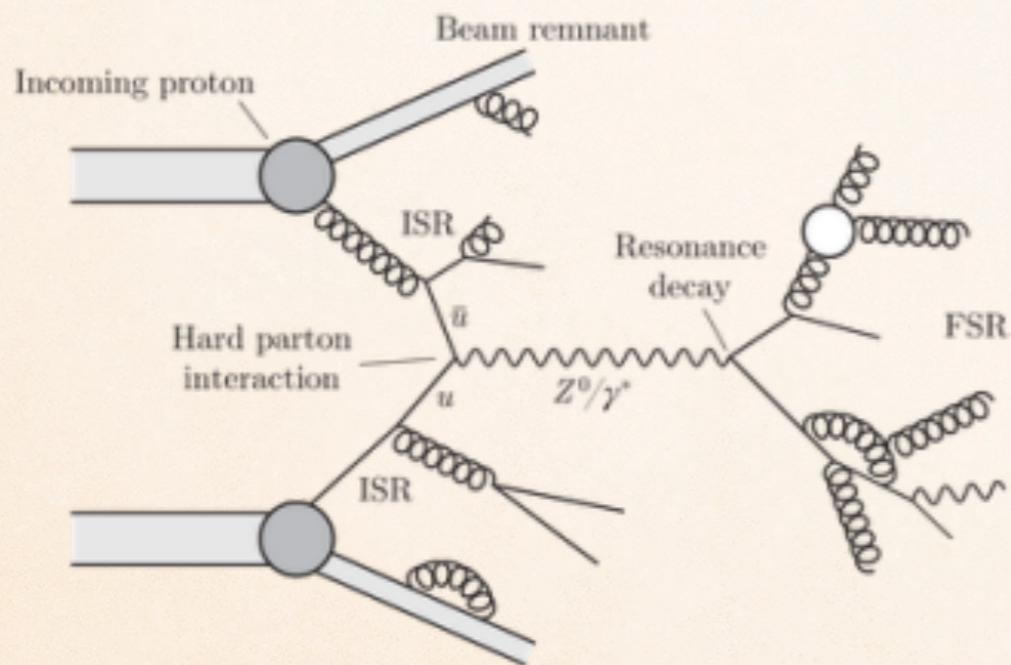
Вероватноћа
за распад



Маса

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

