

Цернов јавни час - Мастерклас  
Србија, 21. март 2024.

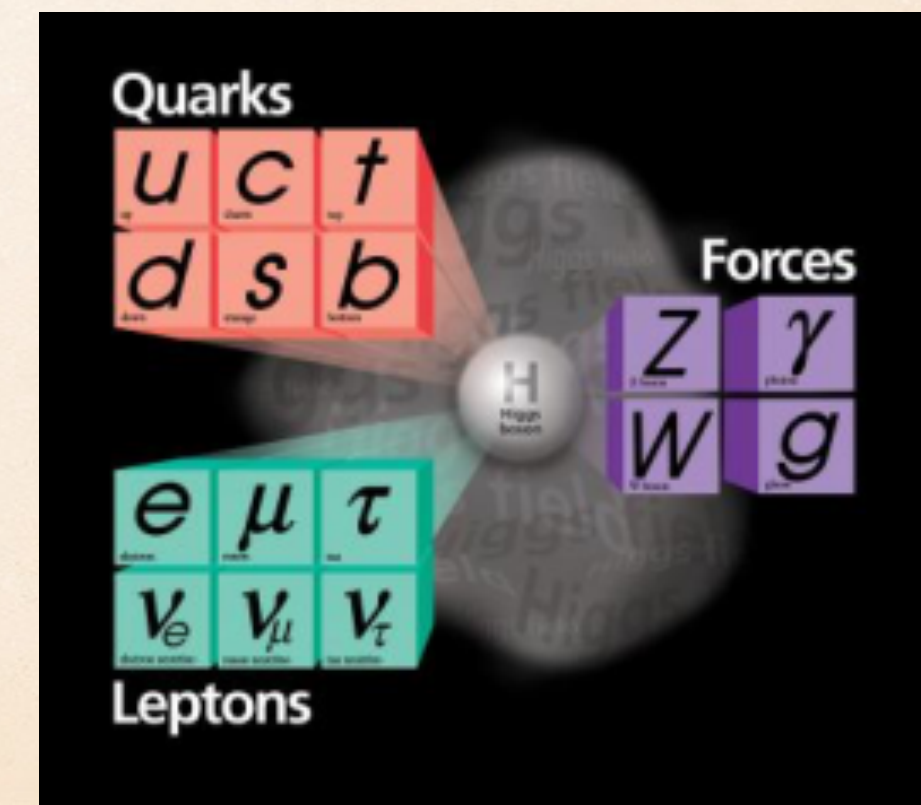
# ФИЗИКА ЧЕСТИЦА СА НАГЛАСКОМ НА ЕКСПЕРИМЕНТЕ ВЕЛИКОГ СУДАРАЧА ХАДРОНА

Лиђија 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

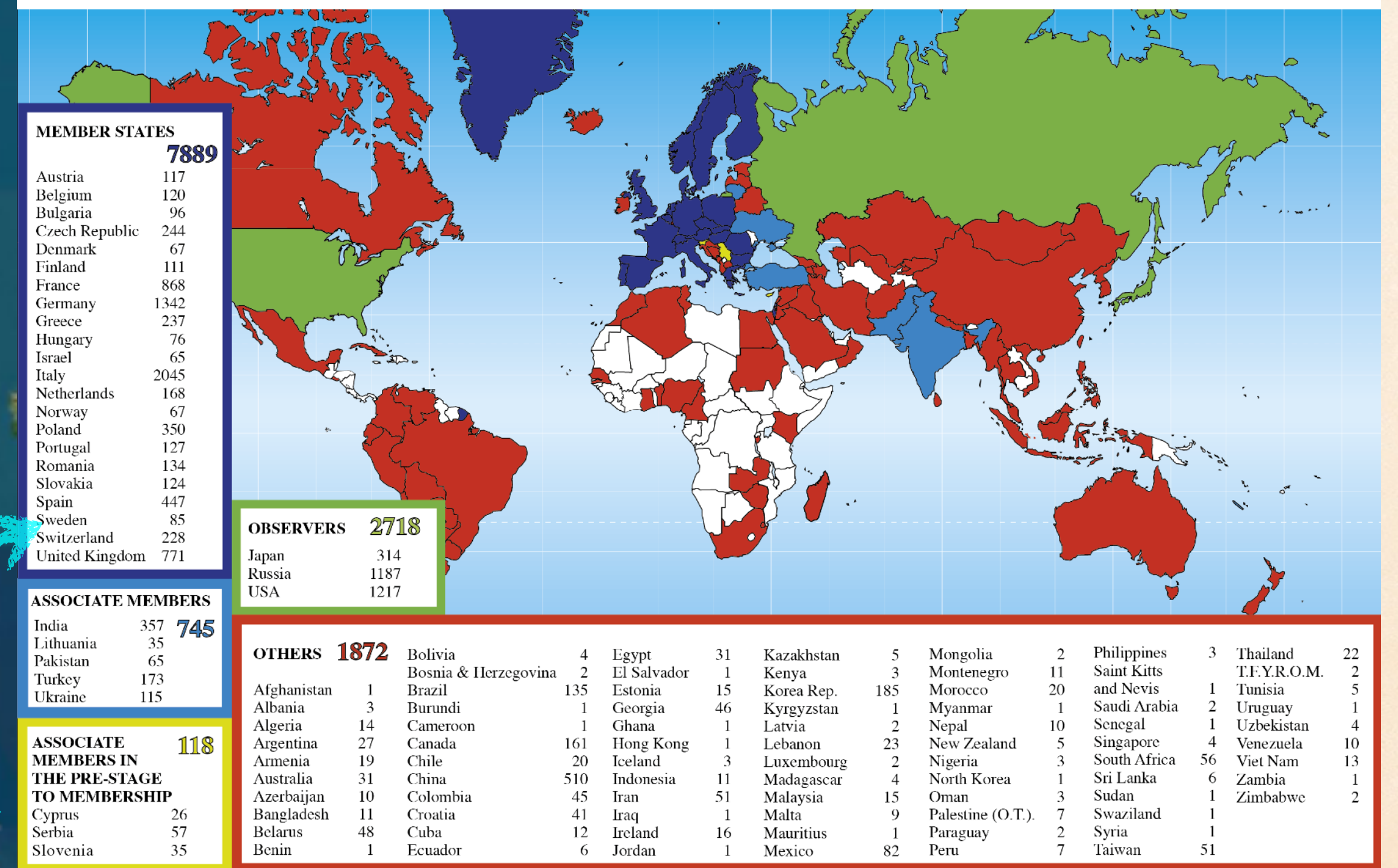
# О Церну

1954  
CERN  
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

24. март 2019:  
Србија → Србија



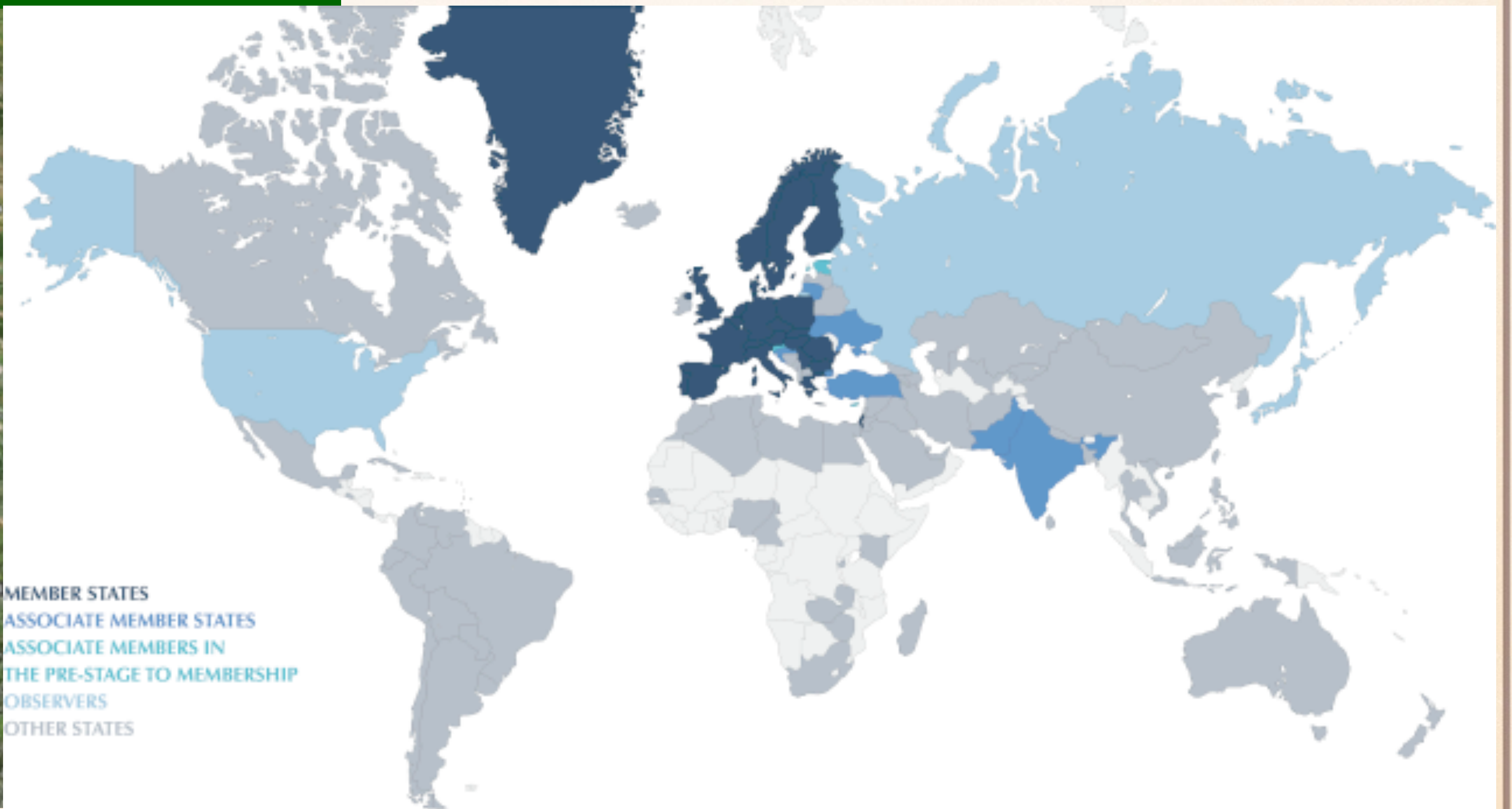
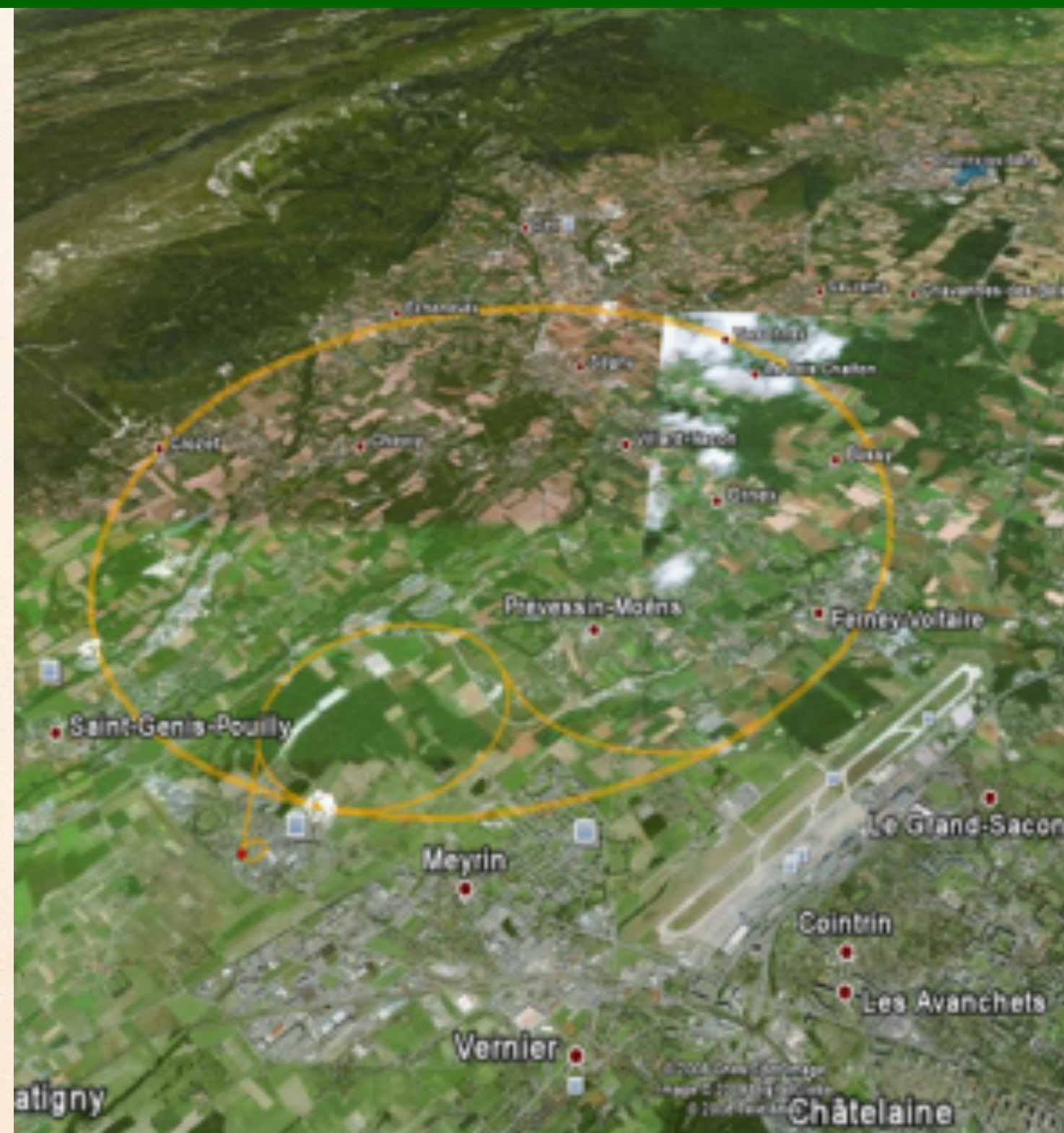
Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018



# О Церну

1954  
CERN  
*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*

24. март 2019:  
Србија → Србија

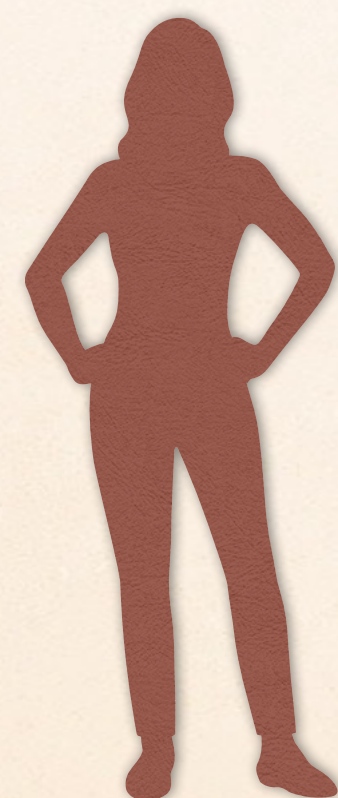


# О Церну

1954  
CERN  
*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*

Шта чланство у Церну  
значи за мене?

Па можеш да будеш  
физичар :)

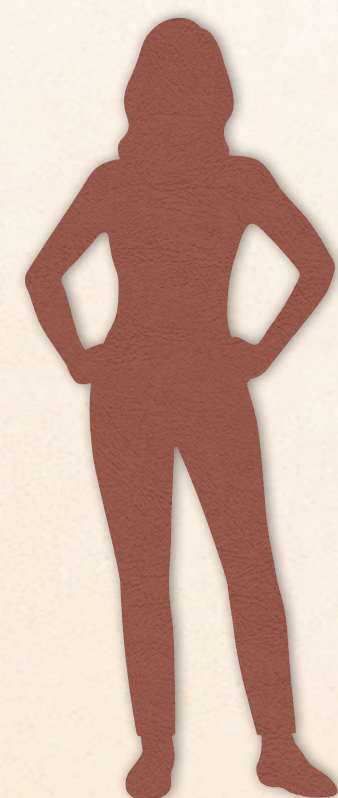


24. март 2019:  
Србија → Србија

# 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!

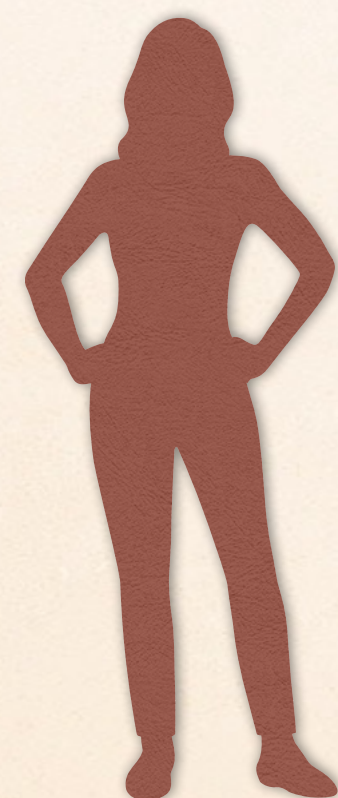


24. март 2019:  
Србија → Србија

# О Церну

1954  
CERN  
*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*

Шта чланство у Церну  
значи за мене?



24. март 2019:  
Србија → Србија

- ❖ 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!



# О Церну

1954  
CERN  
*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*

## Мноштво изузетних достигнућа

### ❖ Наука

- ❖ 1983: W и Z бозони (СПС)
- ❖ 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



# ЦЕРНОВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ПРОГРАМ

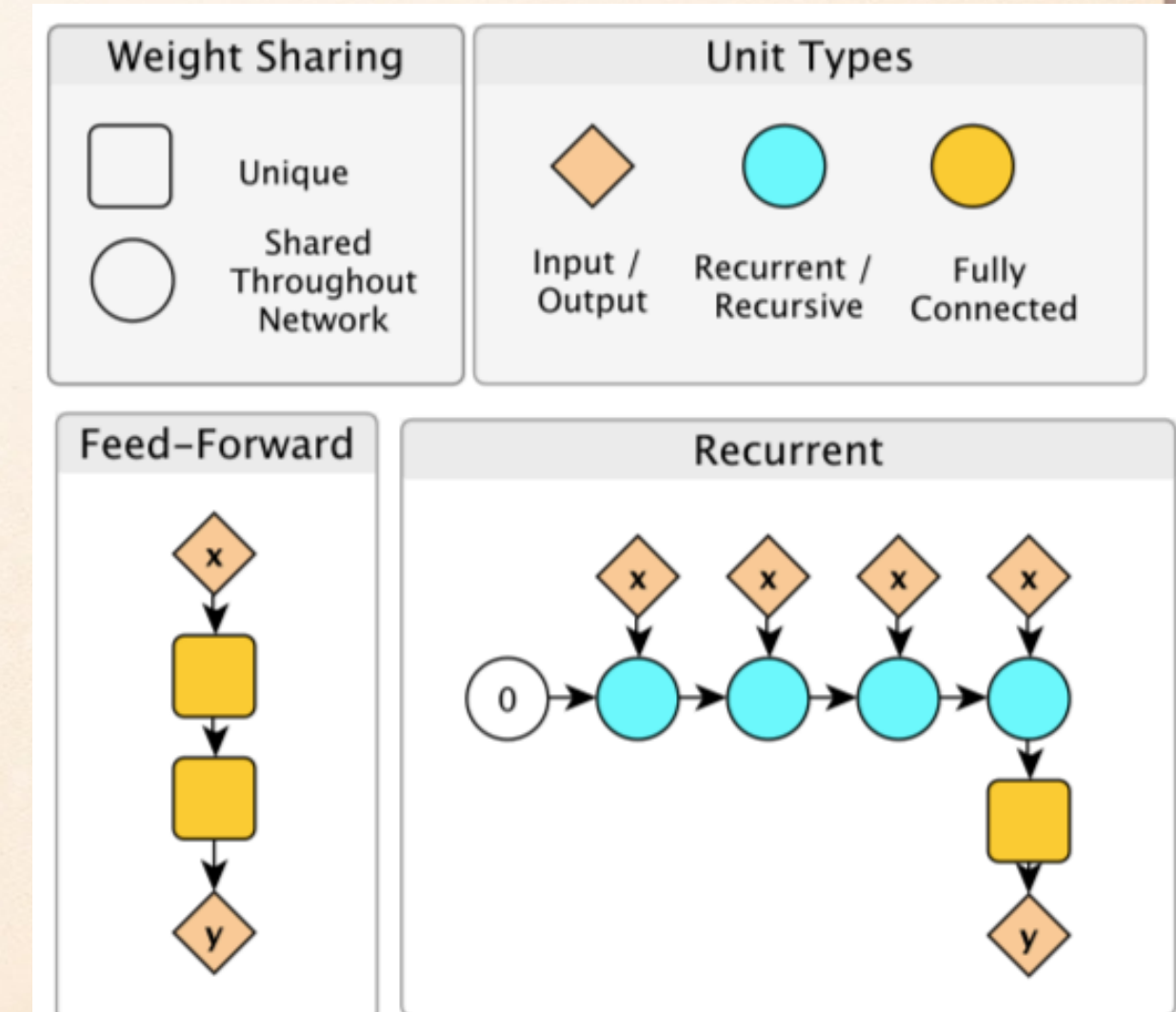
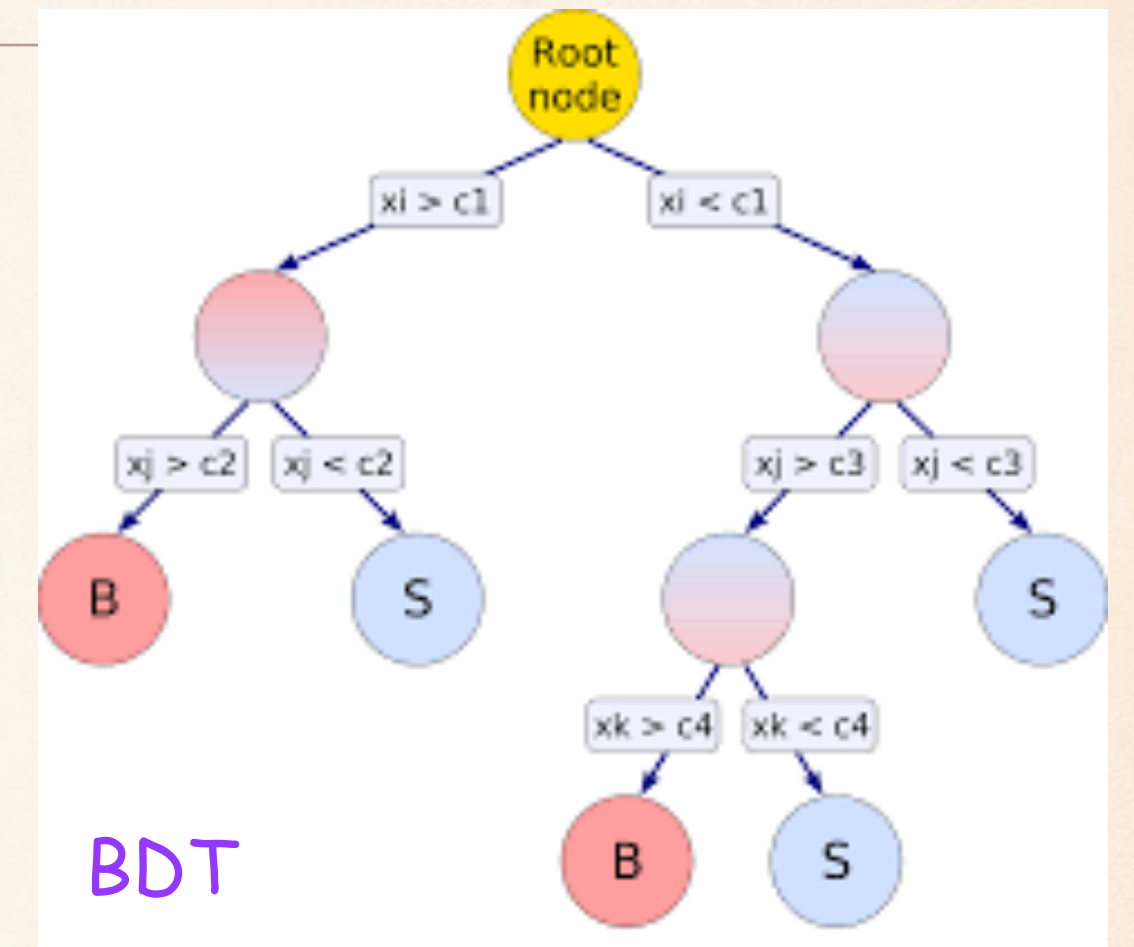
[Погледајте детаље](#)

## ❖ Експерименти

- ❖ Велики сударач хадрона - четири велика и тренутно пет малих
- ❖ Експерименти са фиксном метом
- ❖ Антиматерија
- ❖ Експерименталне платформе - ИСОЛДЕ и ДУНЕ поред осталих - представљено малопре
- ❖ Експерименти који нису везани за судараче

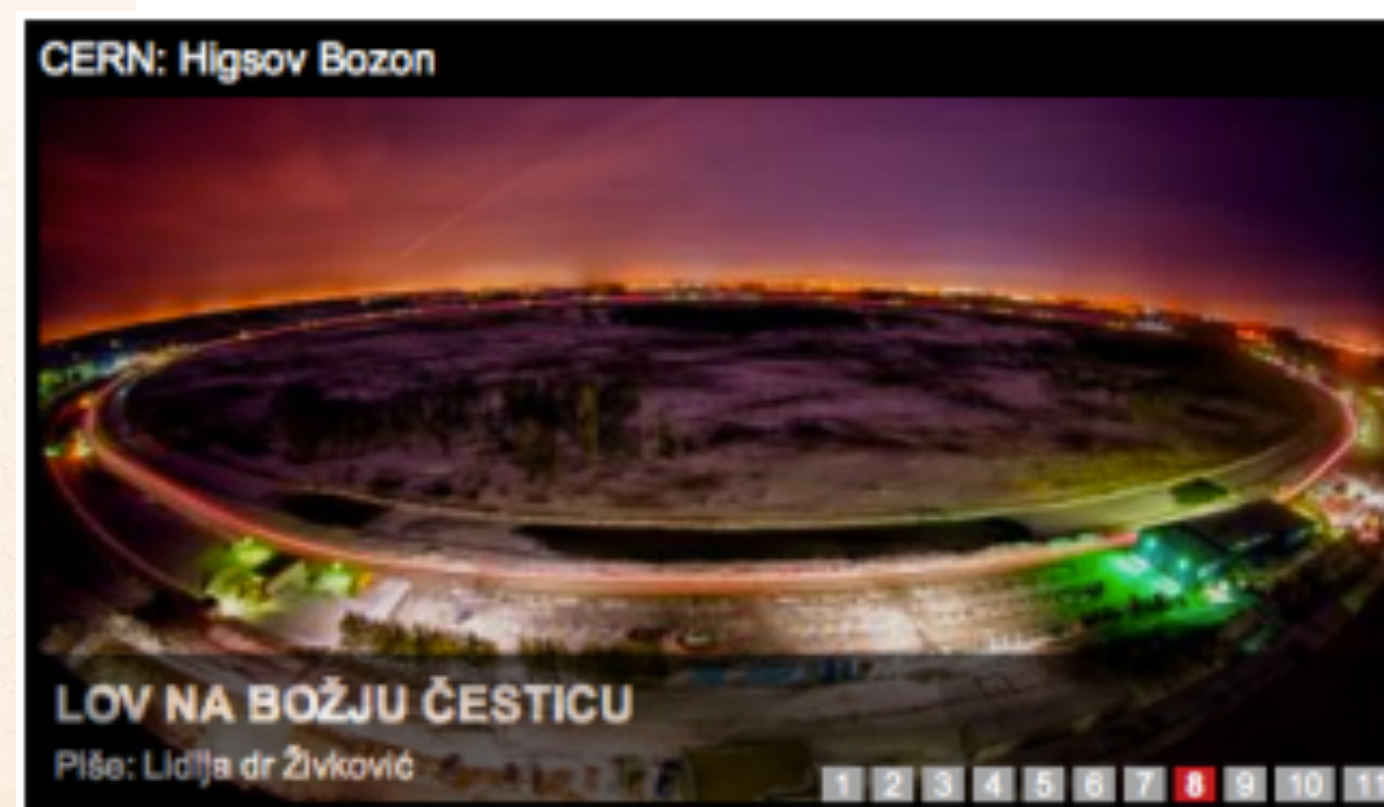
# МАШИНСКО УЧЕЊЕ

- ❖ Посебне карактеристике могу да се комбинују у неку мултиваријабилну технику => основа машинског учења
- ❖ *Boosted Decision Tree (BDT)* техника веома популарна у последњих 10+ година
  - ❖ Поједностављено, догађај пролази или не пролази селекцију док није класификован као сигнал или позадина
- ❖ Неуронске мреже
  - ❖ *Deep Learning* - укључује више сакривених нивоа
  - ❖ *Recurrent Neural networks* - може да процесуира секвенце улазних параметара
  - ❖ *Graph Neural networks*
- ❖ Једна од области која се највише развија у експериментима физике високих енергија



# ДА СЕ ВРАТИМО НА НАУКУ - НОВА ЧЕСТИЦА

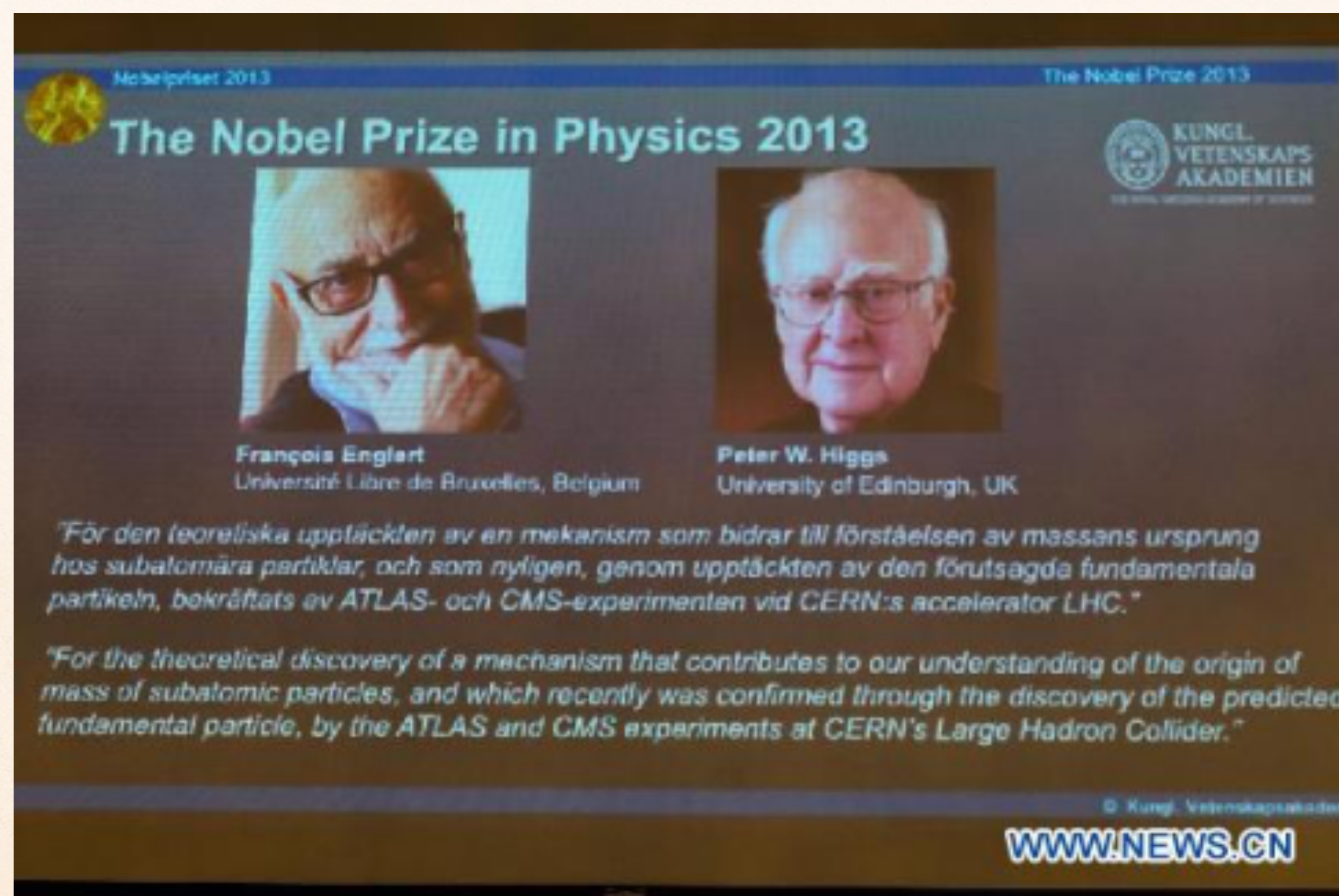
- ❖ У јулу 2012 ударна вест на свим светским медијима била је из науке, физике  
→ **Откривена је нова честица - Хигсов бозон**
- ❖ Резултати су објављени у Церну уз директан пренос који су пратили научници широм света



# 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

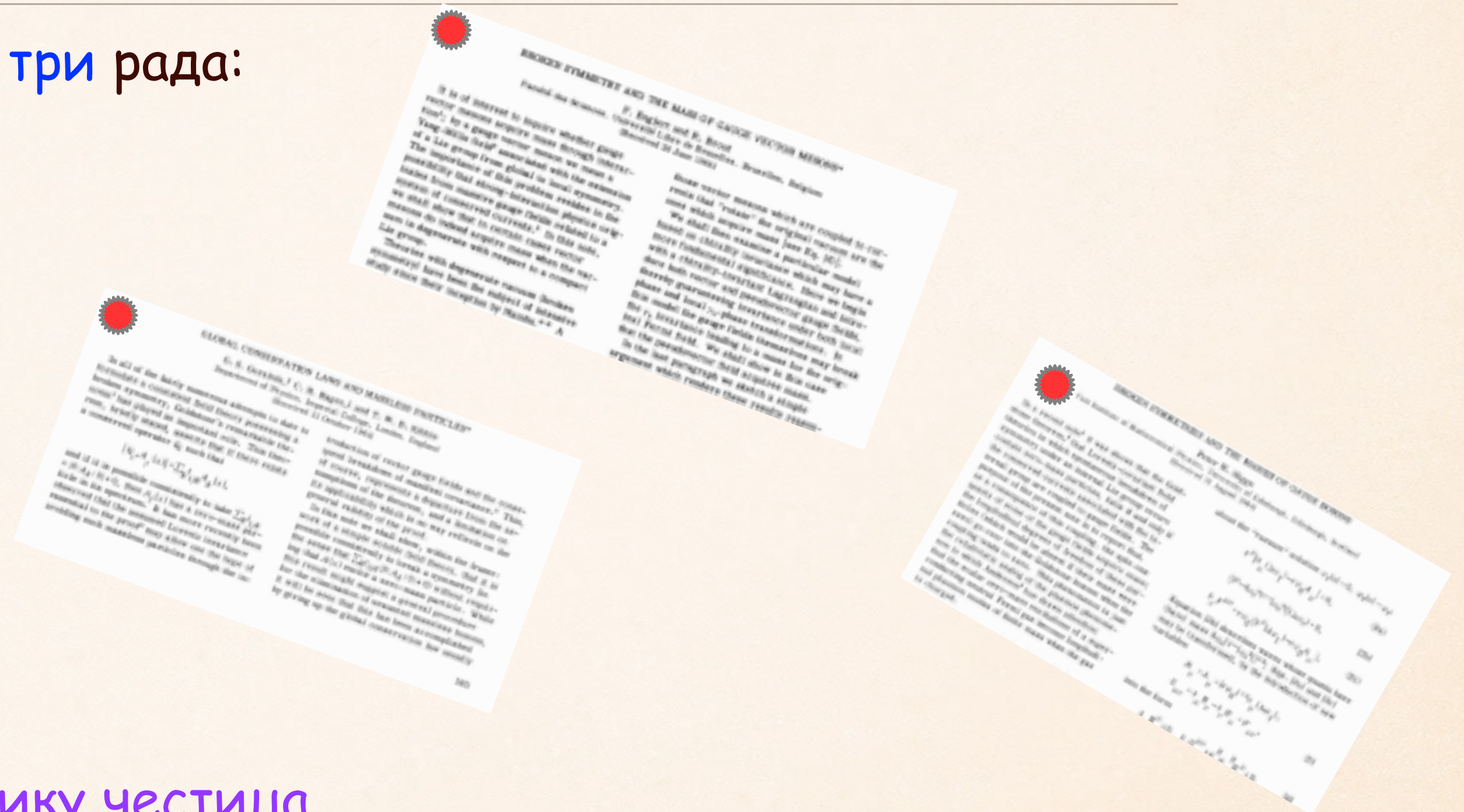
❖ Радови представљају револуцију у физици елементарних честица

❖ **Објашњавају порекло масе**

❖ **Уводе принцип нарушења симетрије у физику честица**

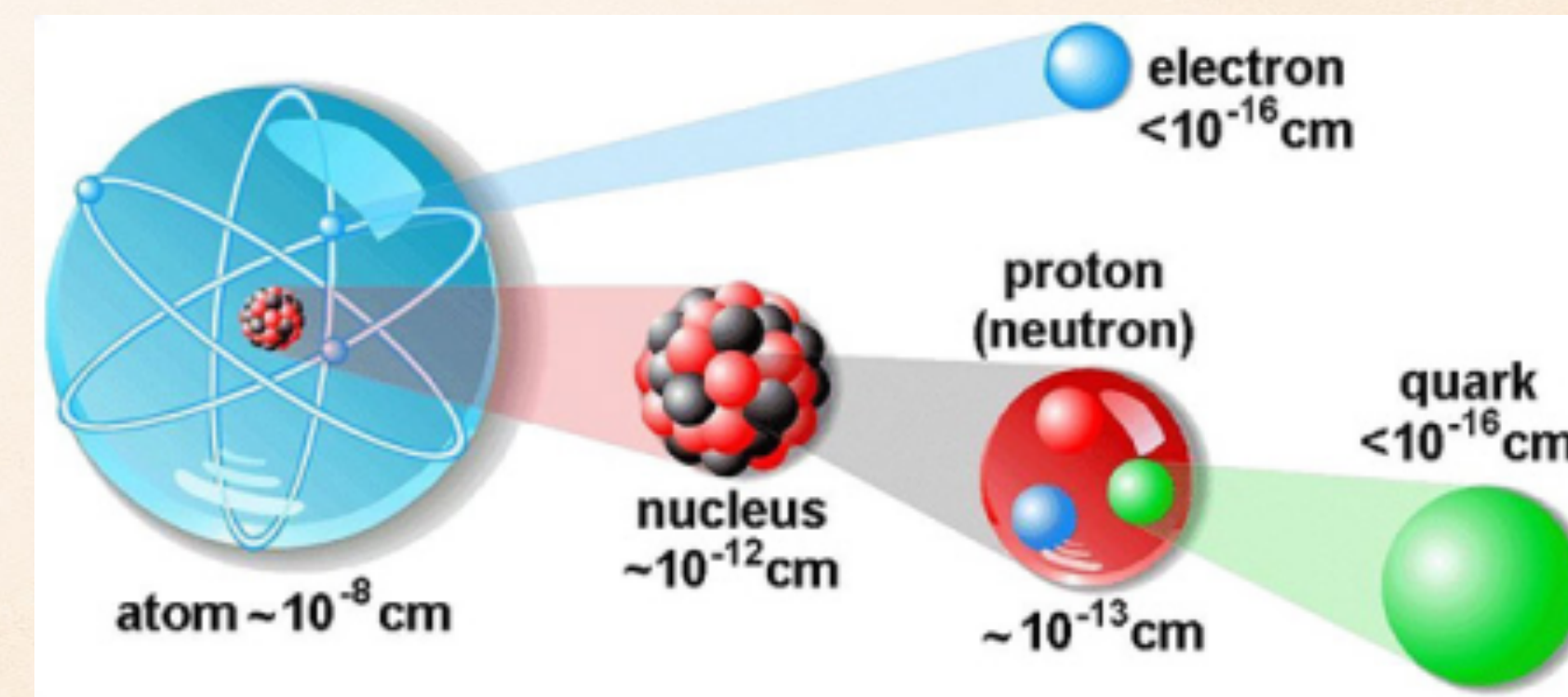
❖ **Предвиђају постојање још једне честице, назване по једном од аутора, Хигсов бозон (или БЕХ, или БЕГХКХ)**

❖ Позната је и као "Божија честица", "кум" је Леон Ледерман, предложио је "Проклета честица" - "Goddamn particle"



# 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 → **άτομον (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



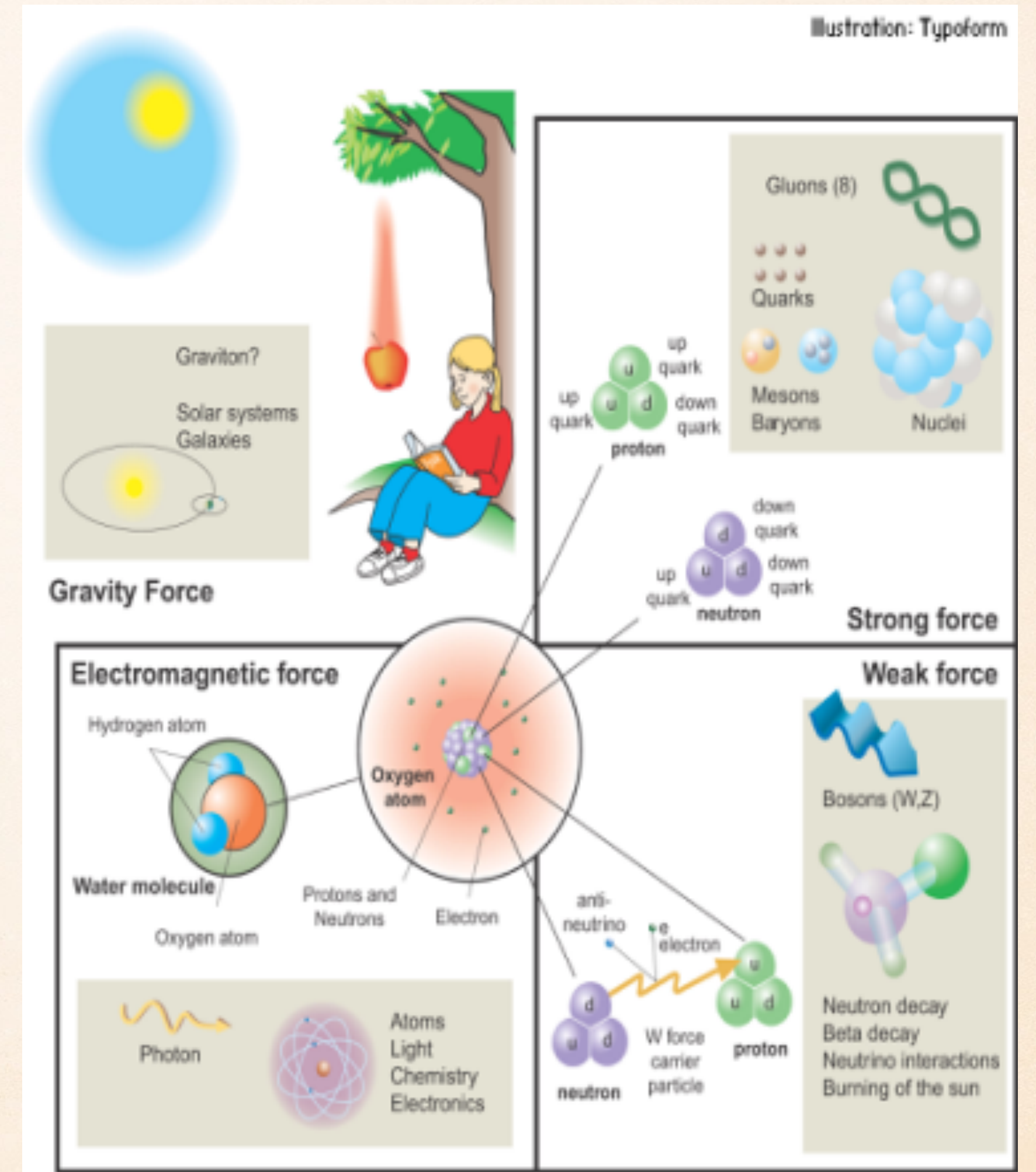
# ШТА СУ ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ?

❖ 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

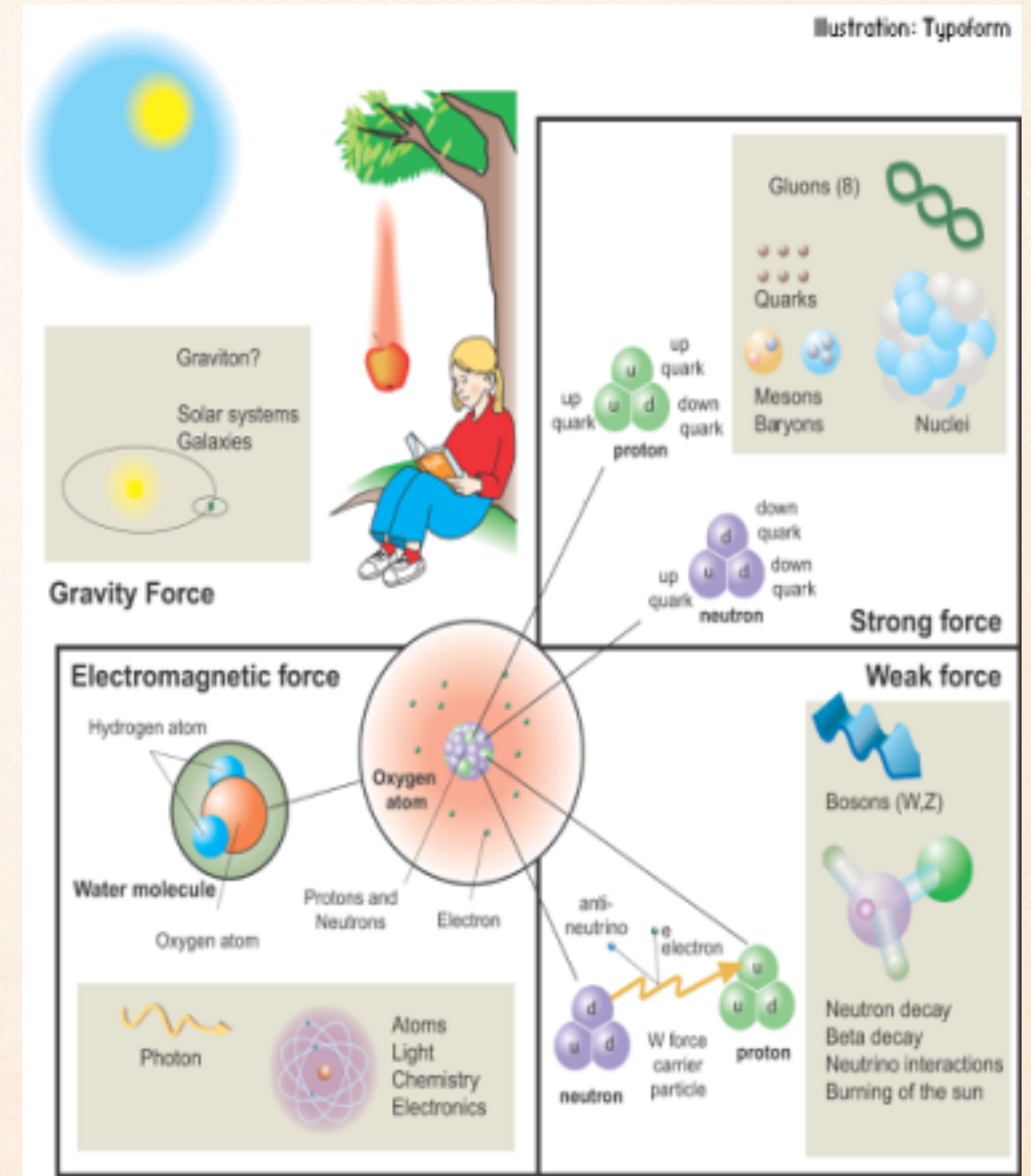




# ОСНОВНЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ

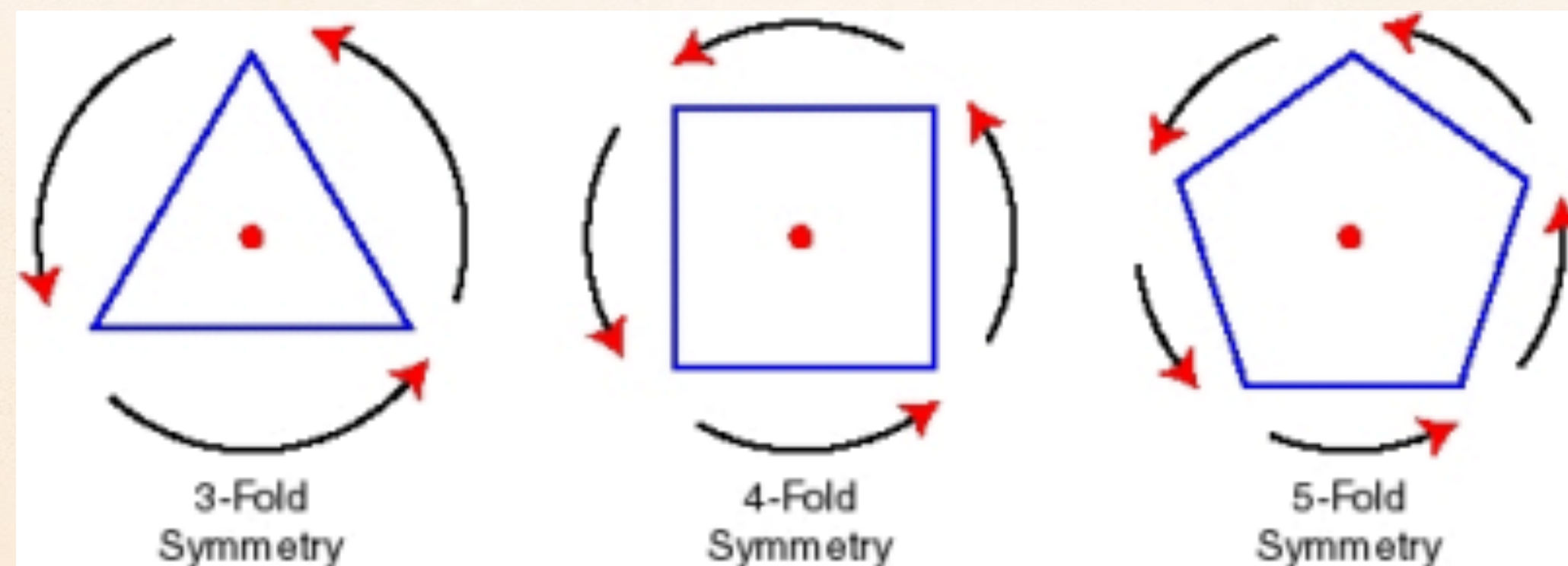
- ❖ Постоје **четири** основне интеракције у природи
- ❖ **Гравитациона**
- ❖ **Електромагнетна**
- ❖ **Слаба** - одговорна за радиоактивне распаде
- ❖ **Јака** - одговорна за нуклеарне силе
- ❖ Свака интаркција има свог **преносиоца** - када две честице интерагују, оне уствари размењују трећу, преносиоца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



# ШТА СУ ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ

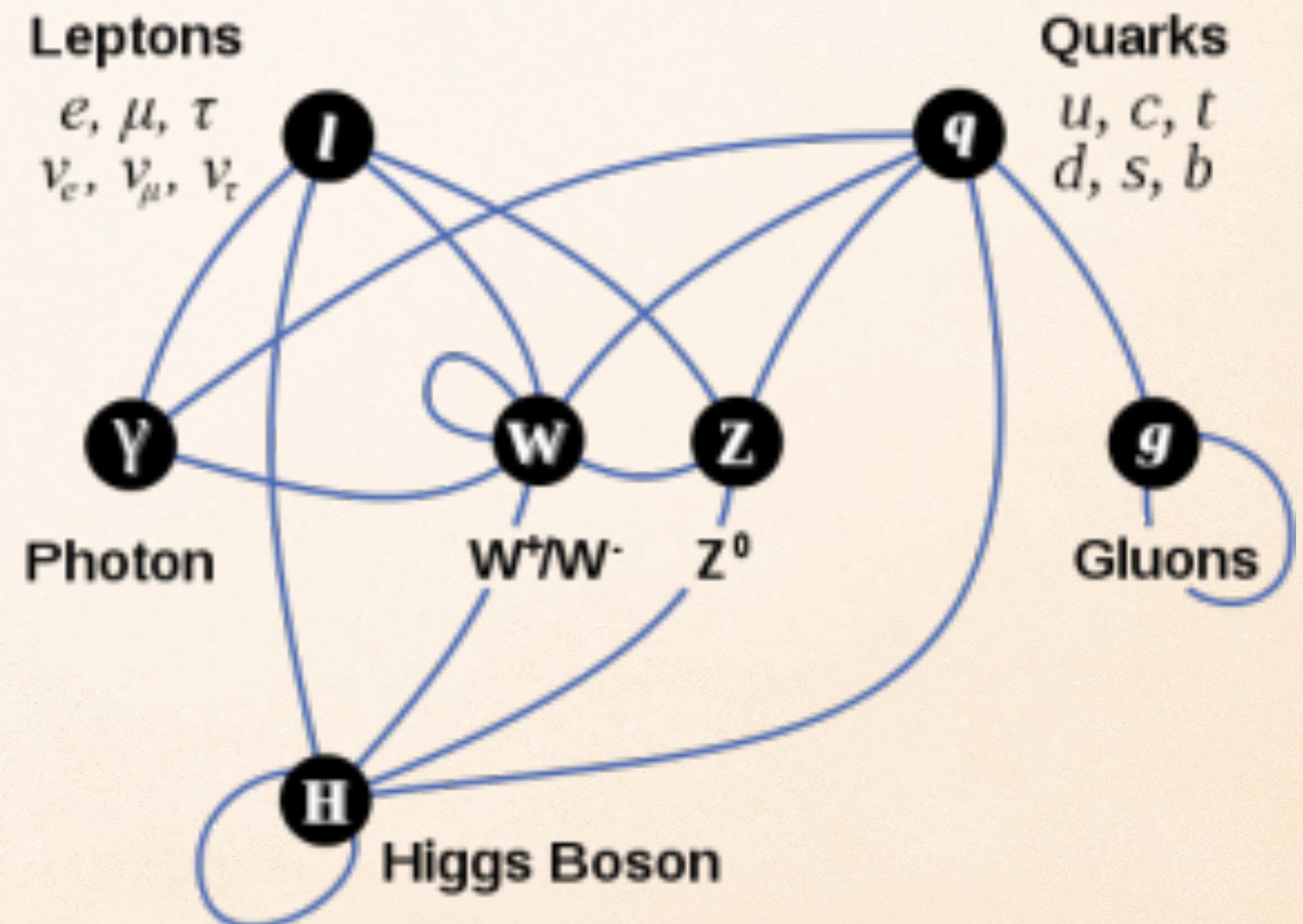
- ❖ Елементарне честице су основни делићи материје
- ❖ И преносиоци интеракција
- ❖ И Хигсов бозон

**Standard Model of Elementary Particles**

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
<b>LEPTONS</b>	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (W, Z,  $\gamma$ )

**SCALAR BOSONS** (H, g)



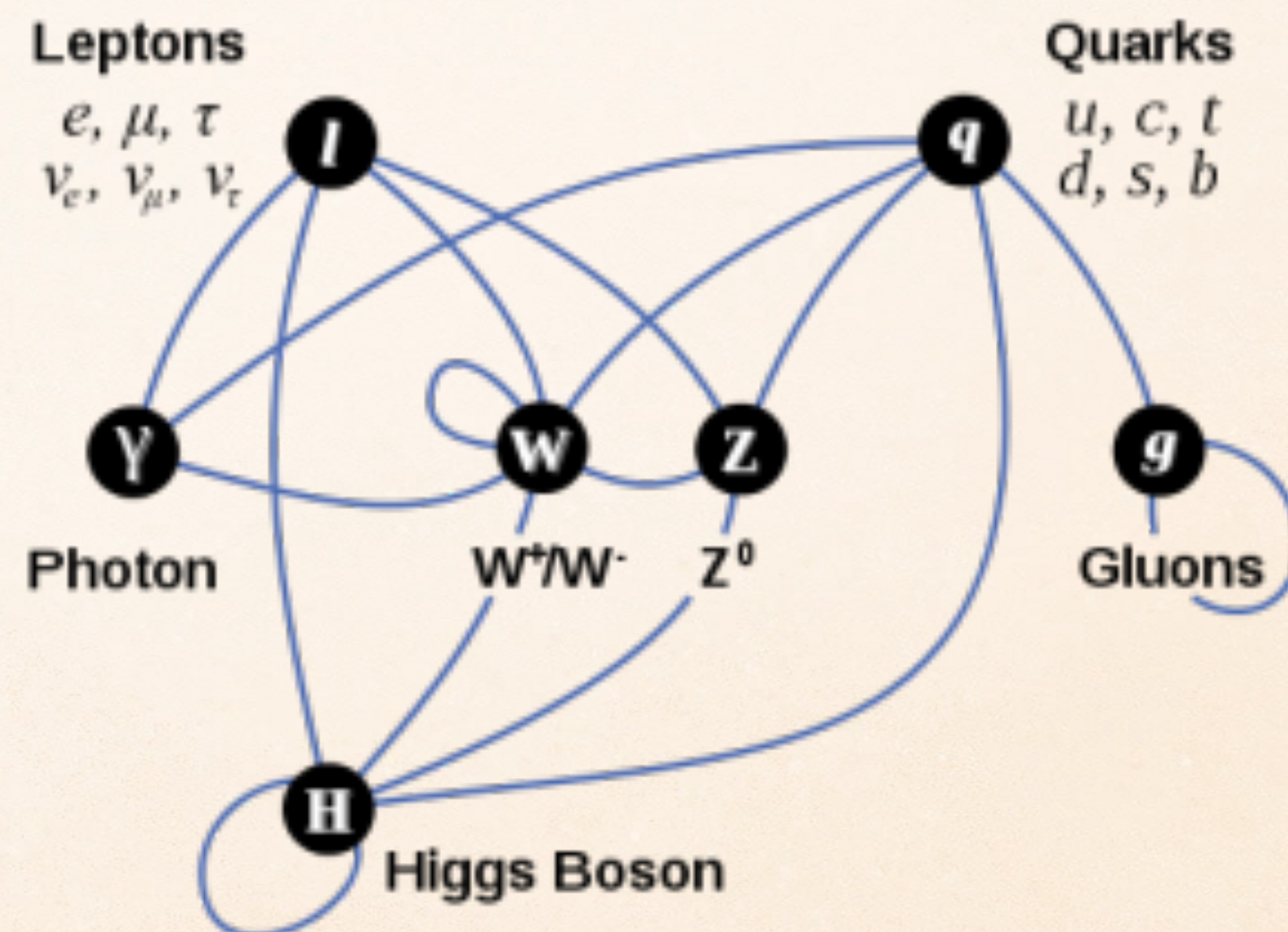
# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

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

**Standard Model of Elementary Particles**

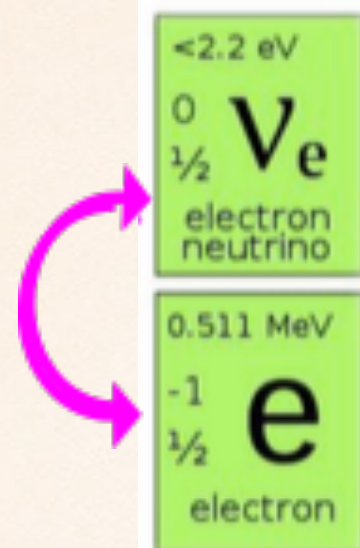
	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
<b>LEPTONS</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (red text)  
**SCALAR BOSONS** (yellow text)



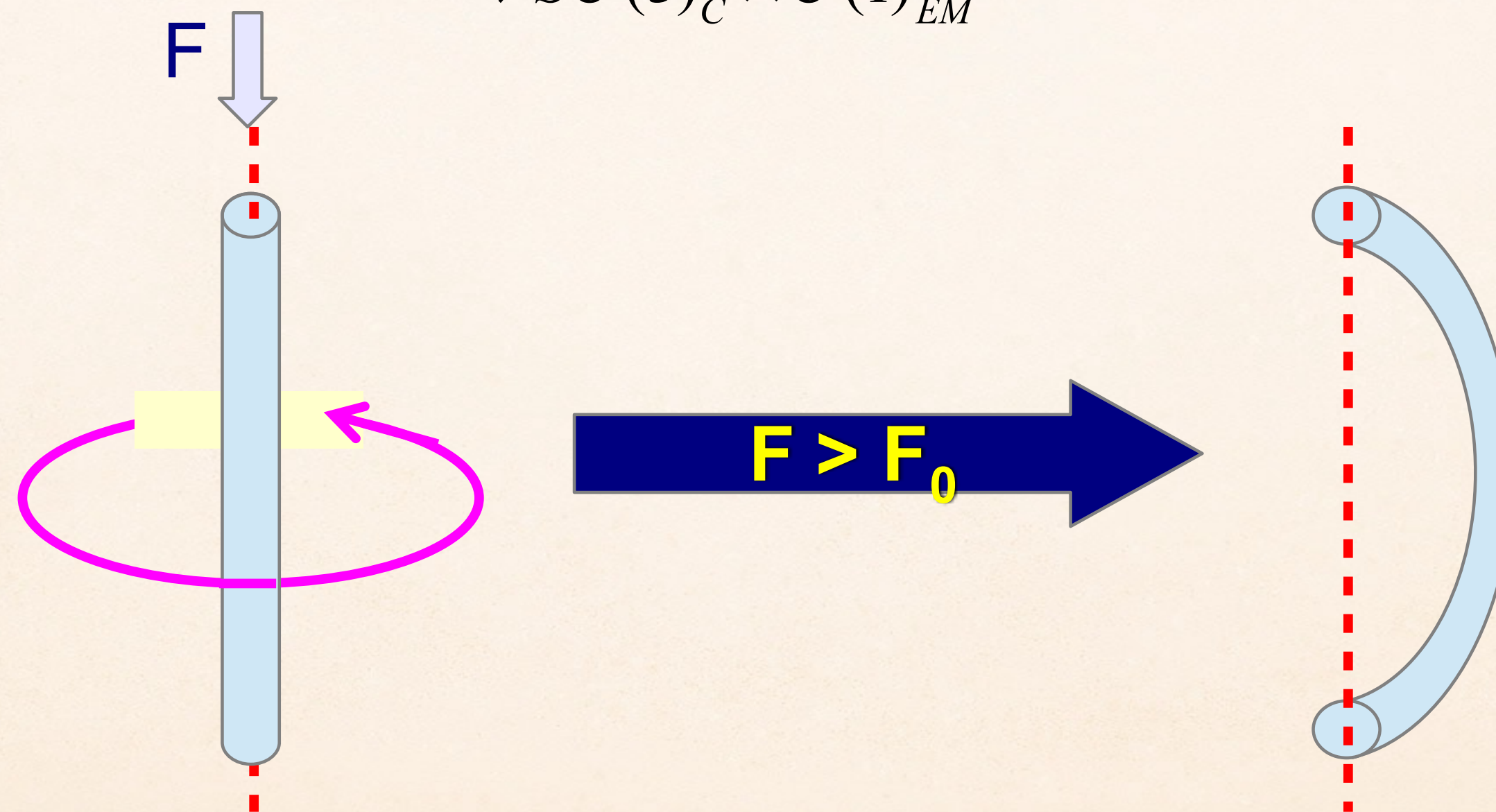
# СПОНТАНО НАРУШЕЊЕ СИМЕТРИЈЕ

$SU(2)_L$



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



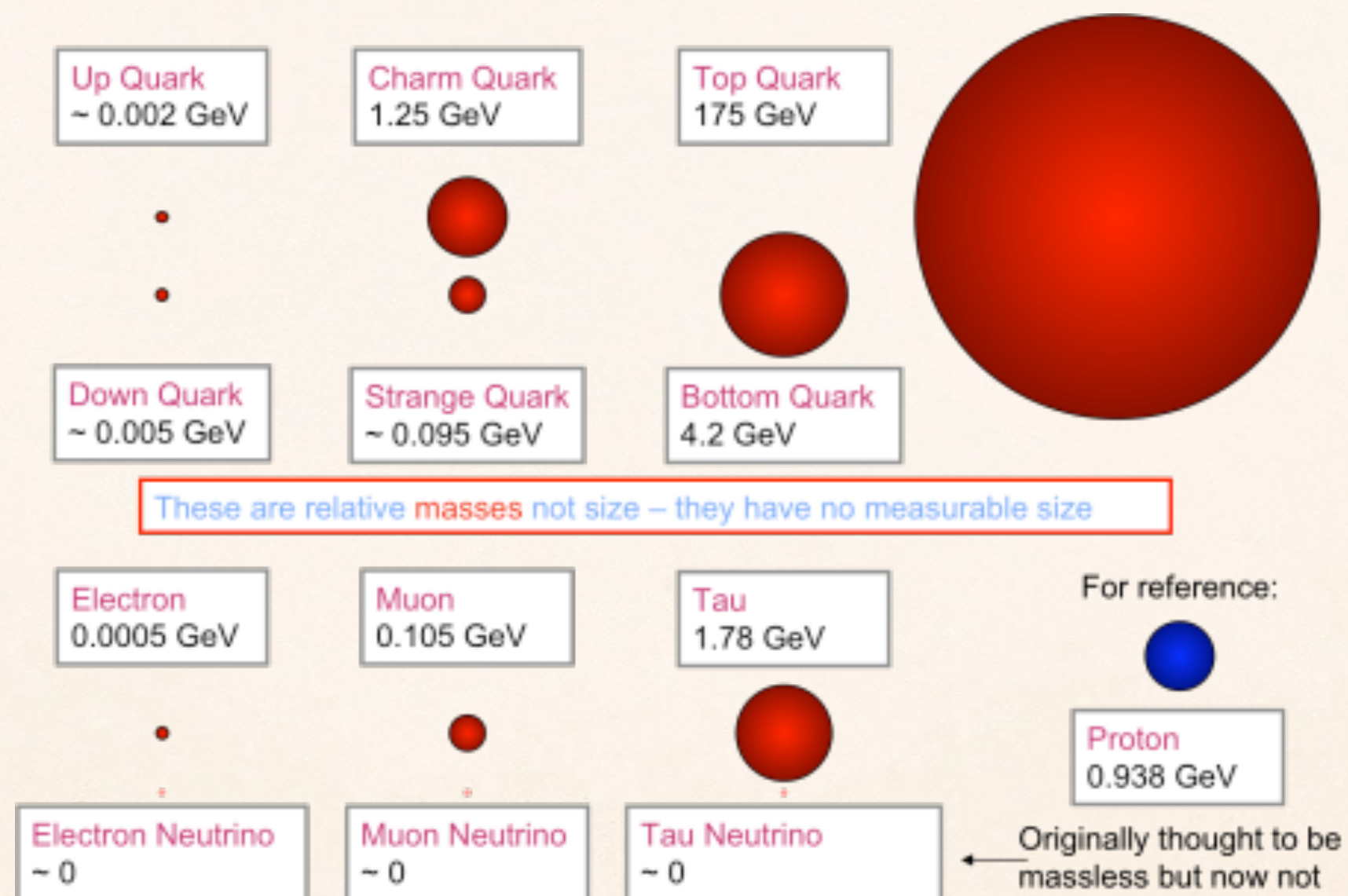
Улази Ноле, народ  
се окупља, Ноле  
добија "масу"  
⇒ маса честица



Гласине о Нолету  
се шире  
⇒ маса Хигса

# ХИГСОВ МЕХАНИЗАМ

*Која честича је Хигс?  
Шта је Хигсов бозон?*



# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

❖ Стандардни модел дефинишу **симетрије**

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

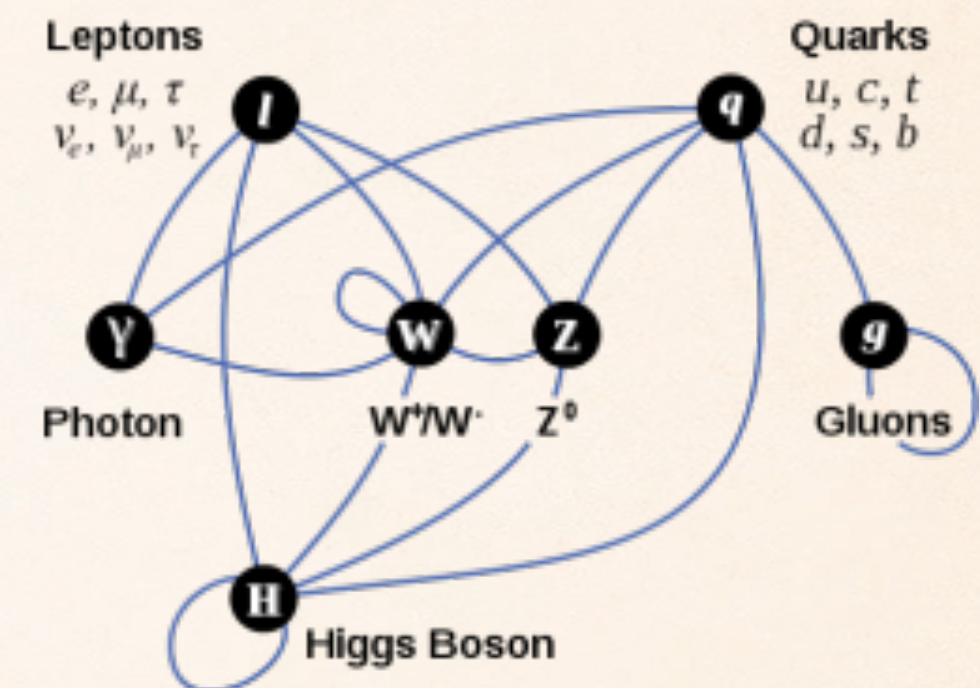
Интеракције: јака, слаба и електромагнетна

❖ Преносиоци: **глуони - g, слаби бозони W<sup>±</sup>, Z, и фотон**

❖ Честице материје: **Лептони и кваркови**

❖ И **спонтано нарушење симетрије**: Комплексно скаларно поље

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

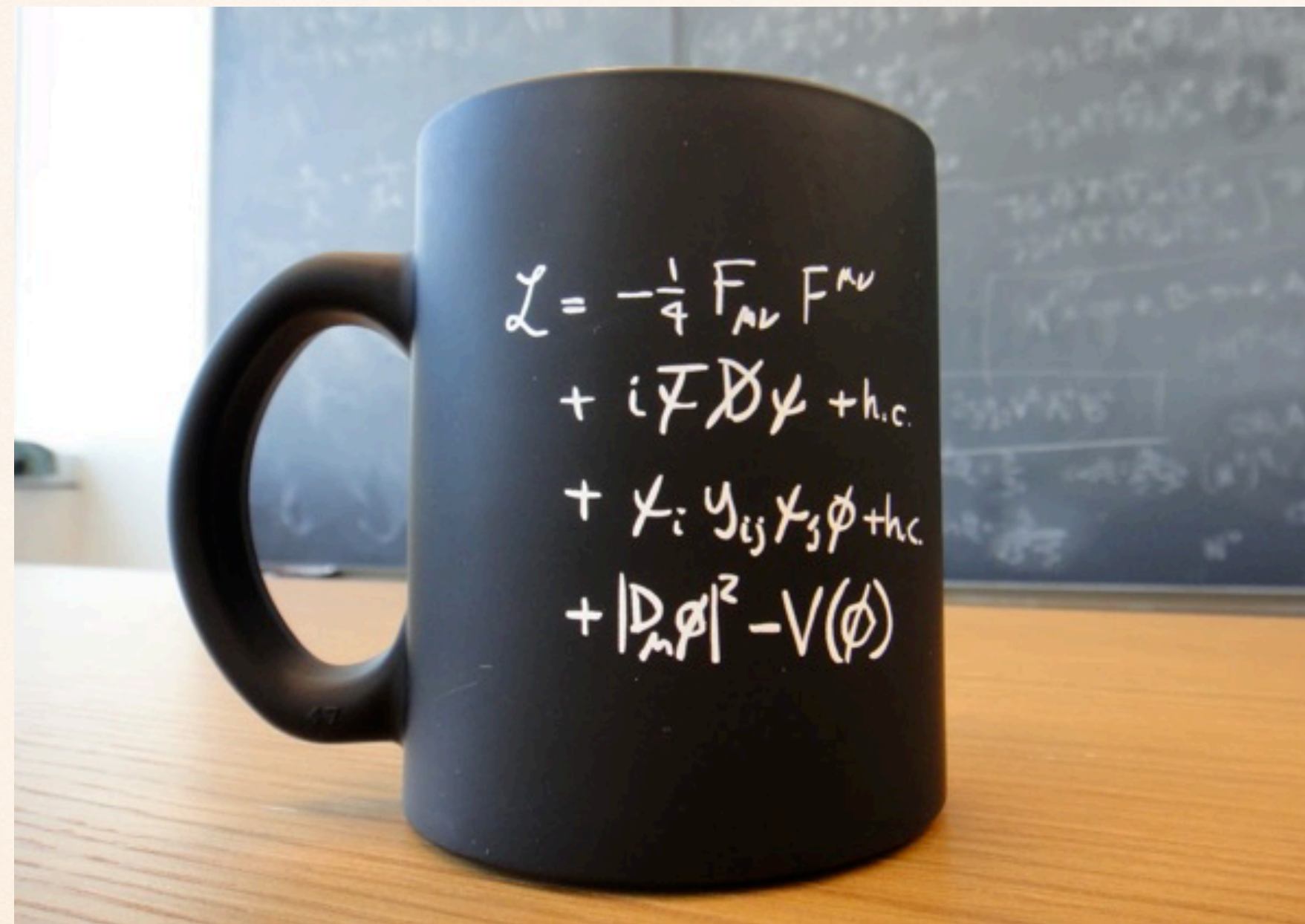
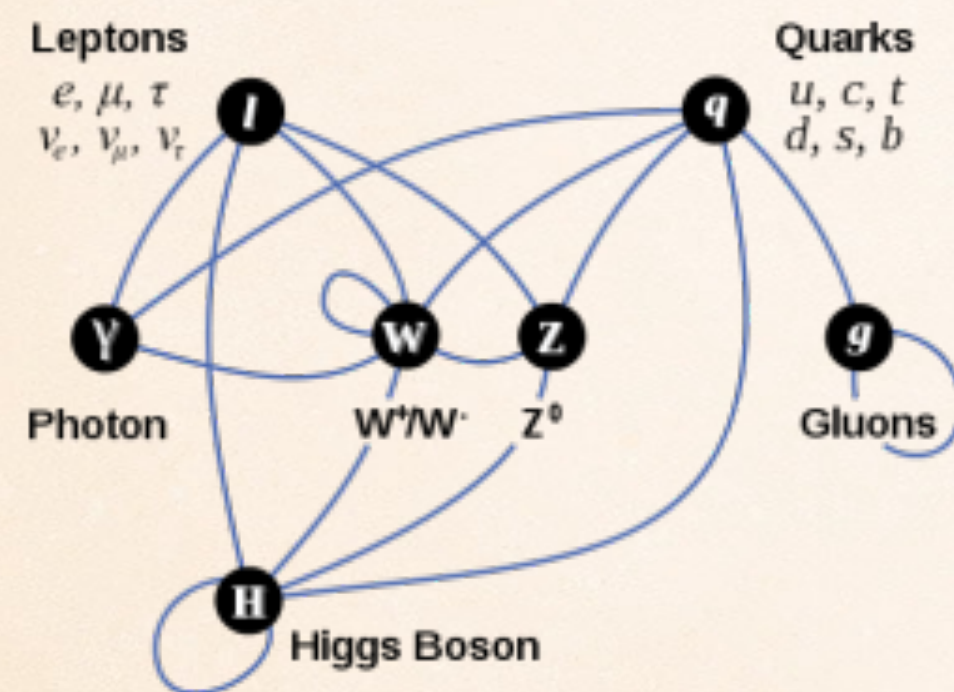


Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	≈2.2 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.28 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈124.97 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
<b>QUARKS</b>					
	≈0.511 MeV/c <sup>2</sup>	≈105.66 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.7768 GeV/c <sup>2</sup>	≈91.19 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1	1	1	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>					
	<1.0 eV/c <sup>2</sup>	≈0.17 MeV/c <sup>2</sup>	≈18.2 MeV/c <sup>2</sup>	≈80.39 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					<b>SCALAR BOSONS</b>
					<b>GAUGE BOSONS</b> VECTOR BOSONS

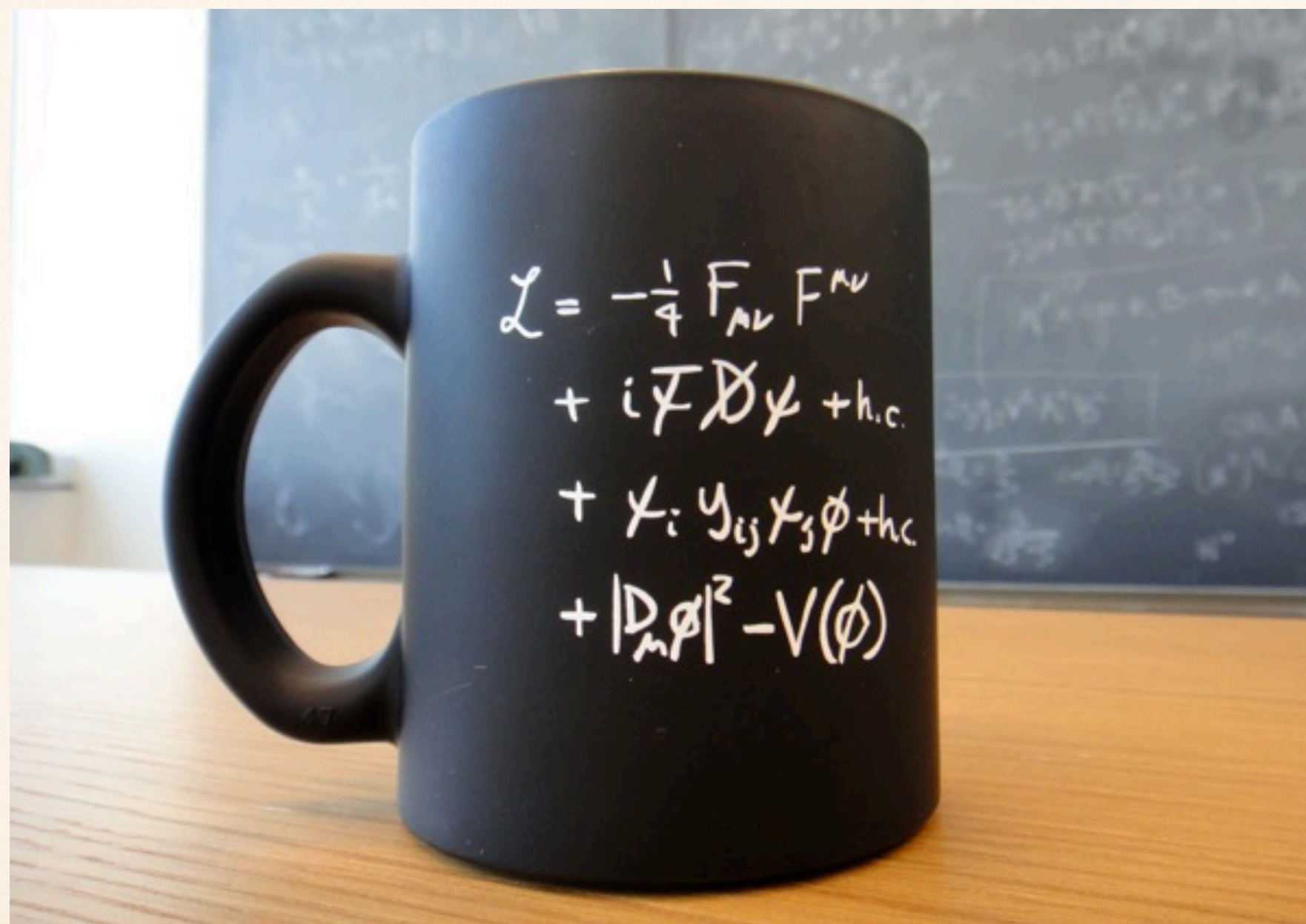
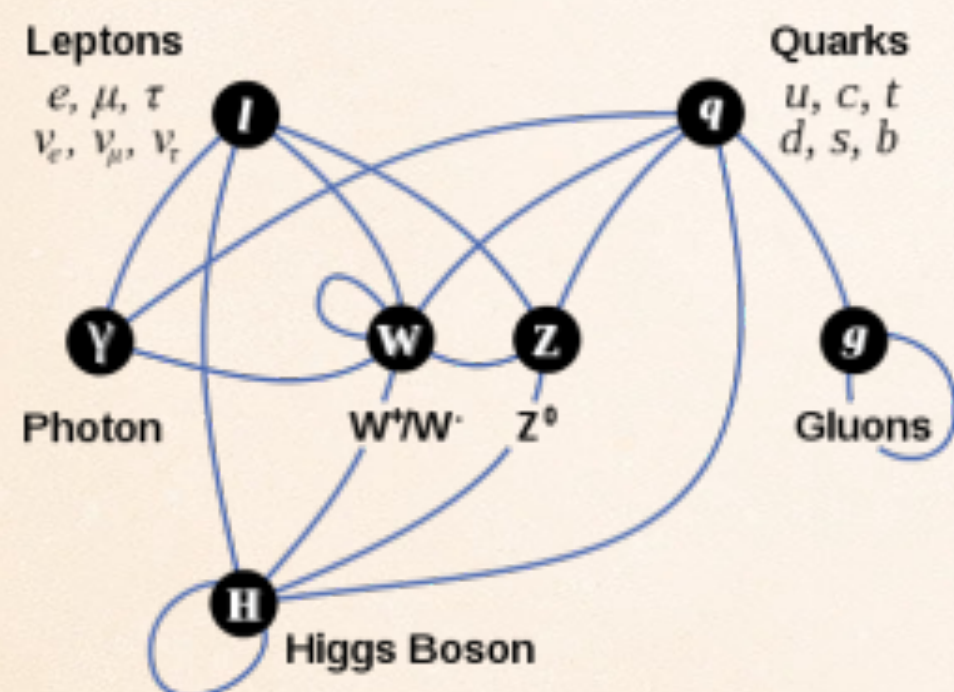


# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ



Једноставан и елегантан

# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

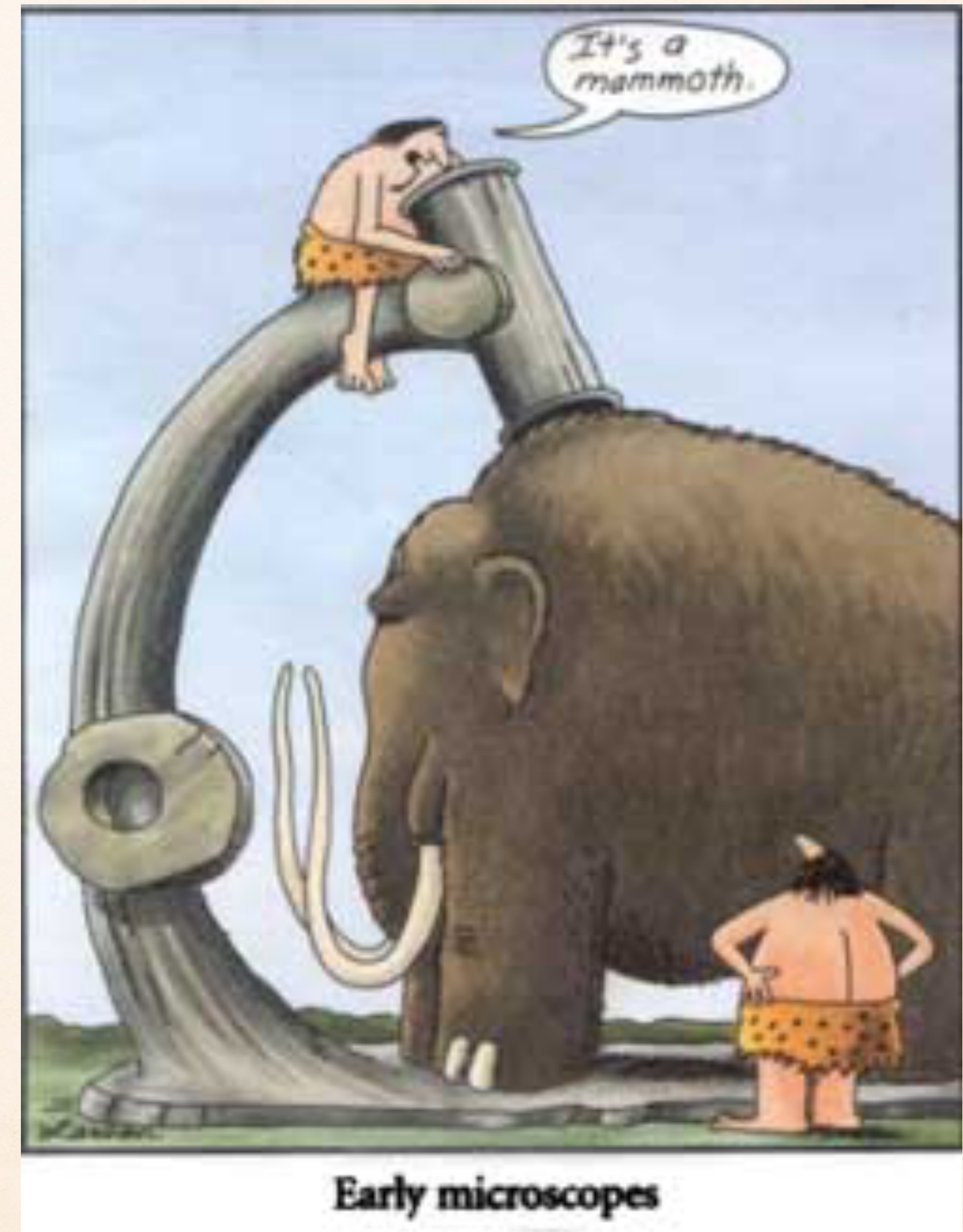
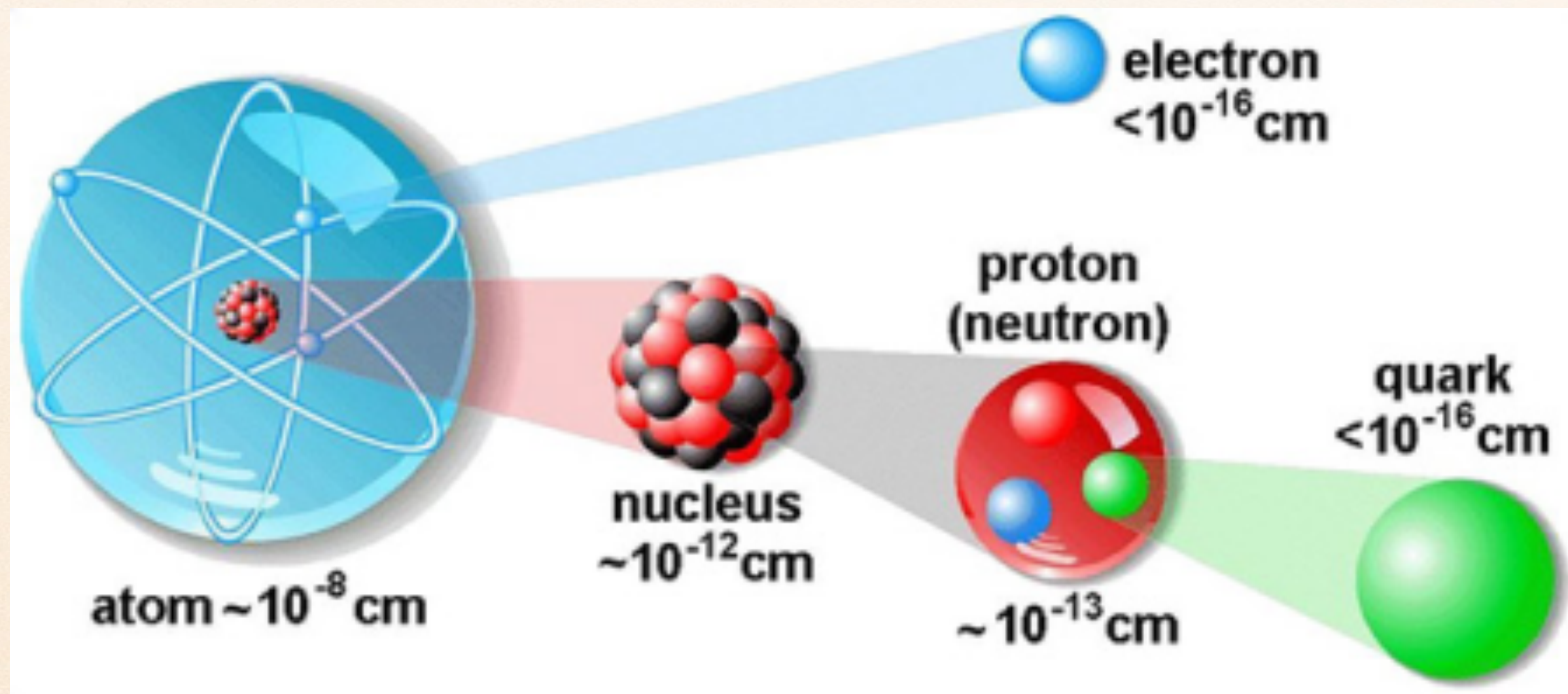


Зар не?

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\ & Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - ig_{sw} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\ & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\ & 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left( \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \\ & \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2} g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \\ & \frac{1}{2} ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + \\ & ig s_w A_\mu \left( -(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) \right) + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - \\ & 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left( (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right) + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left( (\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left( -m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \right. \\ & \left. \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left( m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left( -m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left( m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) \right) \right. \end{aligned}$$

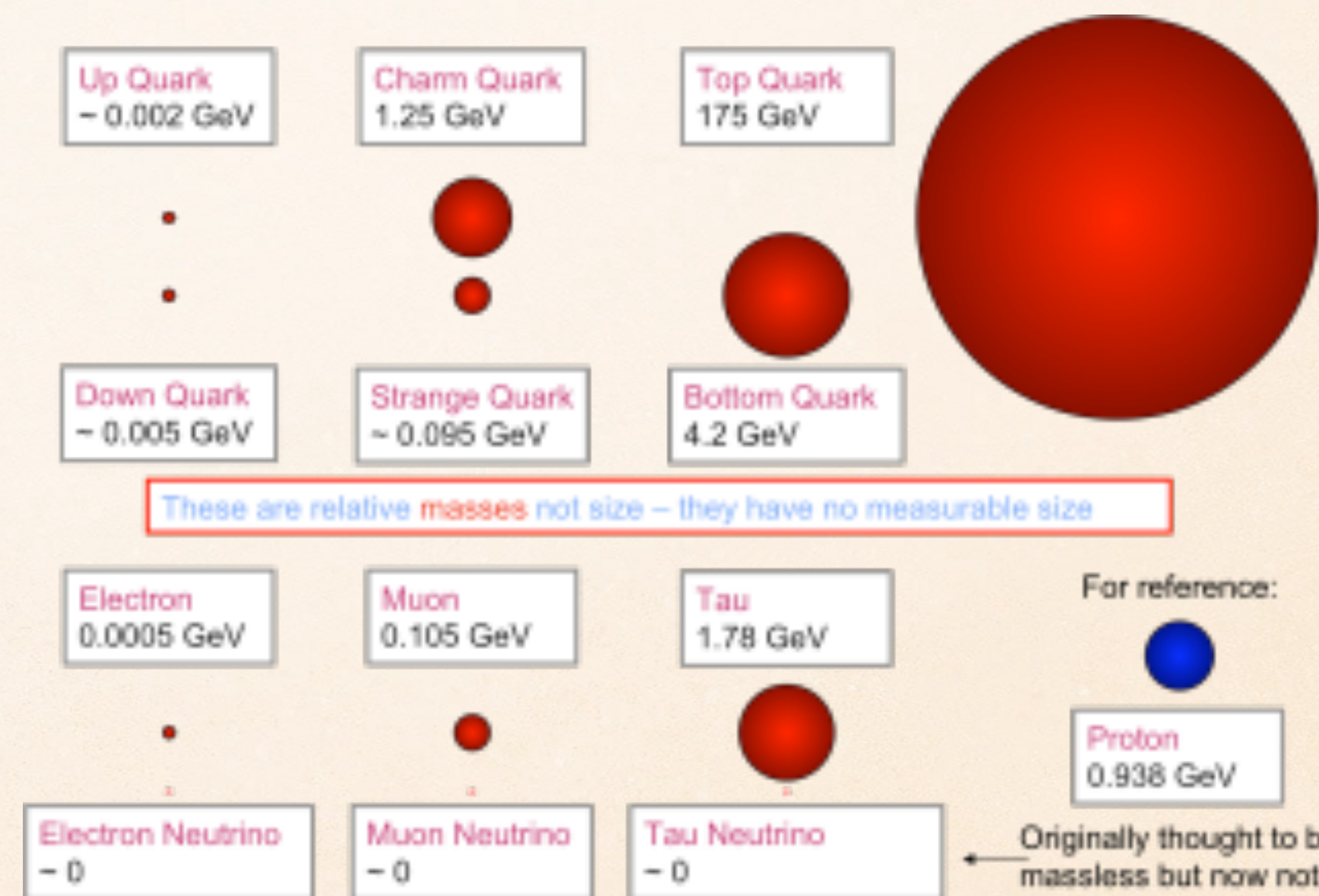
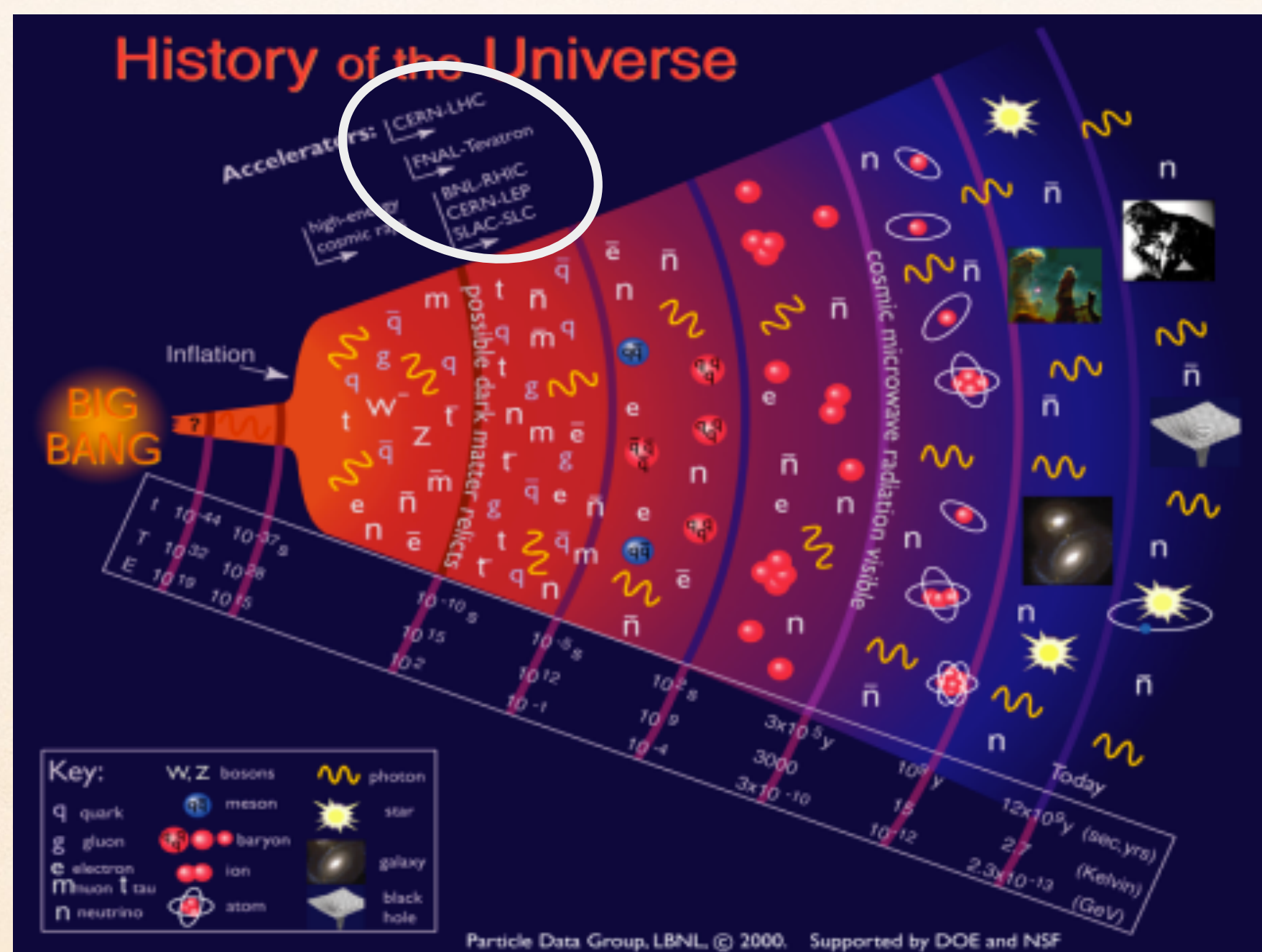
# КАКО СЕ ДЕТЕКТУЈУ ЧЕСТИЦЕ

- ❖ Димензије честица су мале



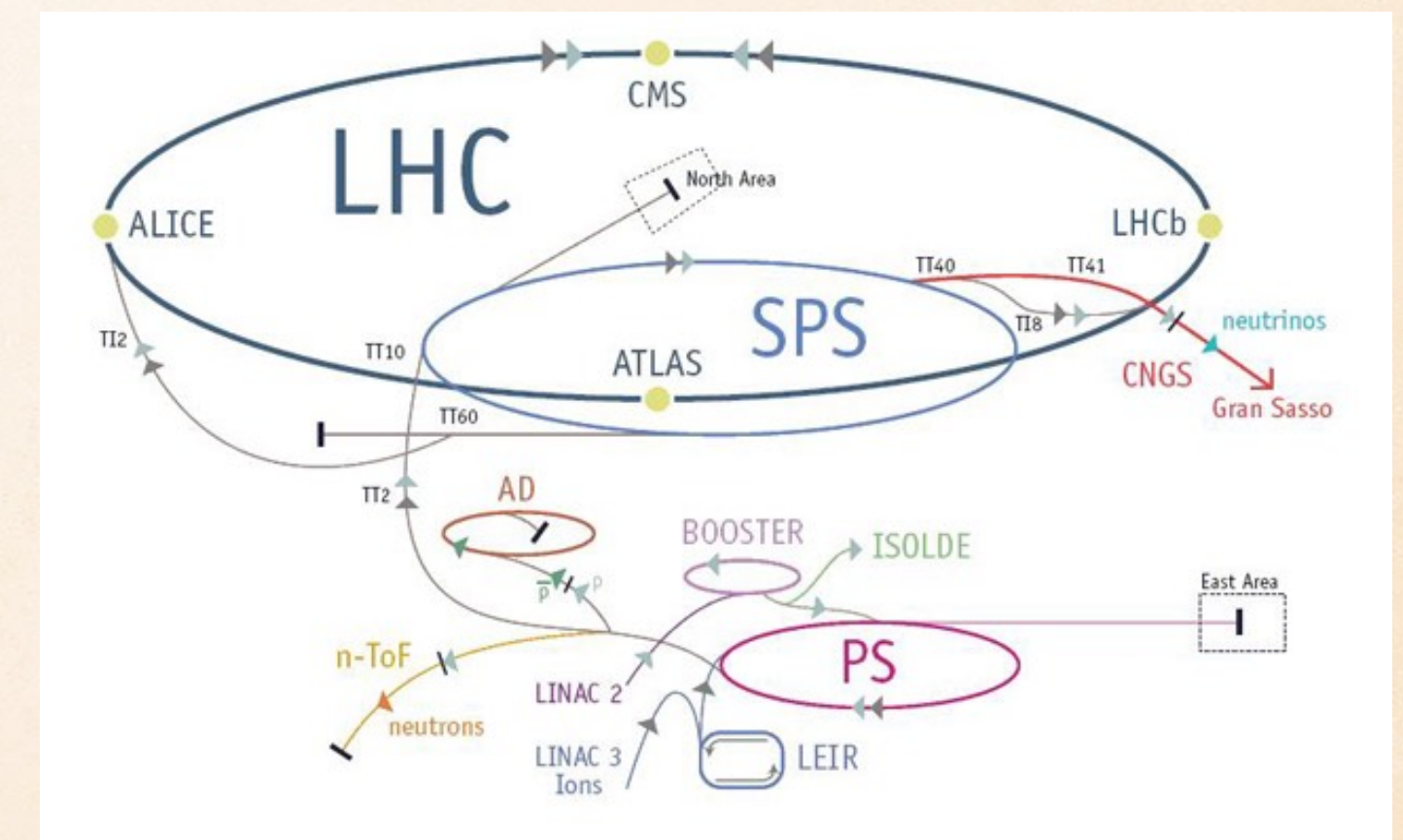
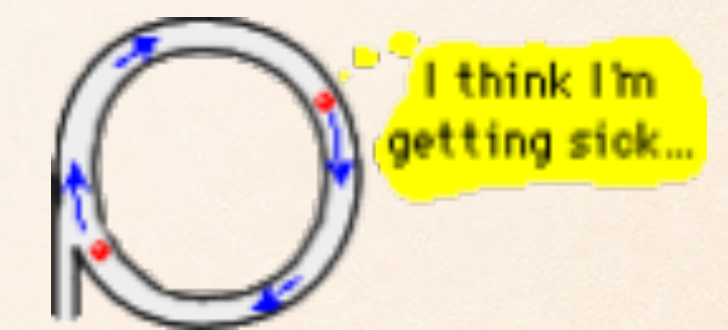
# КАКО СЕ ДЕТЕКТУЈУ ЧЕСТИЦЕ

- ❖ 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  $E = mc^2$

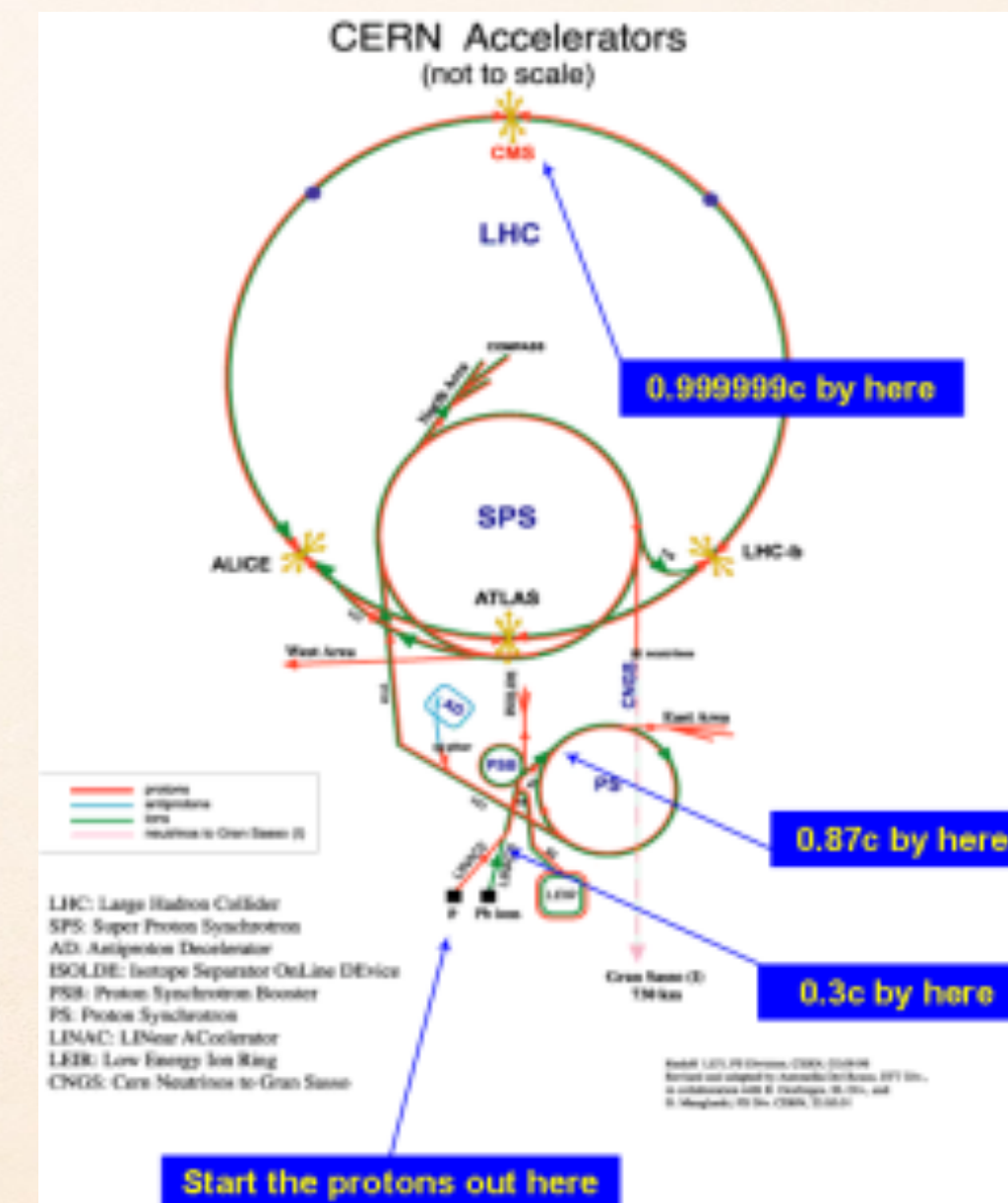
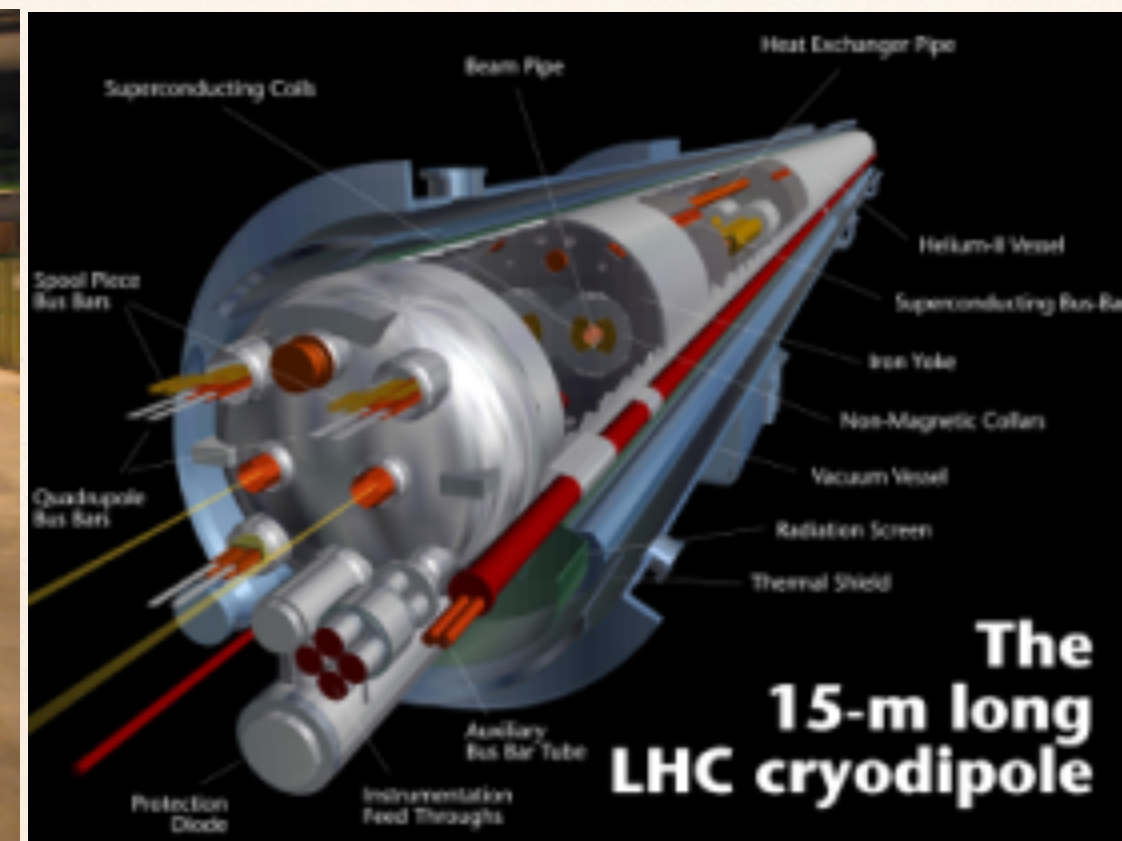
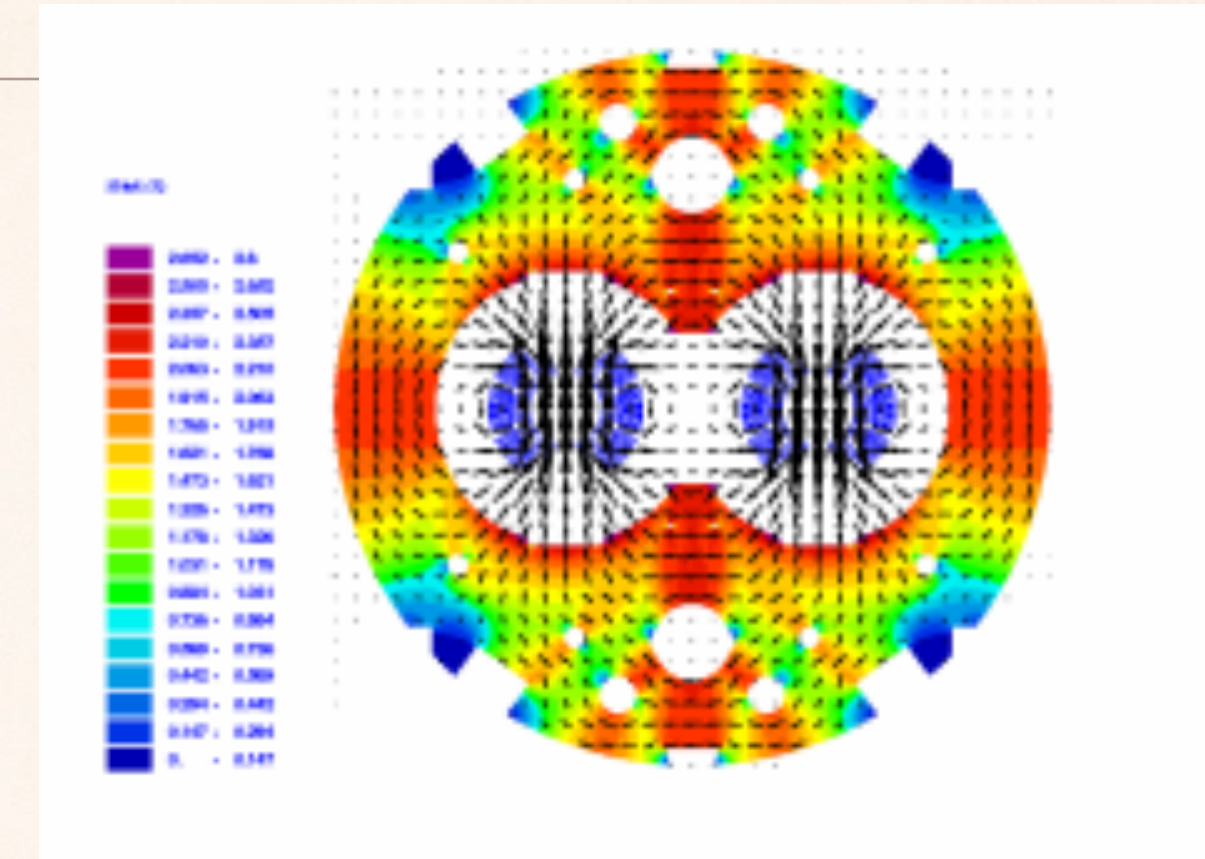
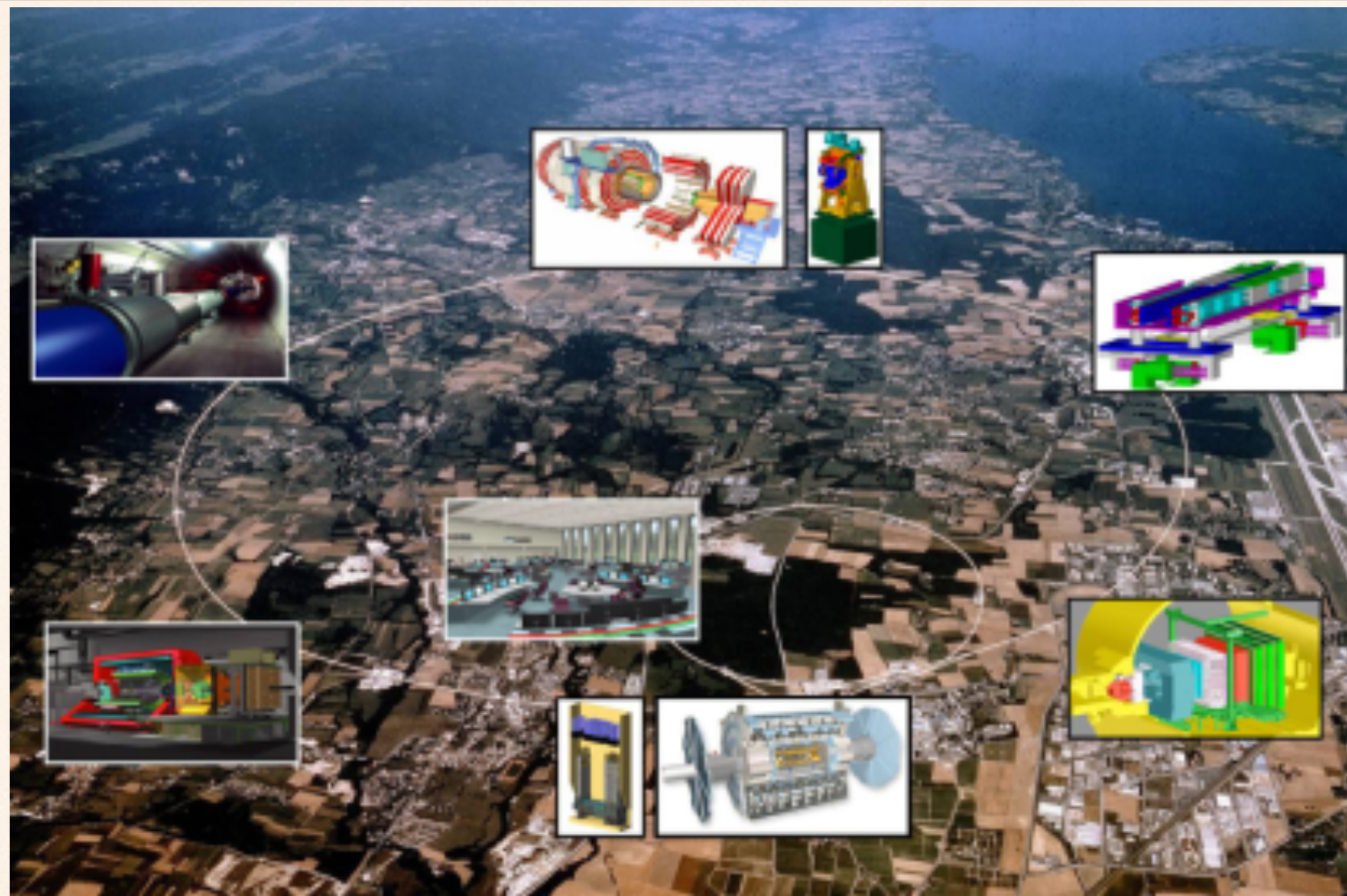


# АКЦЕЛЕРАТОРИ

- ❖ 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

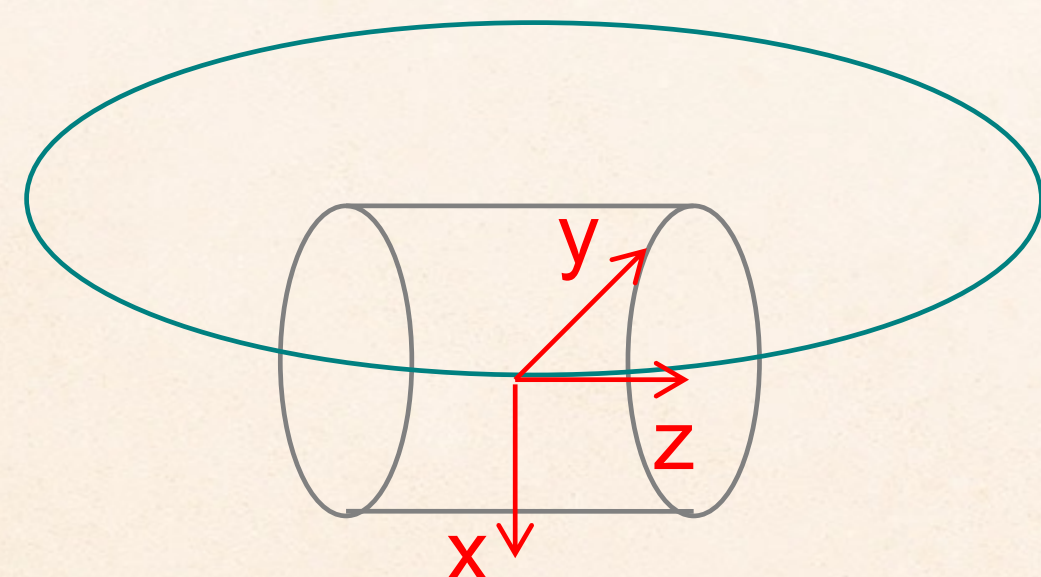
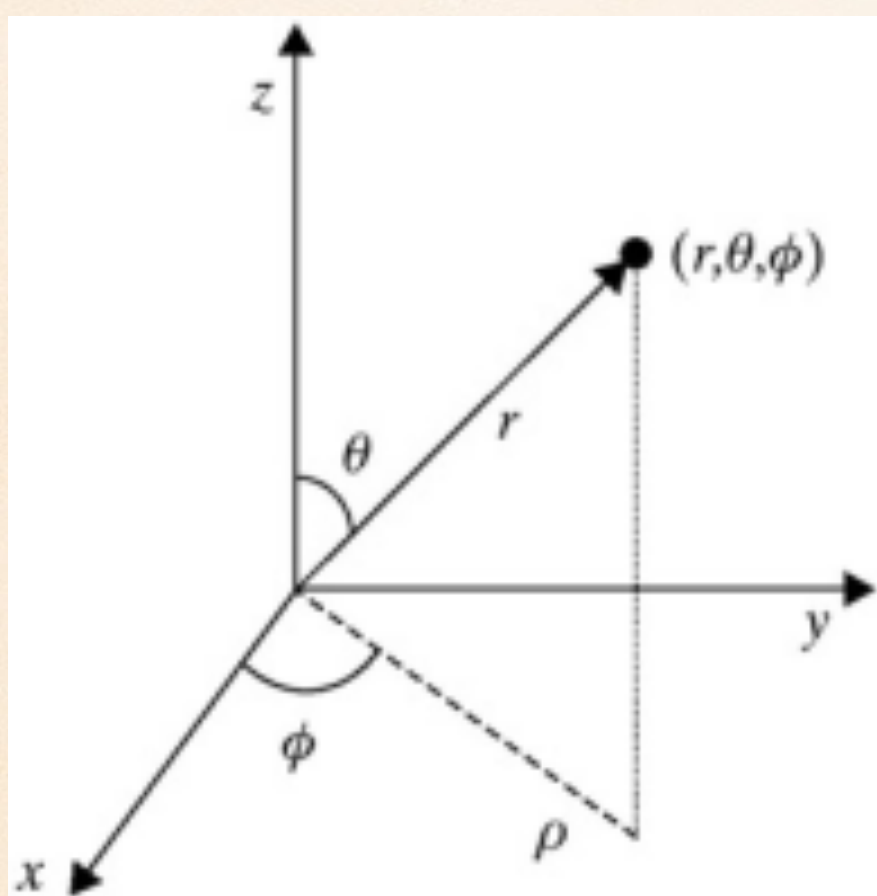
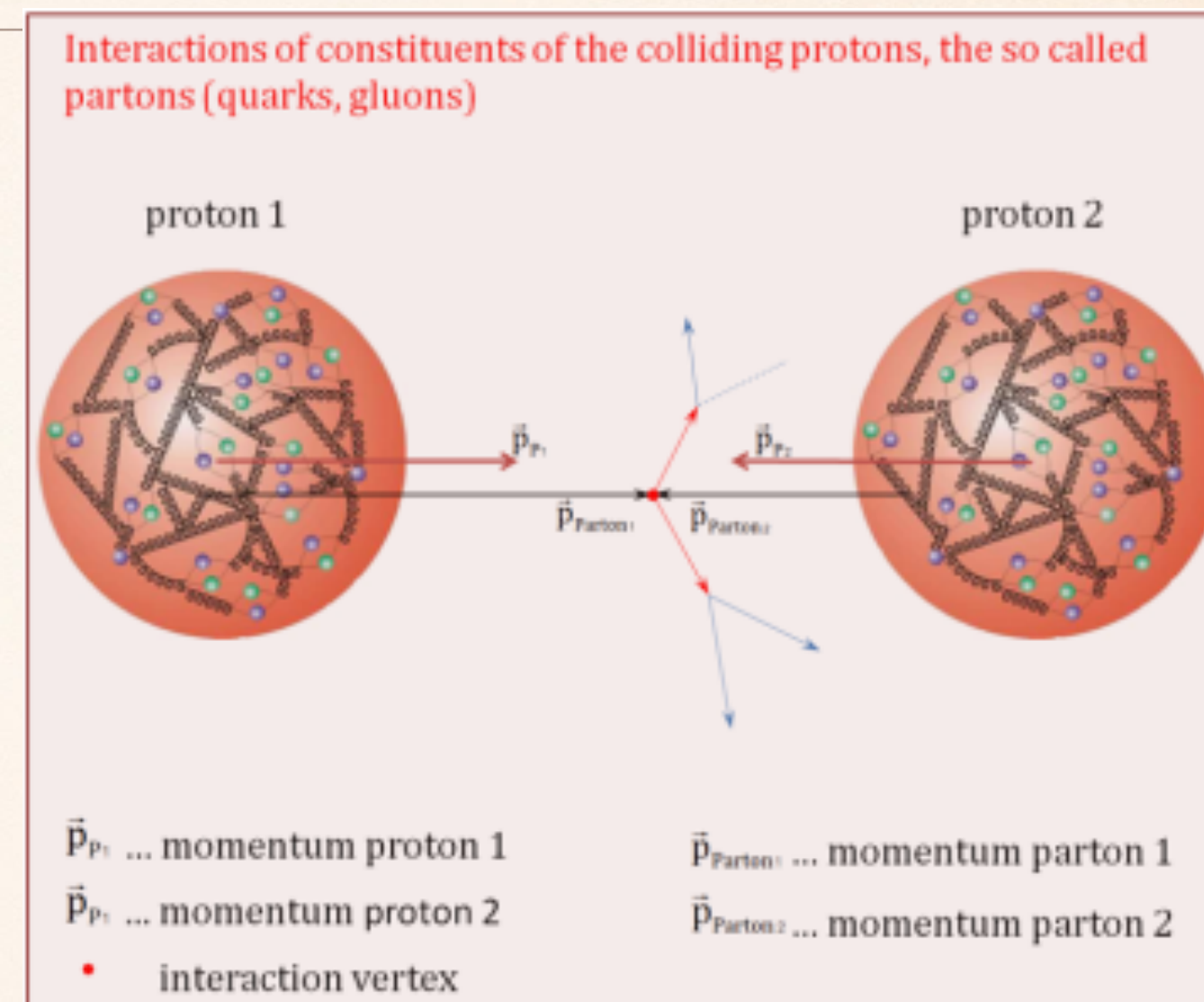


# Више после науке ВЕЛИКИ ХАДРОНСКИ СУДАРАЧ (LARGE HADRON COLLIDER - LHC)



# ХАДРОНСКИ КОЛАЈДЕРИ И ДЕТЕКЦИЈА ЧЕСТИЦА

- ❖ У судару учествују сложене честице - протони
- ❖ 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 = $10^{-24}\text{cm}^2$ )
Енергија, маса, импулс у GeV	Луминозност 1/fb

Укупни број честица  
= Луминозност \* Пресек

Више после паузе

# ХАДРОНСКИ КОЛАЈДЕРИ И ДЕТЕКЦИЈА ЧЕСТИЦА

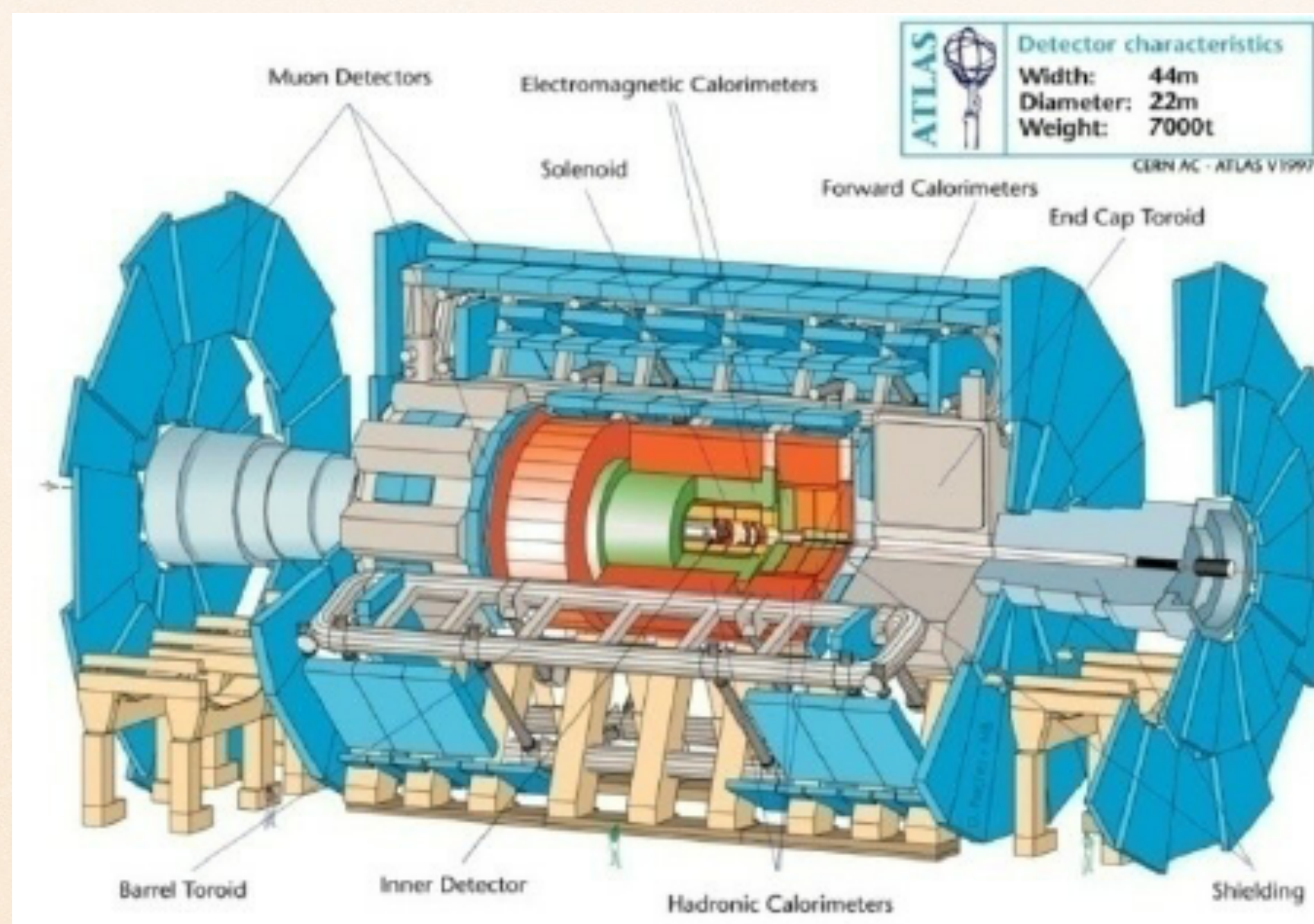
- ❖ **Укупан број честица (N)** = пресек ( $\sigma$ ) \* луминозност (L)
- ❖ Пресек - извесност за интеракцију две честице
  - Има димензије површине, користи се јединица барн ( $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ )
- ❖ Луминозност је мера броја судара у јединици времена по јединици површине
  - Дизајнирана луминозност Великог Хадронског Судараца 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

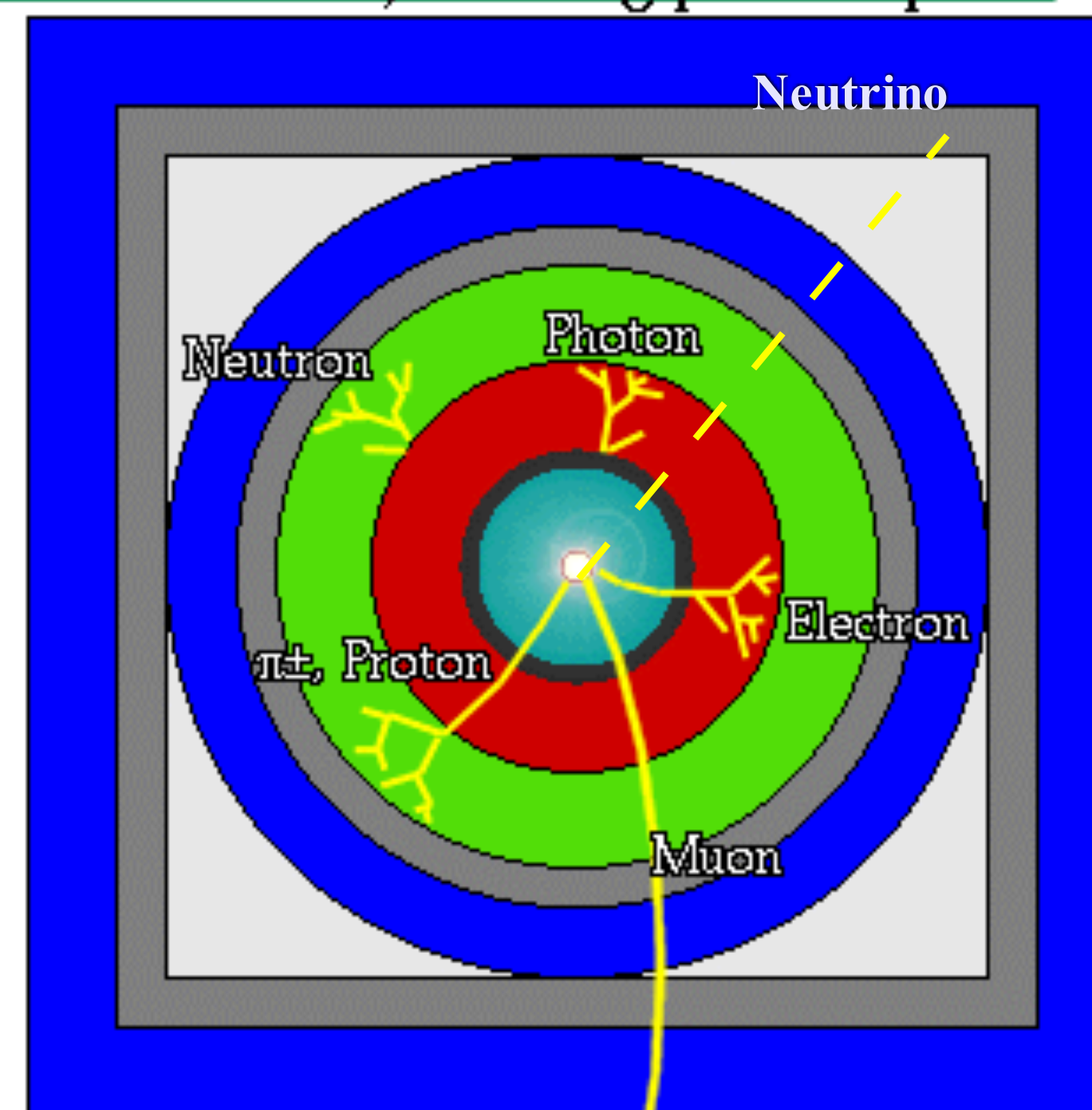
- ❖ Модерни детектори су комплексне машине
- ❖ На основу изгледа сигнала у детектору, идентификујемо честице и догађаје

## ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus



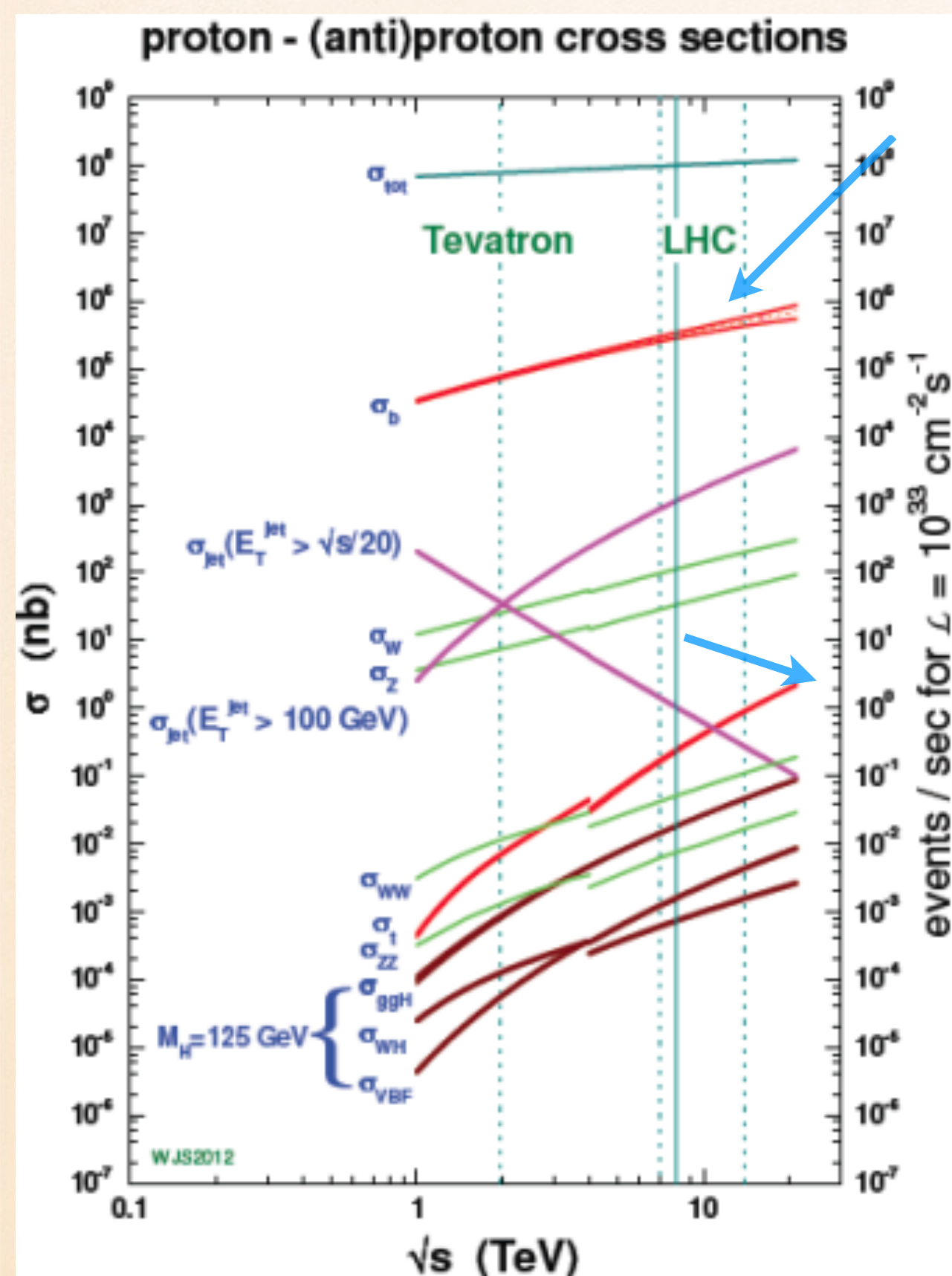
A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



# УКУПАН БРОЈ ДОГАЂАЈА

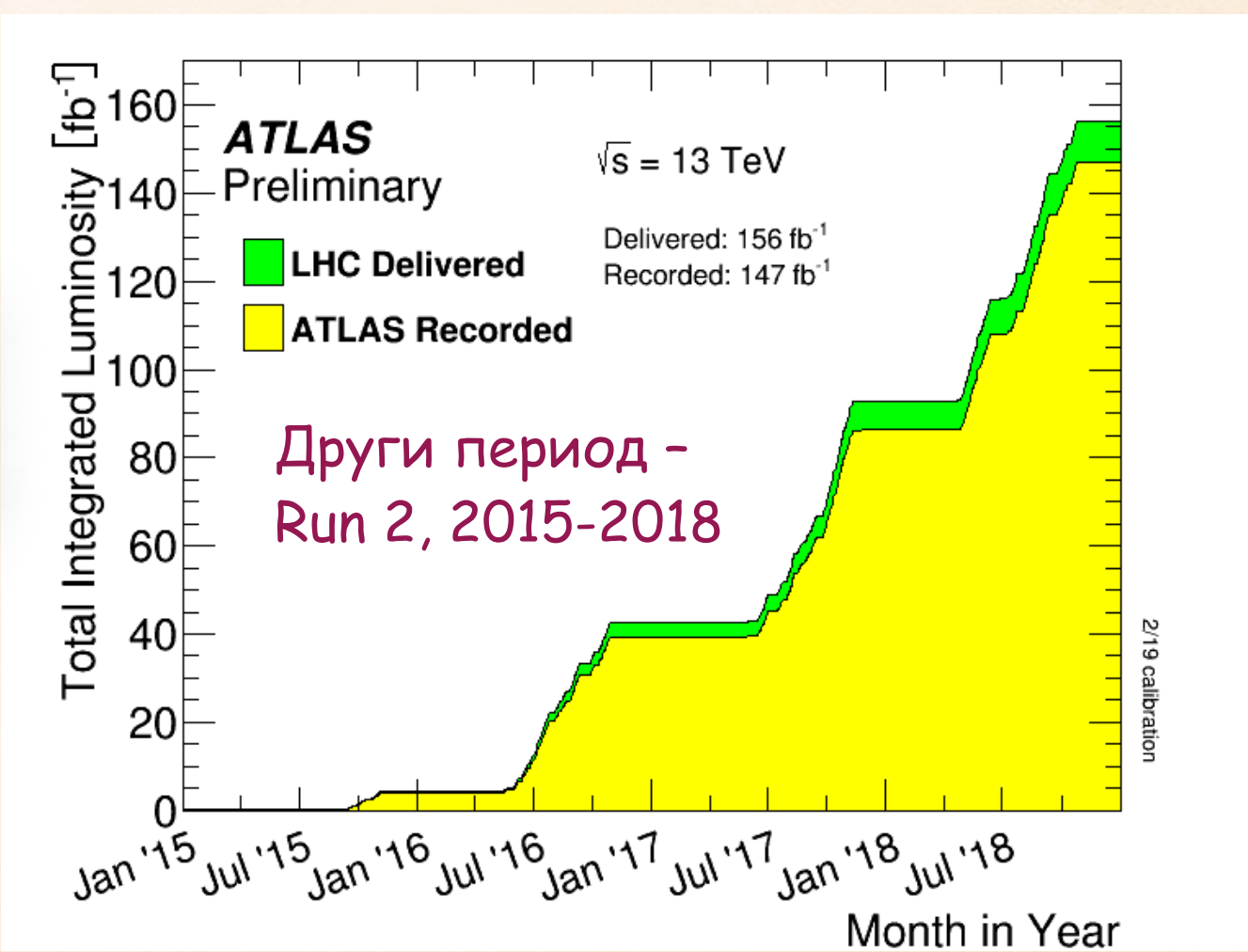
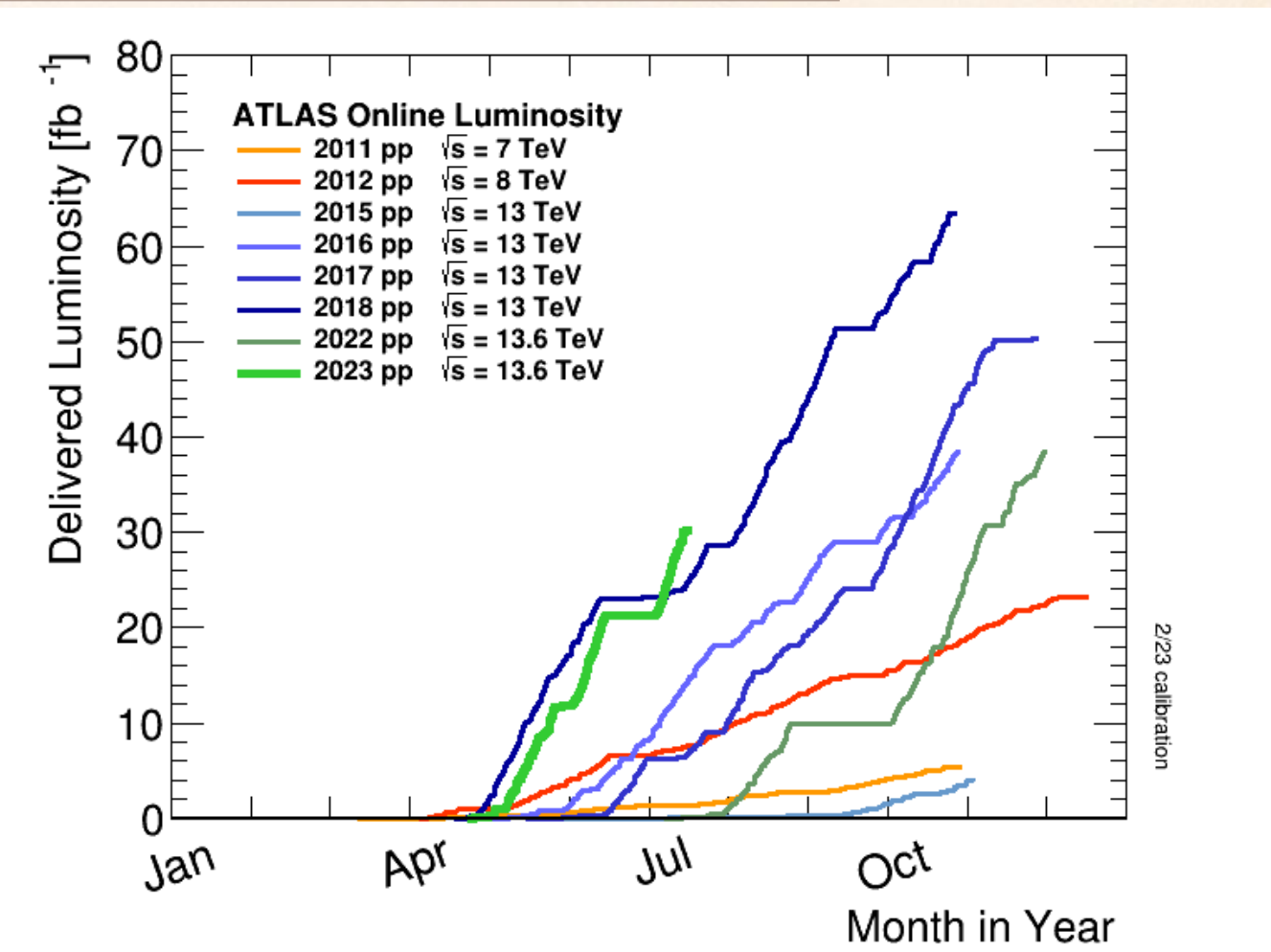
- ❖ Укупан број честица ( $N$ ) = пресек ( $\sigma$ ) \* луминозност ( $L$ )
- ❖ Пресек зависи од енергије снопа



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

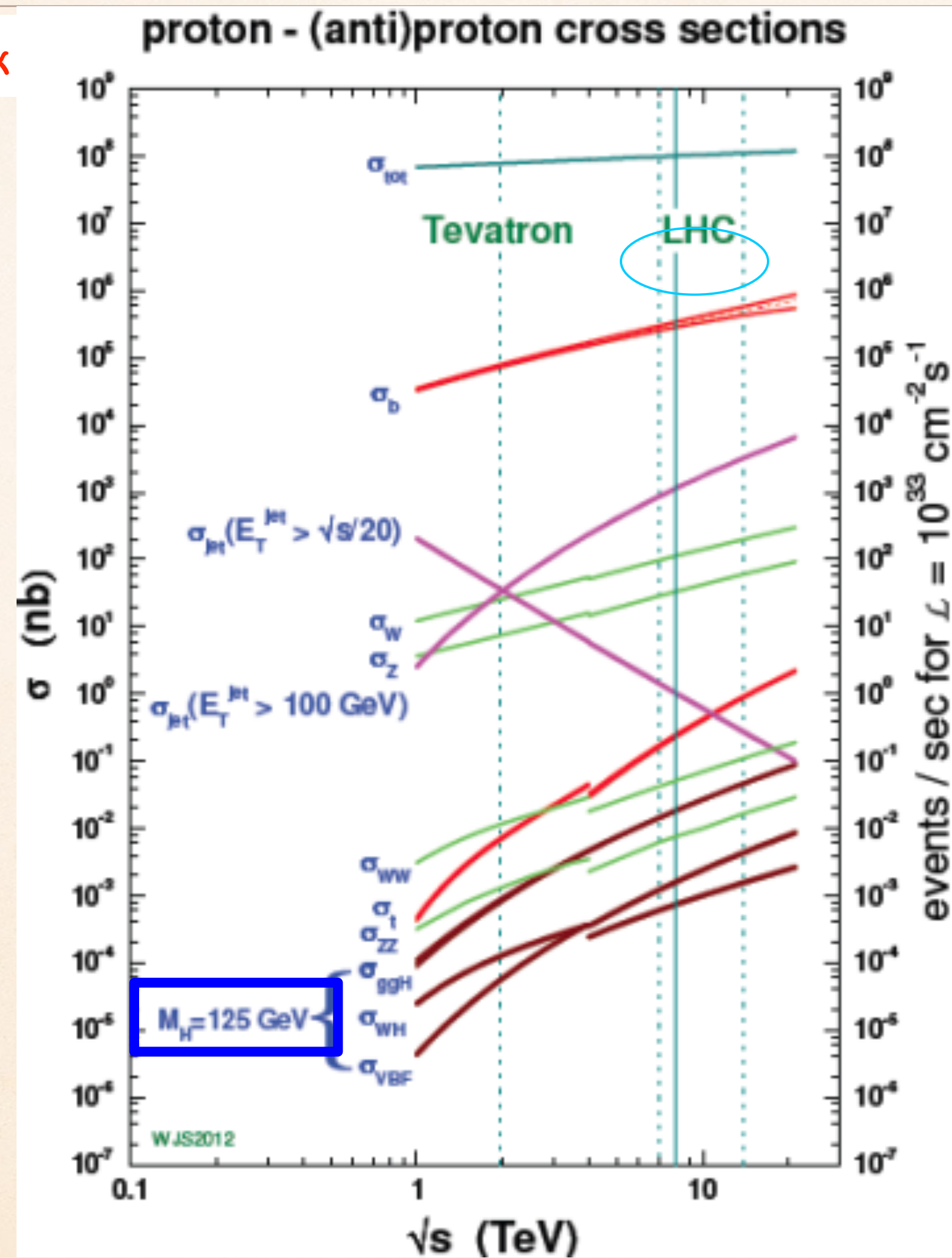
Први период -  
Run 1, 2011-2012  
Други период -  
Run 2, 2015-2018  
Трећи период -  
Run 3, 2022-2025

Добро за анализу Run 2:  
139 fb<sup>-1</sup>



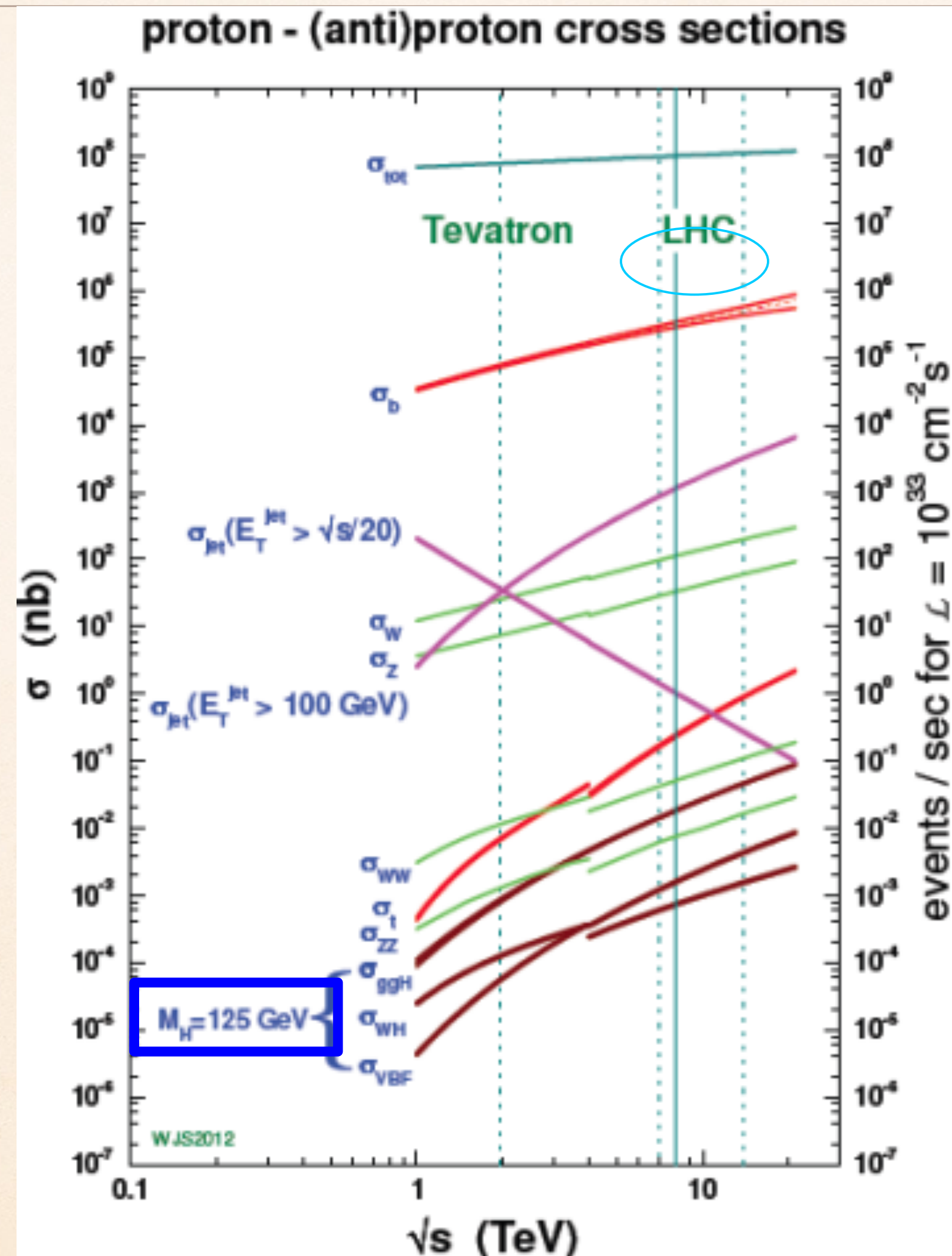
# КАКО ТРАЖИМО ИНТЕРЕСАНТНЕ ДОГАЂАЈЕ

Пресек



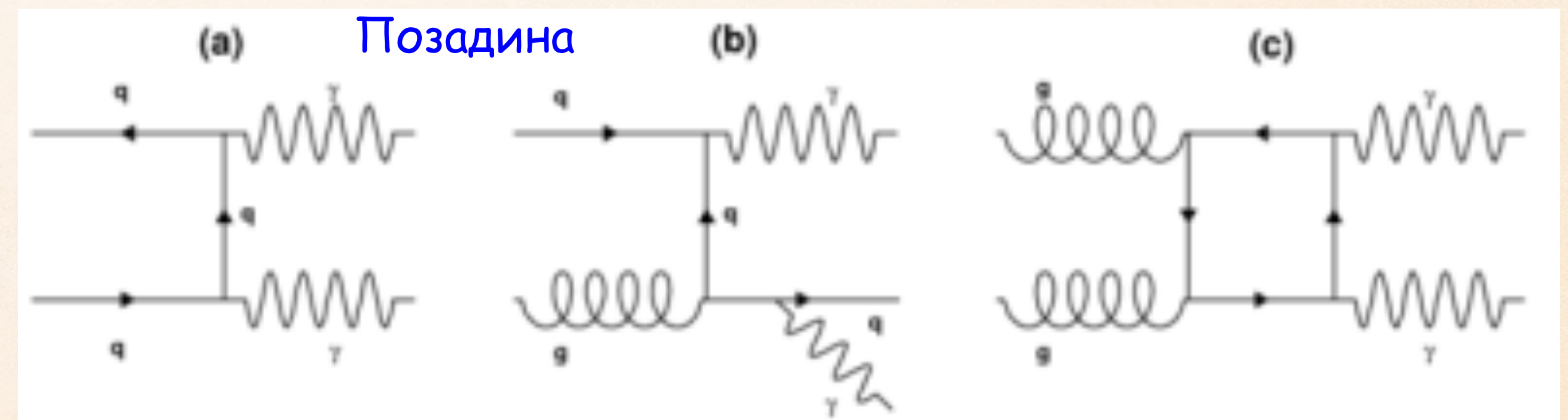
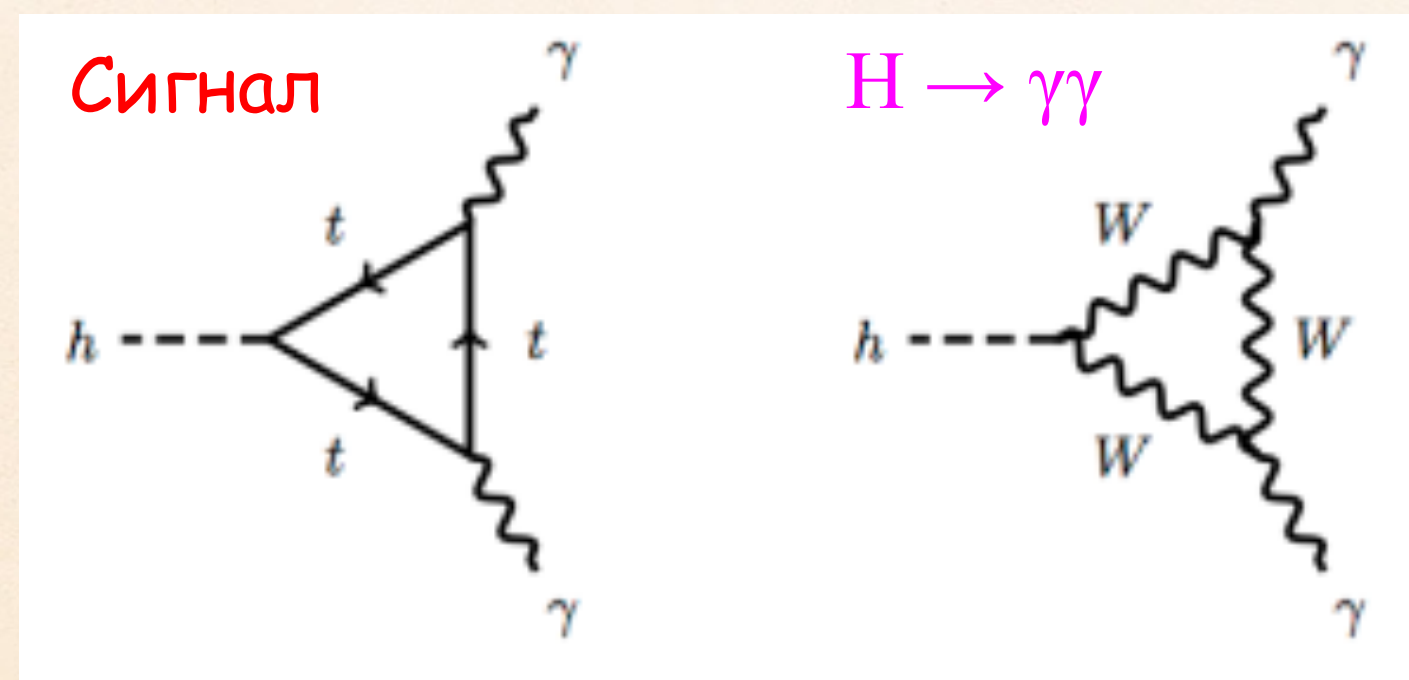
# КАКО ТРАЖИМО ИНТЕРЕСАНТНЕ ДОГАЂАЈЕ

Пресек



# 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



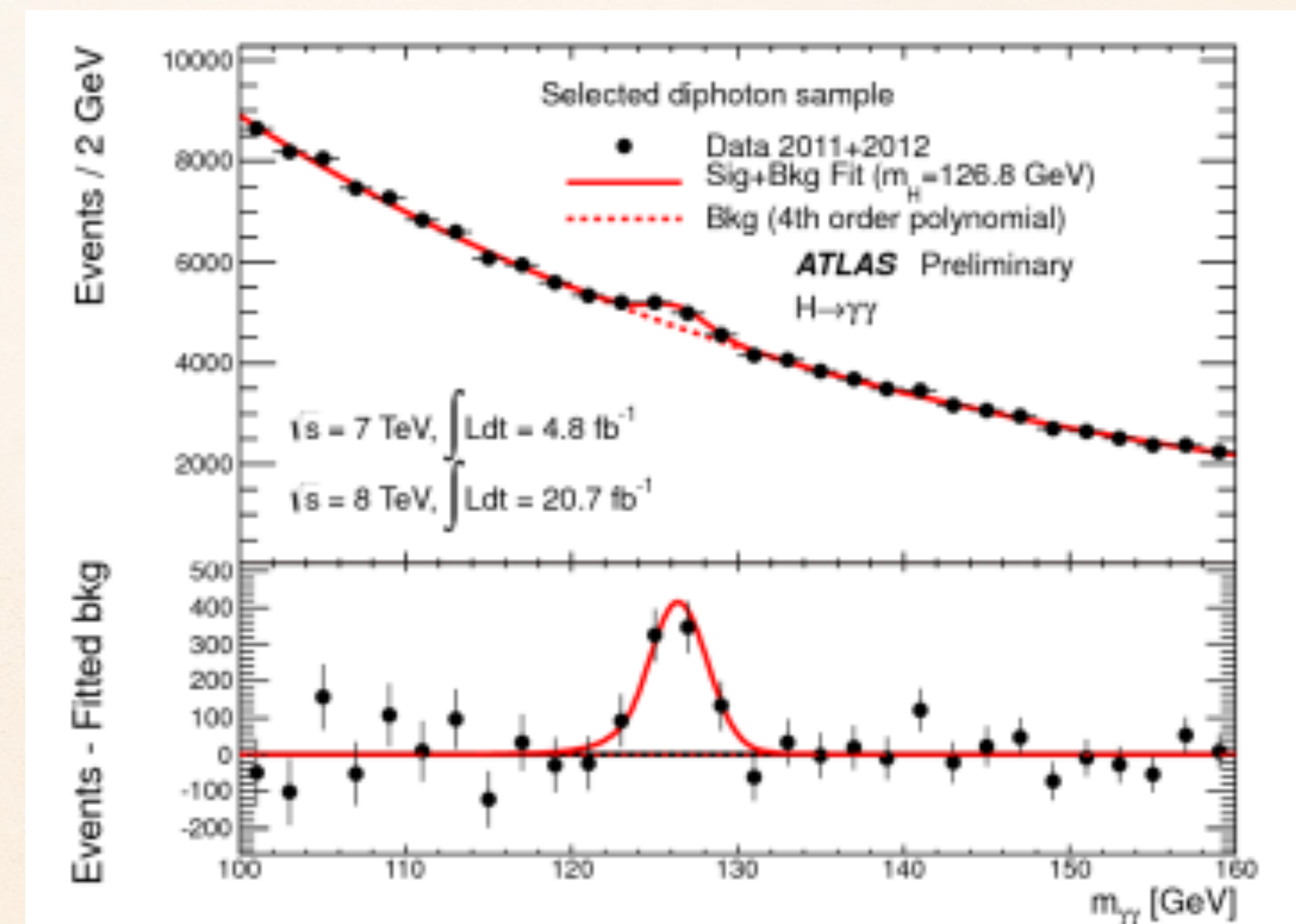
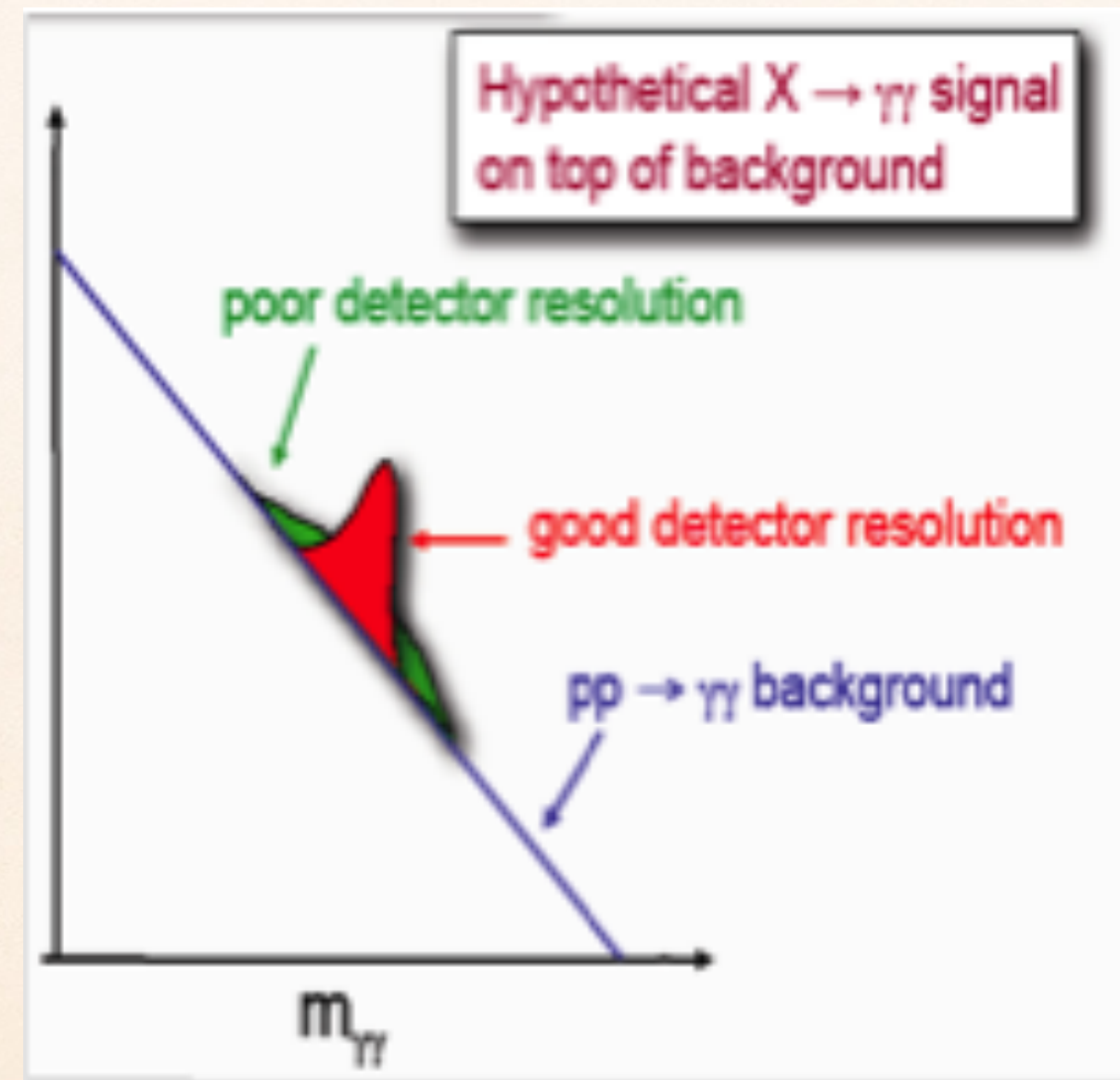


- ❖ Сигнал карактеришу два добро дефинисана фотона која долазе од резонантне честице
  - Може да се реконструише маса резонантне честице
- ❖ Позадина има опадајући спектар масе два фотона

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

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

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



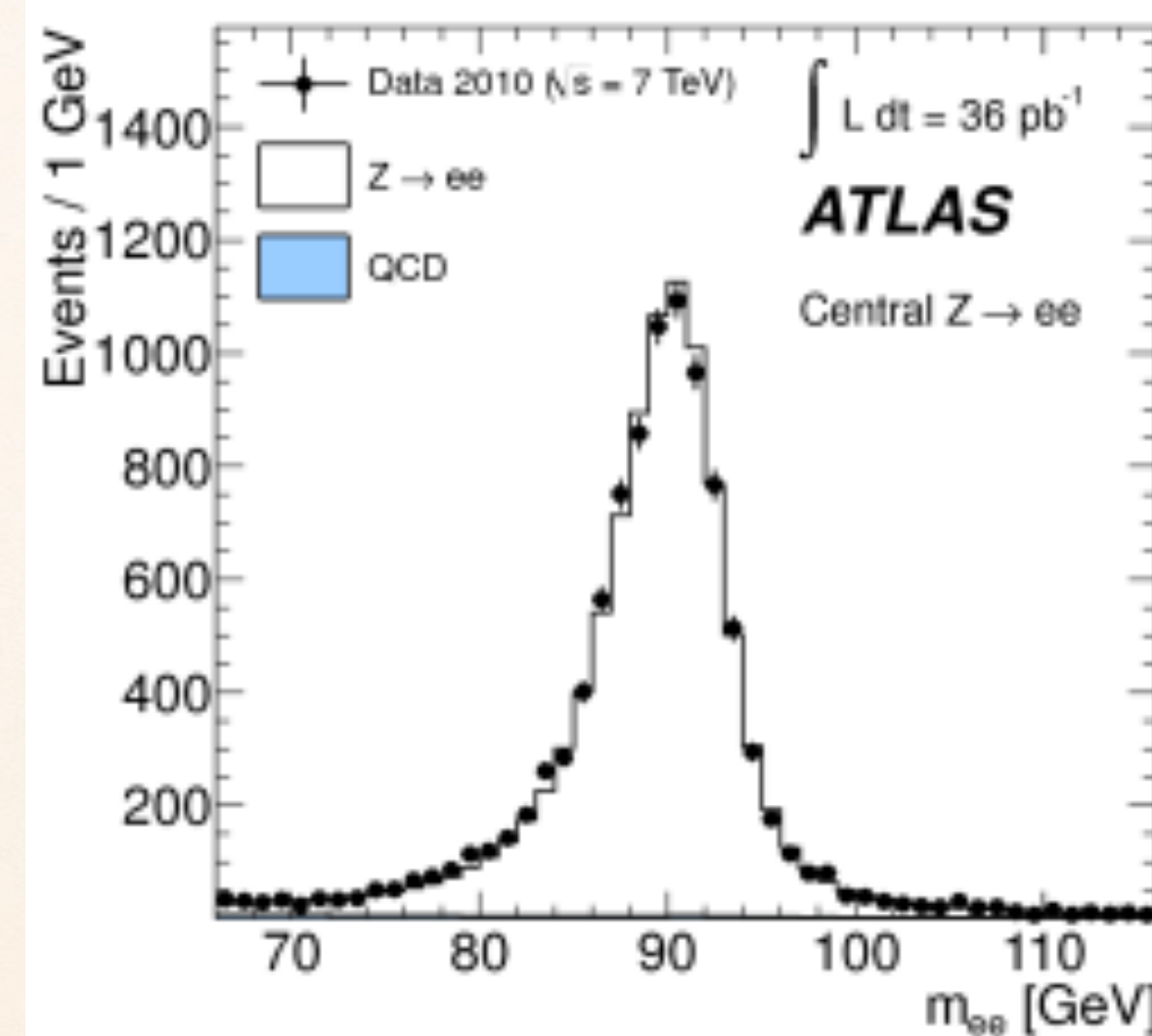
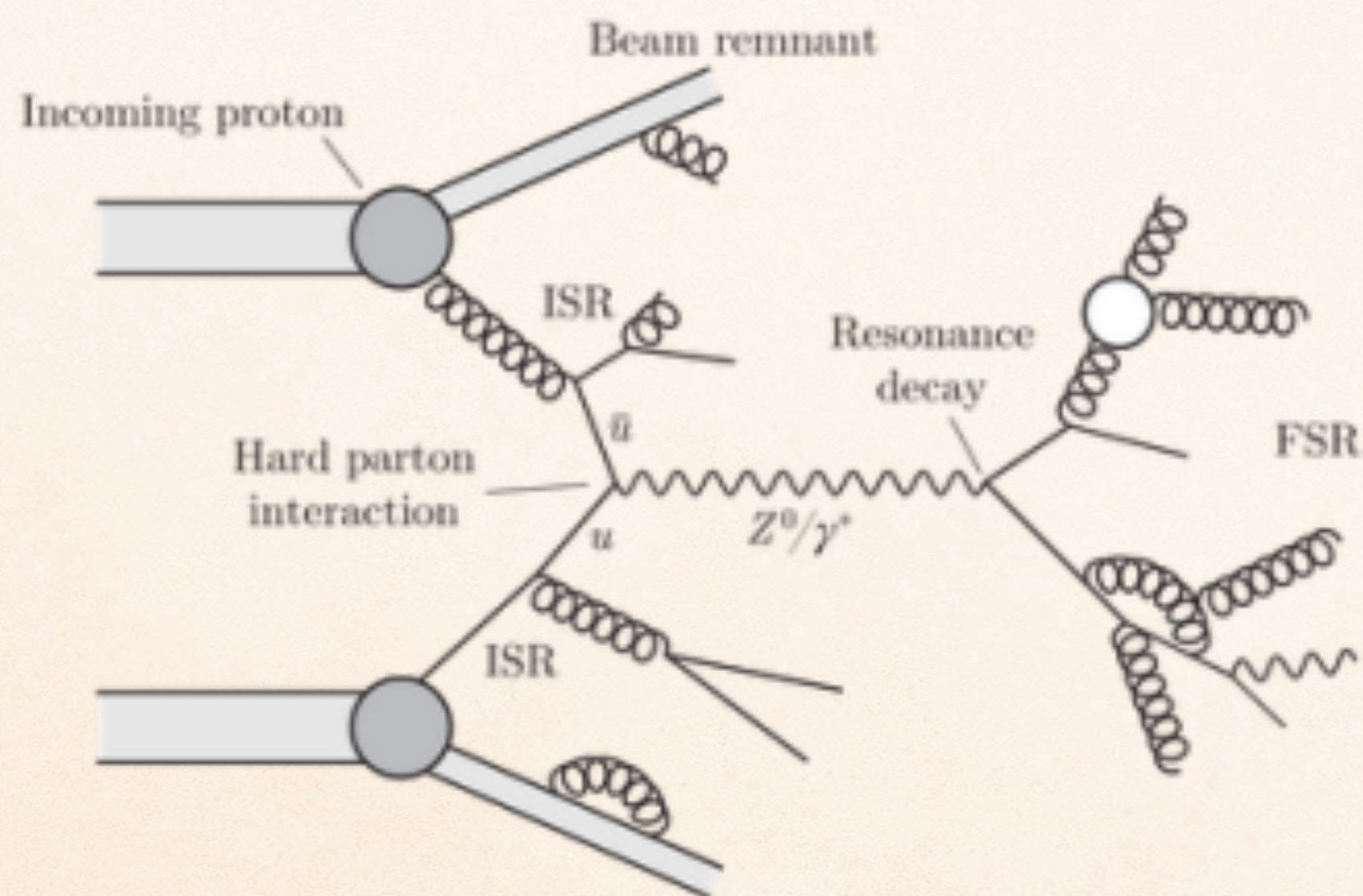
# ШТА МЕРИМО?

Measurement of the inclusive  $W^\pm$  and  $Z/\gamma^*$  cross sections in the  $e$  and  $\mu$  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)

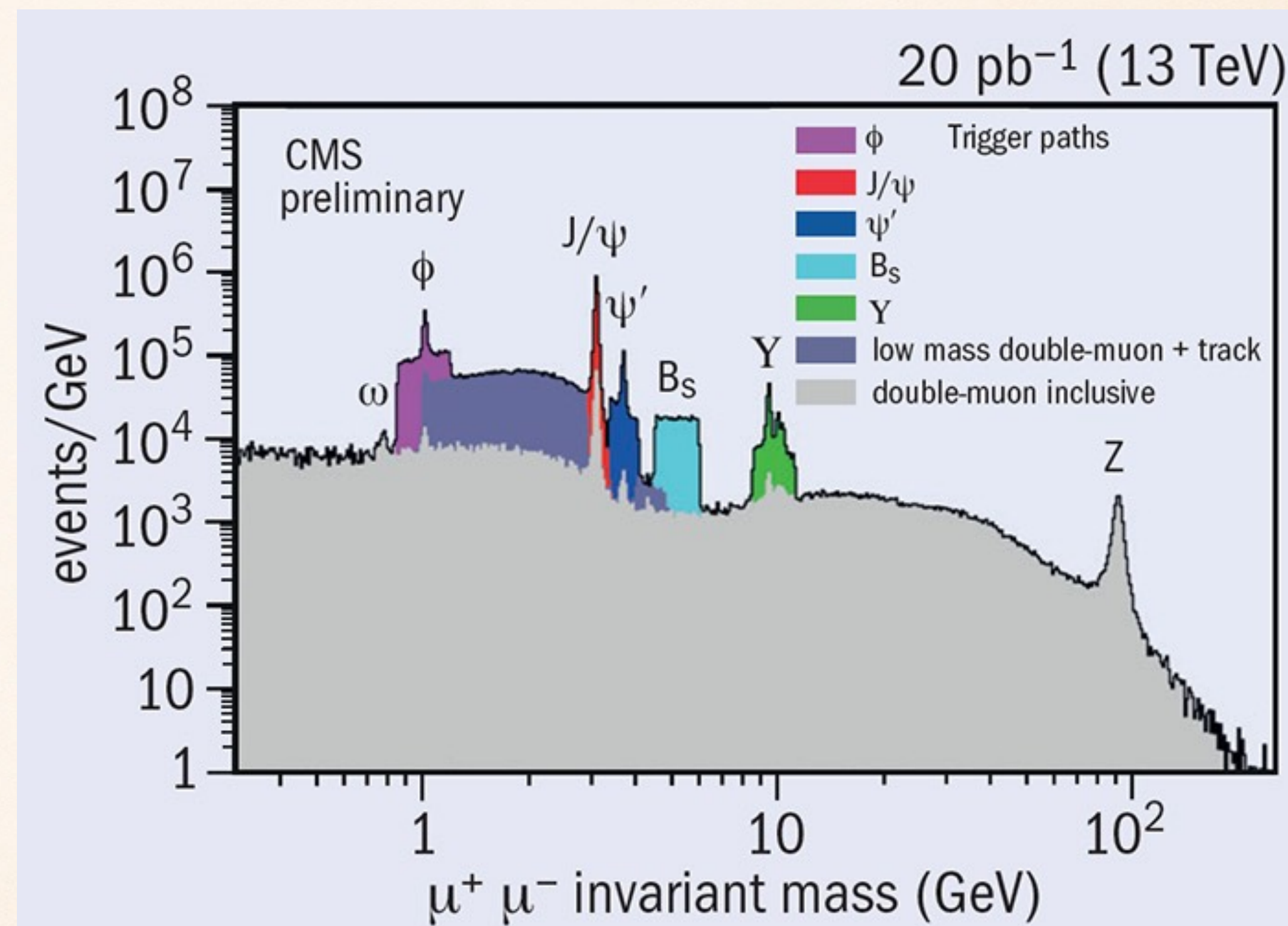
$$m^2(Z) = E^2(Z) - \vec{p}^2(Z) = [E(e_1) + E(e_2)]^2 - [\vec{p}(e_1) + \vec{p}(e_2)]^2$$



- ❖ Процес који нас занима је  $Z \rightarrow ll$  ( $e, \mu$ ), predstavljamo ga pomoću neke osobine, u ovom slučaju mase bosona ( $91 \text{ GeV}$ )

# ШТА МЕРИМО?

- ❖ Шармонијум  $J/\psi$ , везано стање  $c$ -кваркова,  $m=3.1 \text{ GeV}$
- ❖ Ипсилон, везано стање  $b$ -кваркова,  $m=9.5 \text{ GeV}$
- ❖  $Z$  бозон,  $m=91 \text{ GeV}$



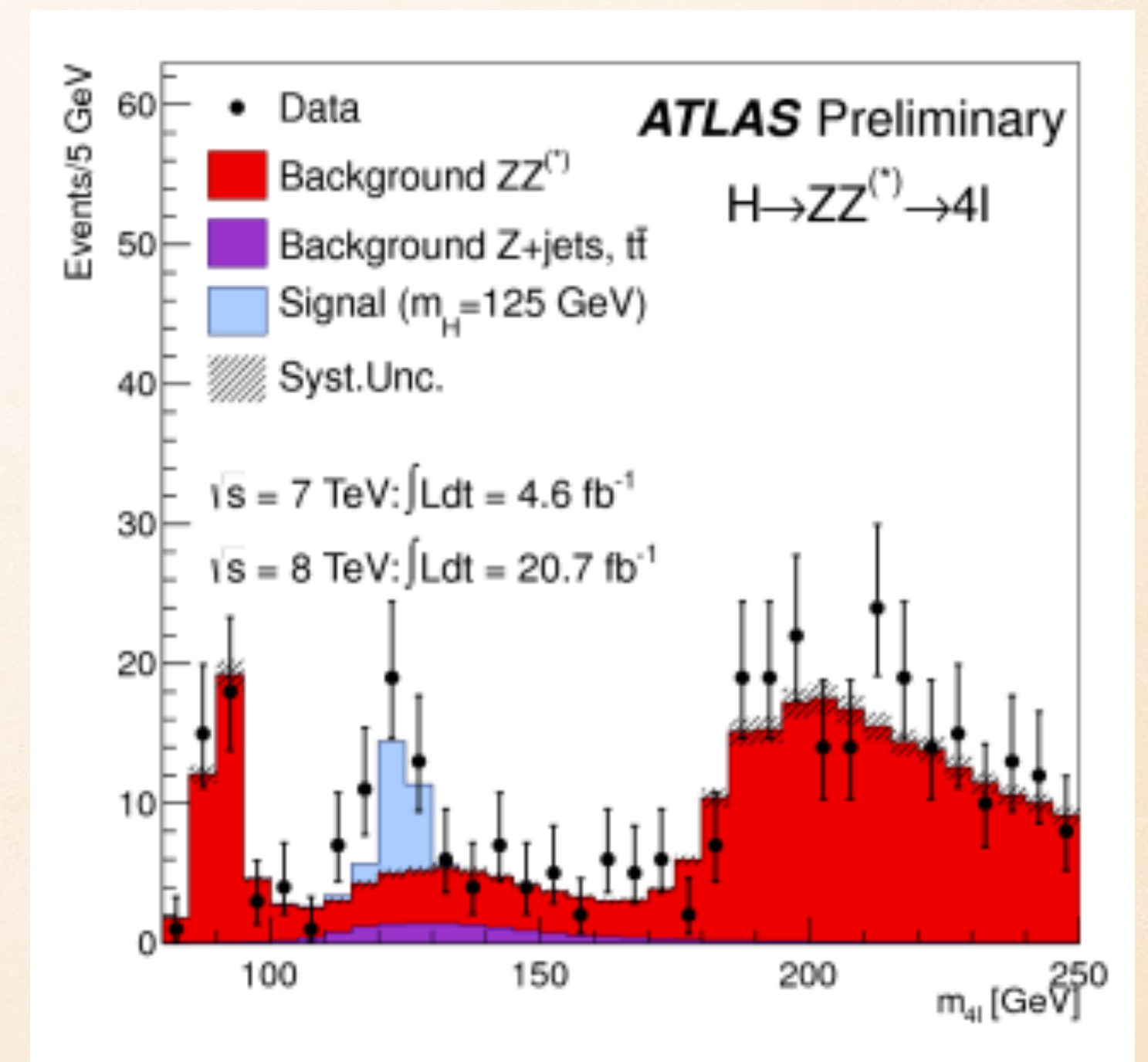
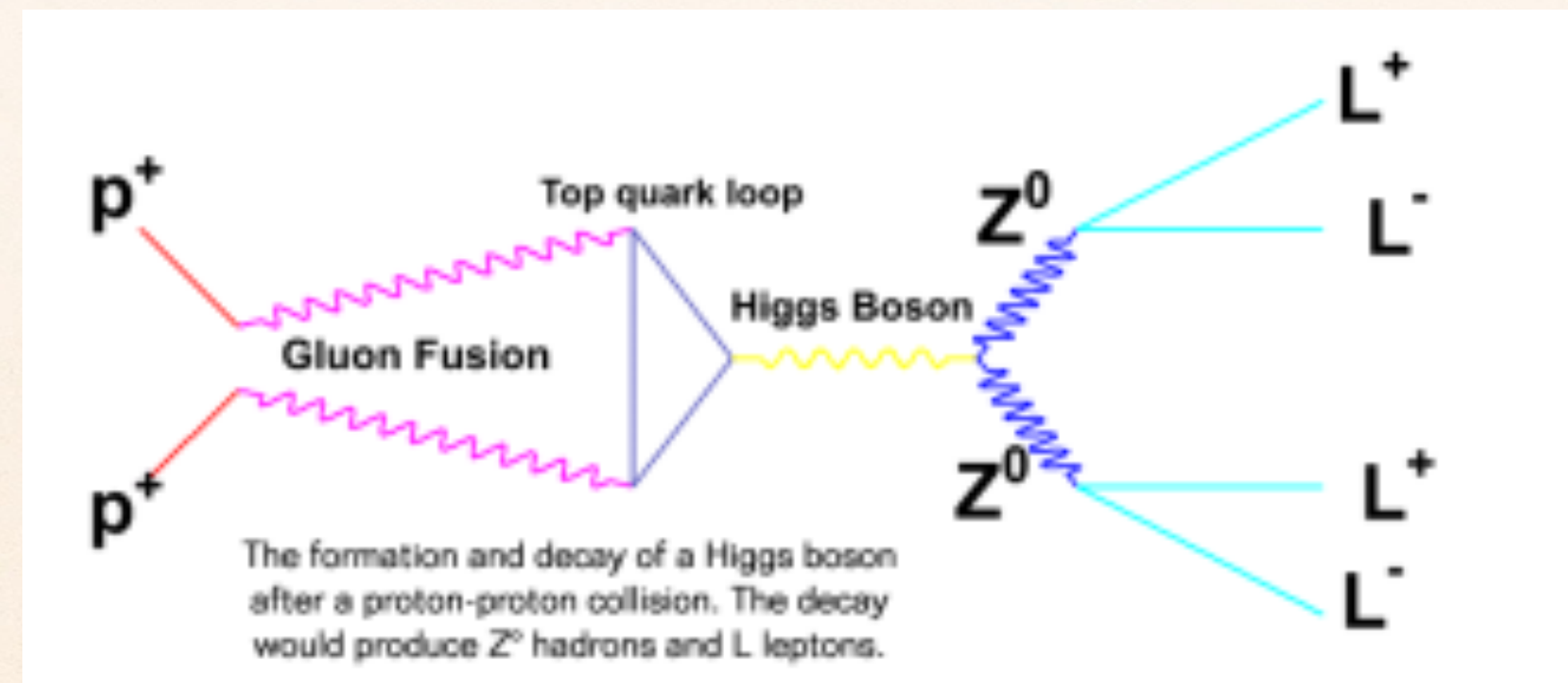
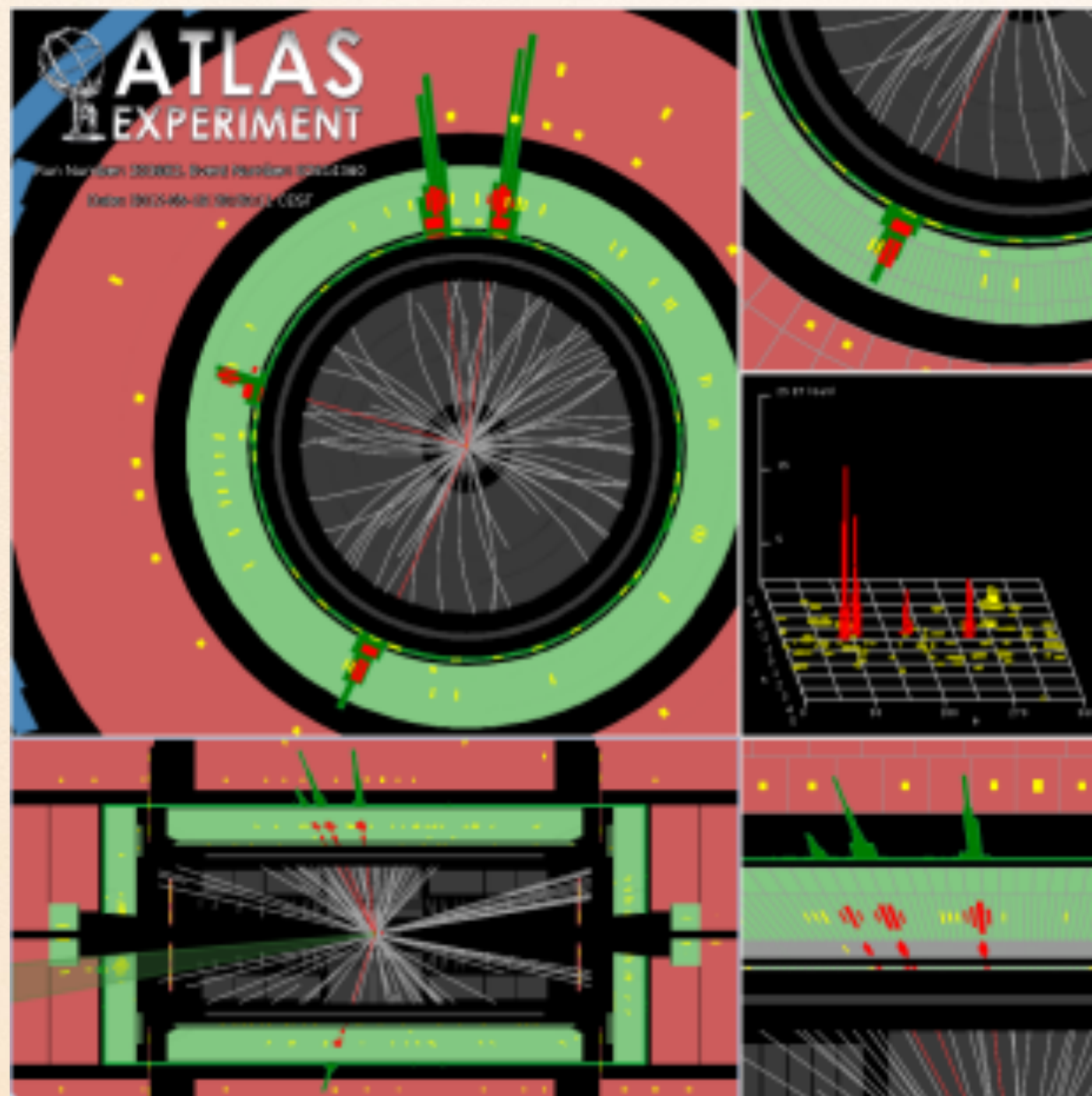
- ❖ Уствари, добићемо цео спектар честица са два лептона у коначном стању

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



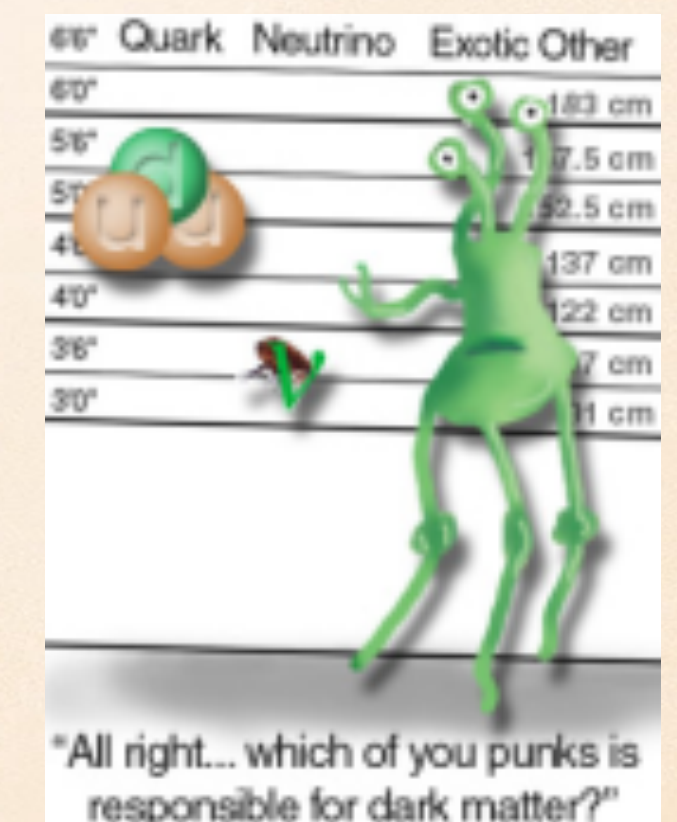
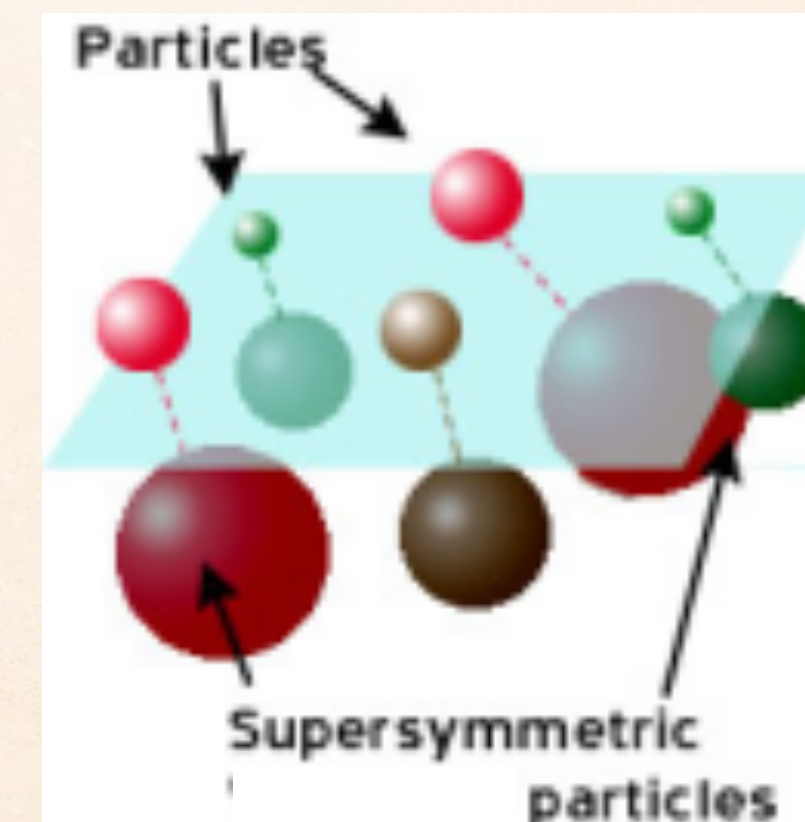
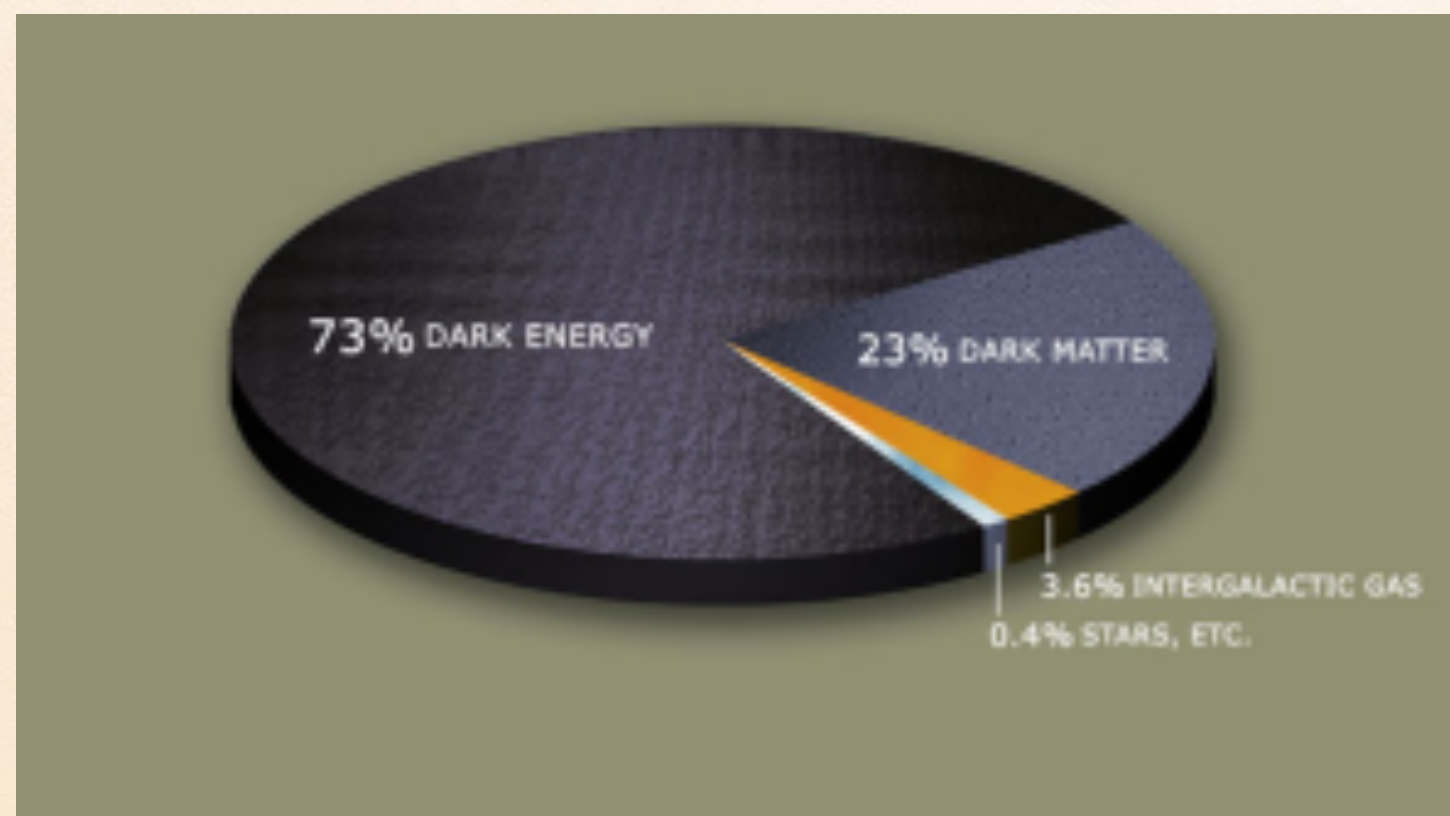
# ХИГСОВ БОЗОН, $H \rightarrow ZZ$

- ❖ 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



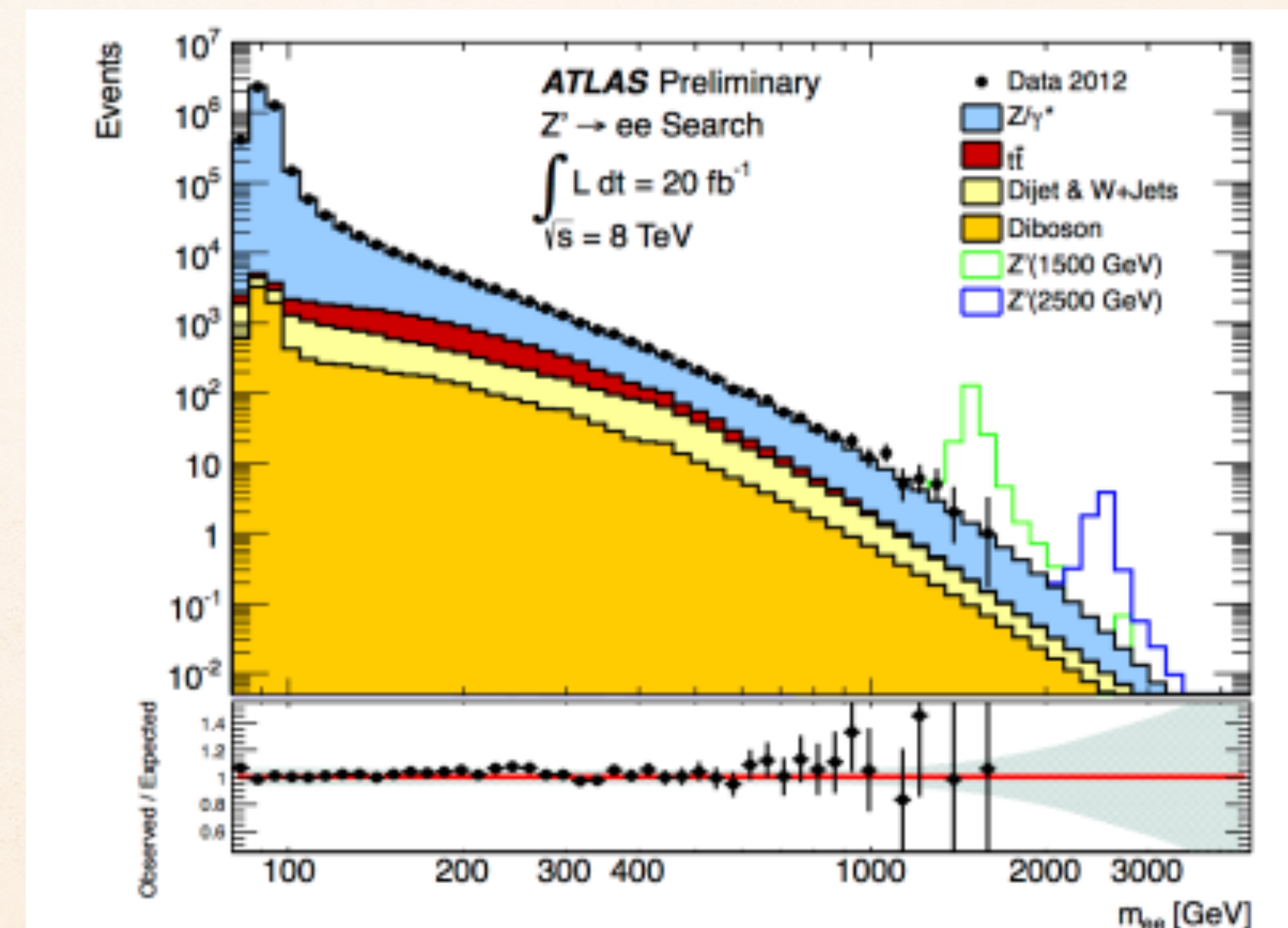
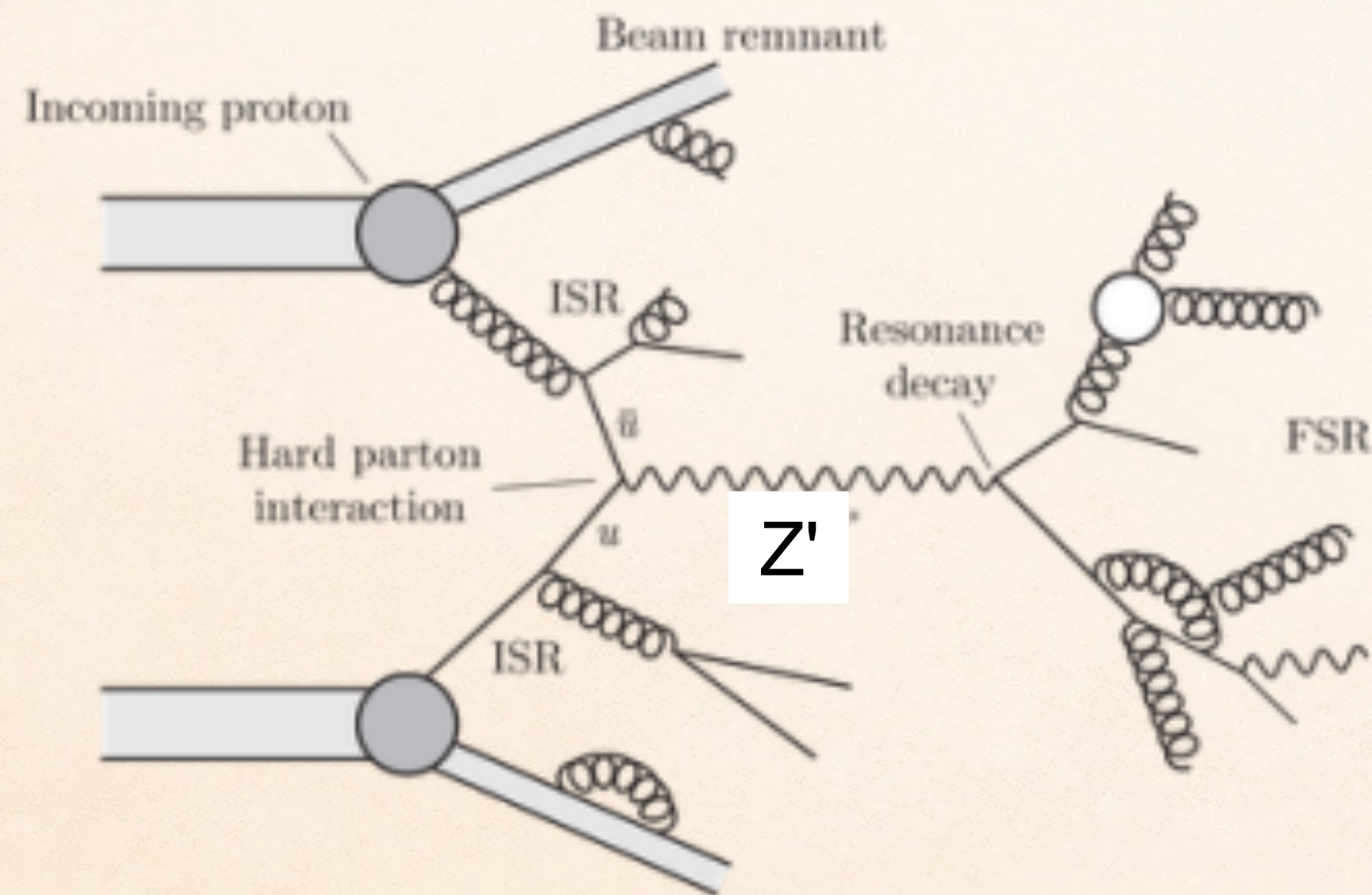
# ФИЗИКА ИЗВАН СТАНДАРДНОГ МОДЕЛА

- ❖ 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



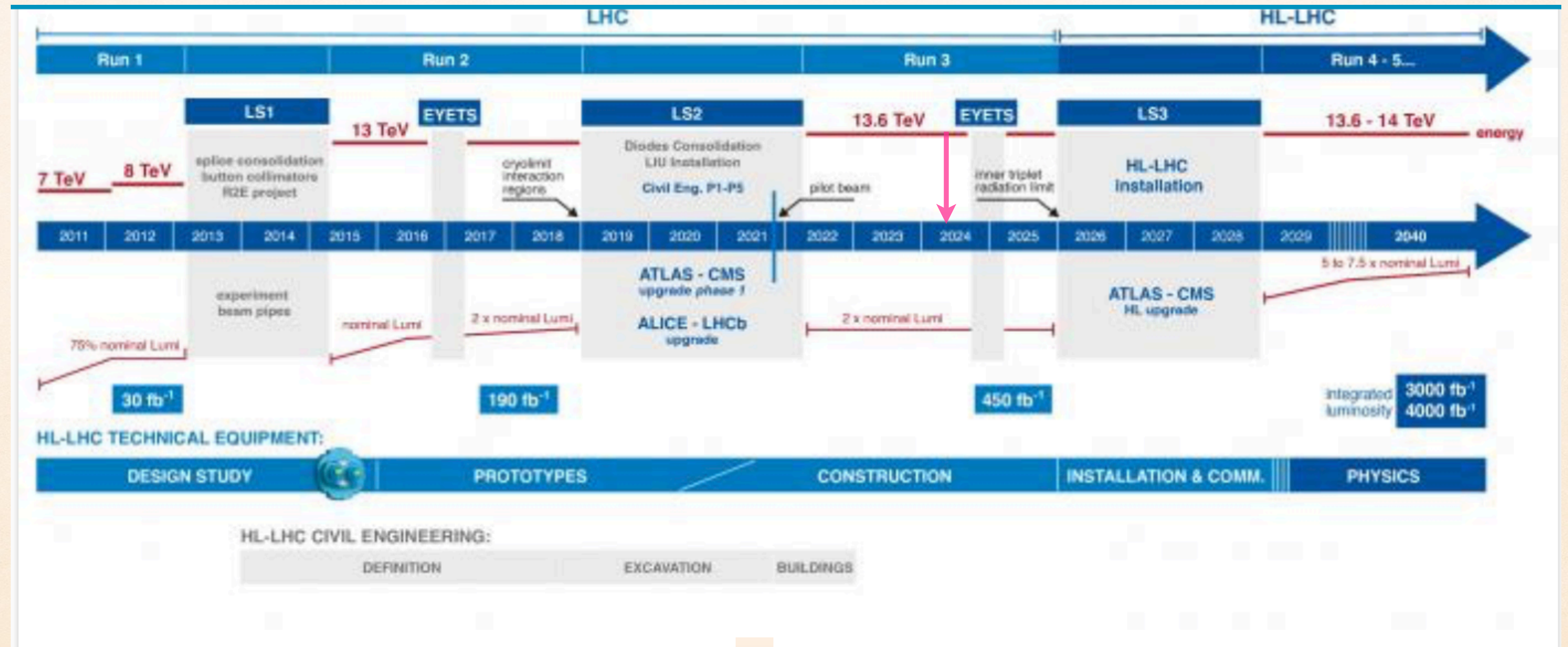
# ПОТРАГА ЗА ЧЕСТИЦАМА ВАН СТАНДАРДНОГ МОДЕЛА - Z' БОЗОН

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



# УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

❖ Још око 20 година истраживања је пред нама



# НАШИ ПРОГРАМИ

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



*CERN Teachers Programs*

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

❖ Питања: [lidiaz@ipb.ac.rs](mailto:lidiaz@ipb.ac.rs)

<http://www.physicsmasterclasses.org>



*Студентски програми*

<https://careers.smartrecruiters.com/CERN/students>

*За средњошколце*

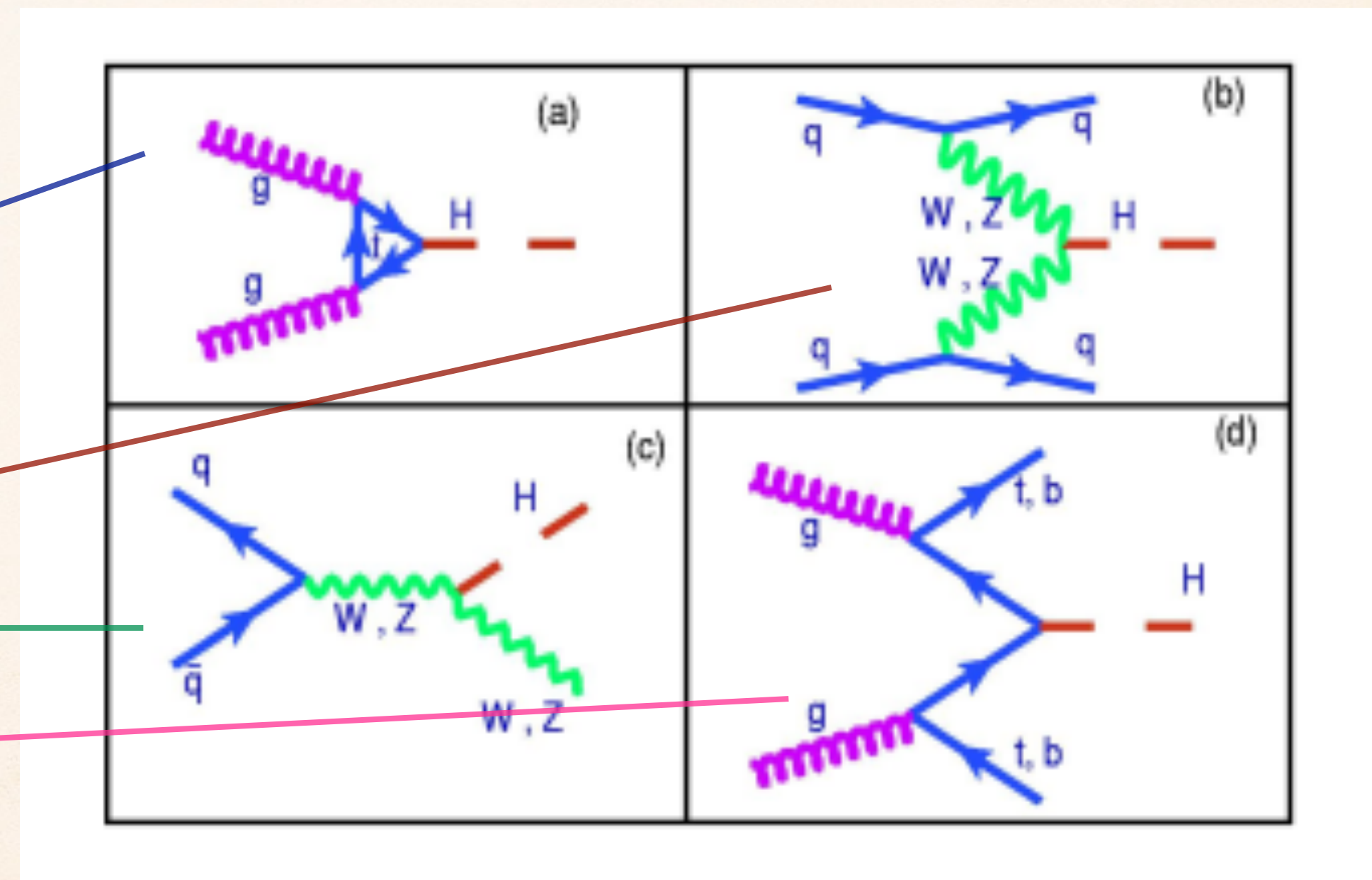
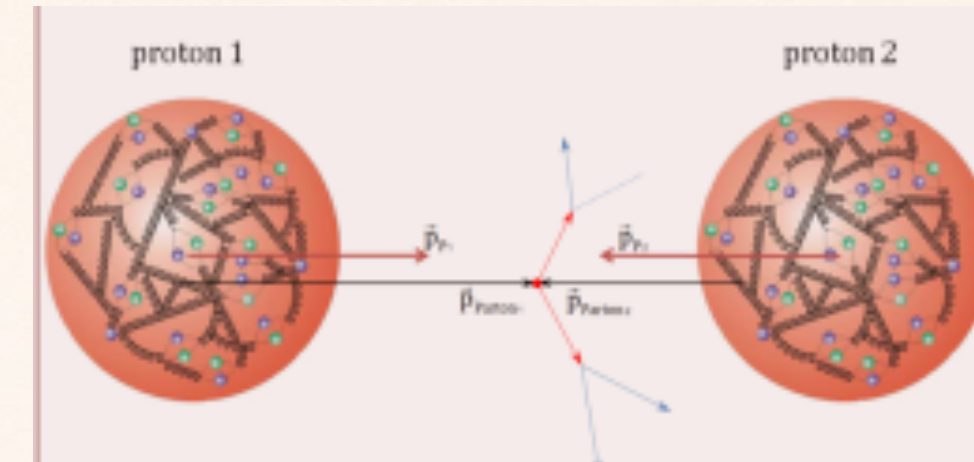
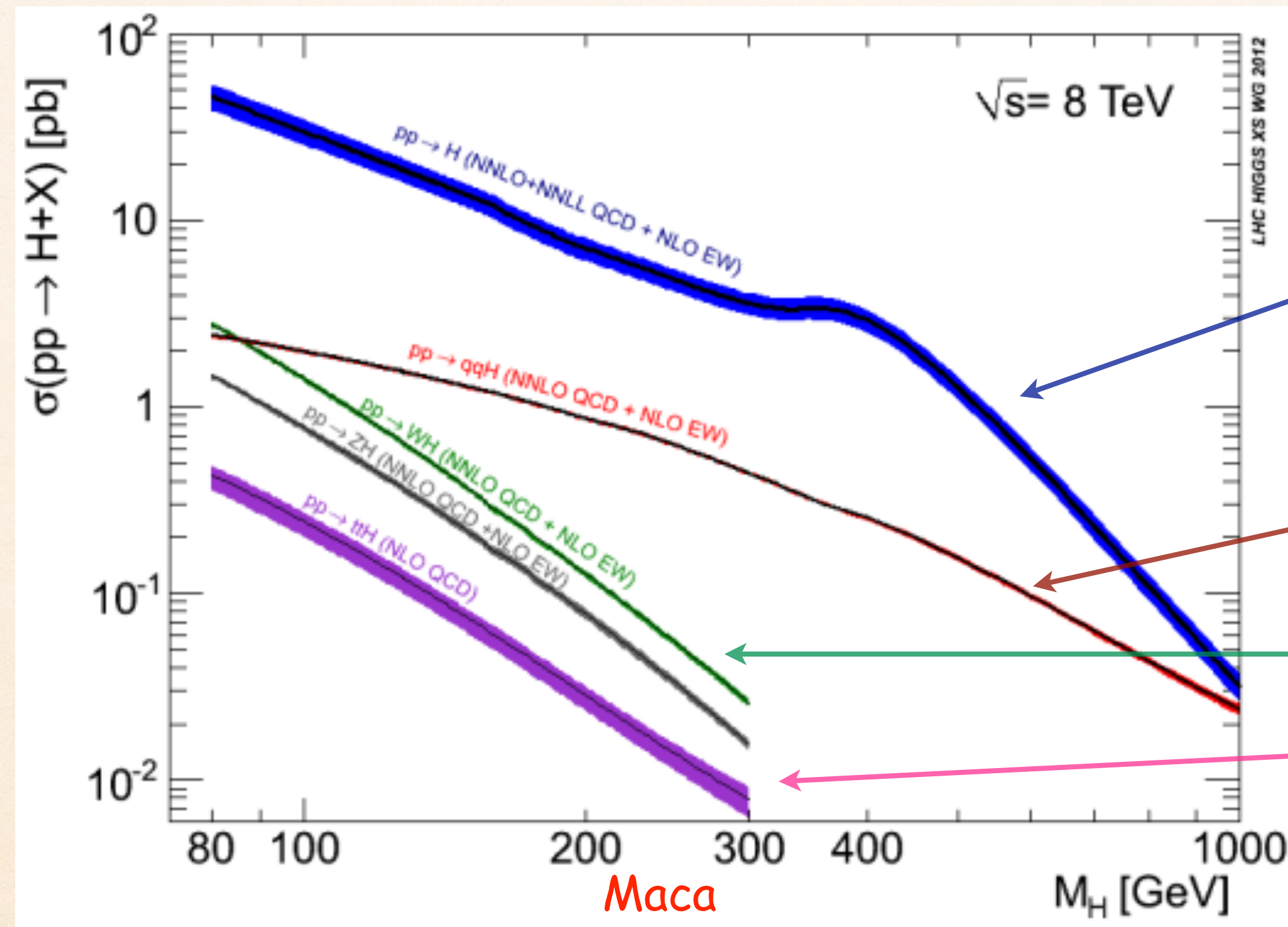
<https://internship-portal.web.cern.ch/>

*За средњошколце и наставнике*

ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ

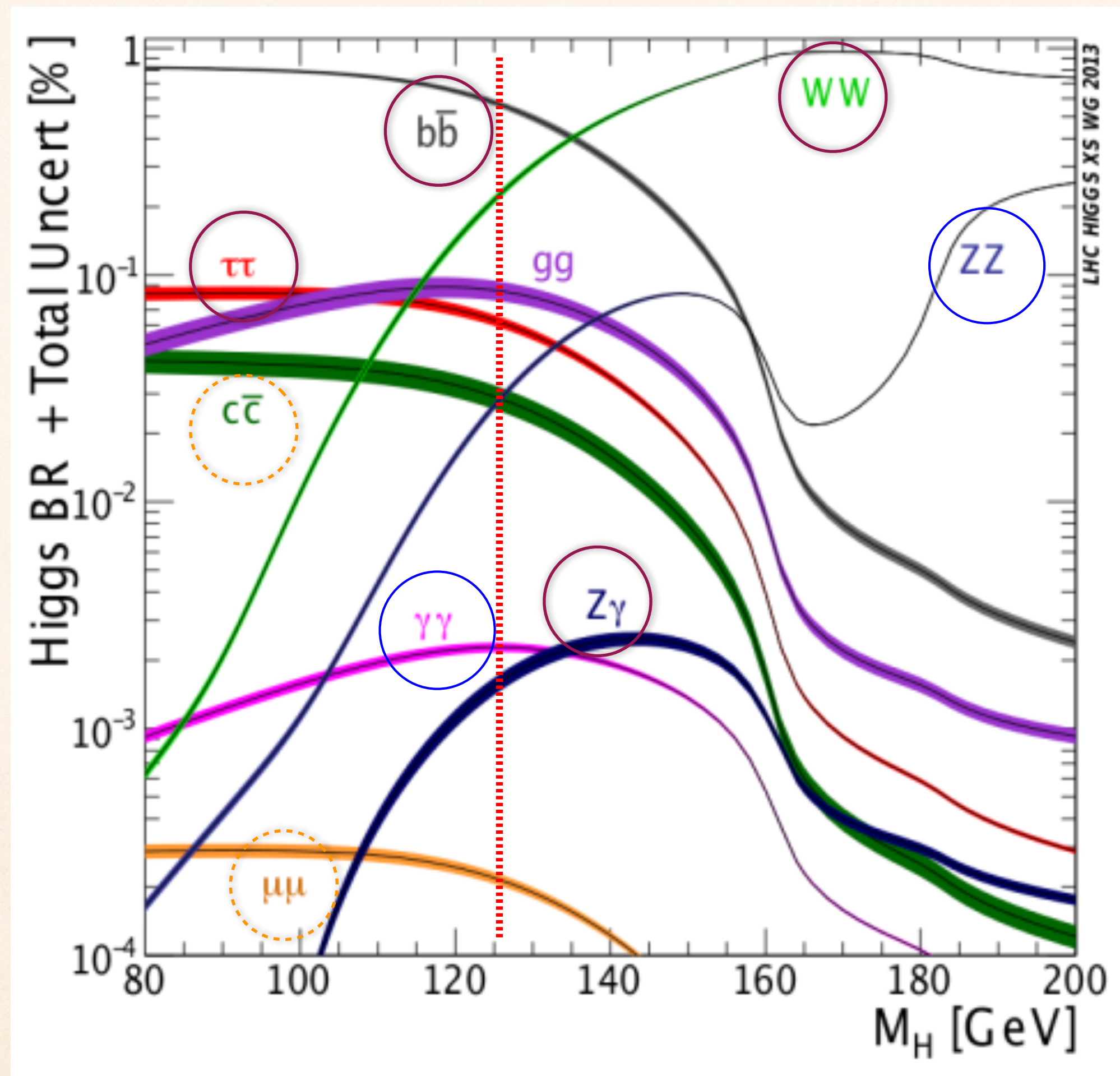
# ДА СЕ ВРАТИМО НА ХИГСА - ПРОДУКЦИЈА...

Пресек



# ... И РАСТПАД ХИГСОВОГ БОЗОНА

Вероватноћа  
за распад



Откриће  
Досада виђен  
Потрага

Маса