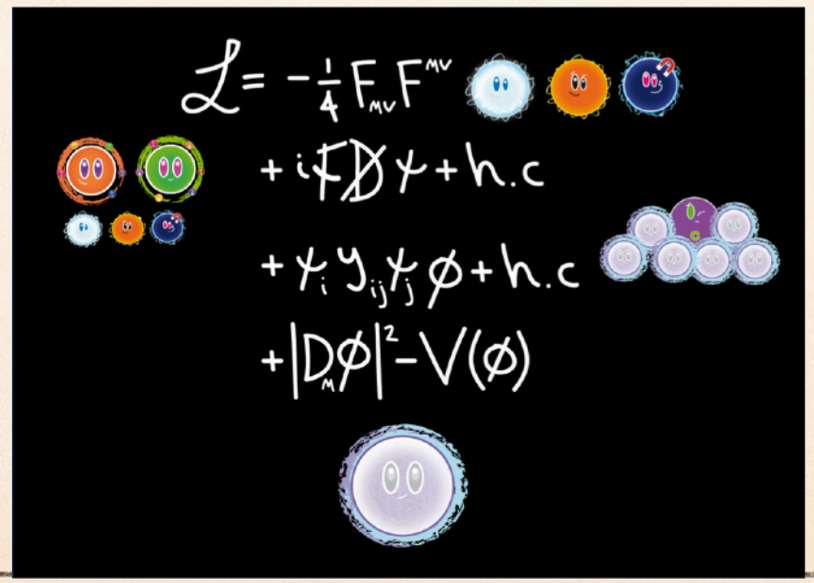
ЦЕРН-ов програм за средњошколце

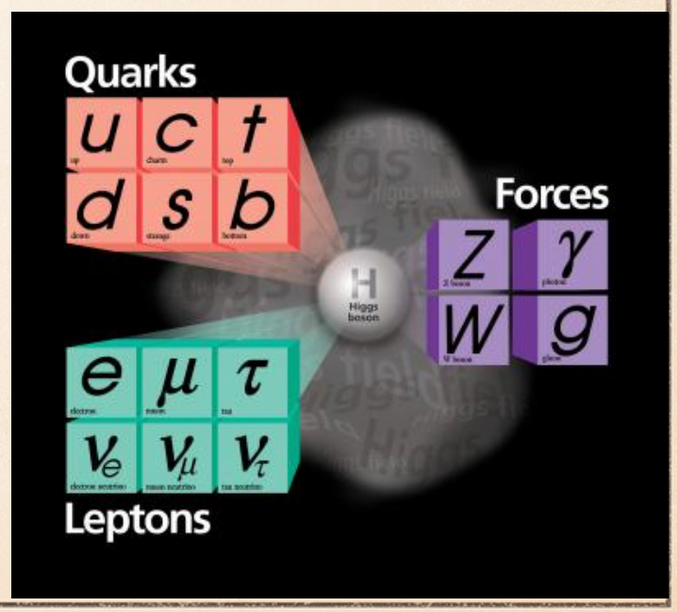
17. март 2022

КАКО ДО ХИГСА И ДРУГИХ ОТКРИЋА

Лидија Живковић

Институт за Физику, Београд



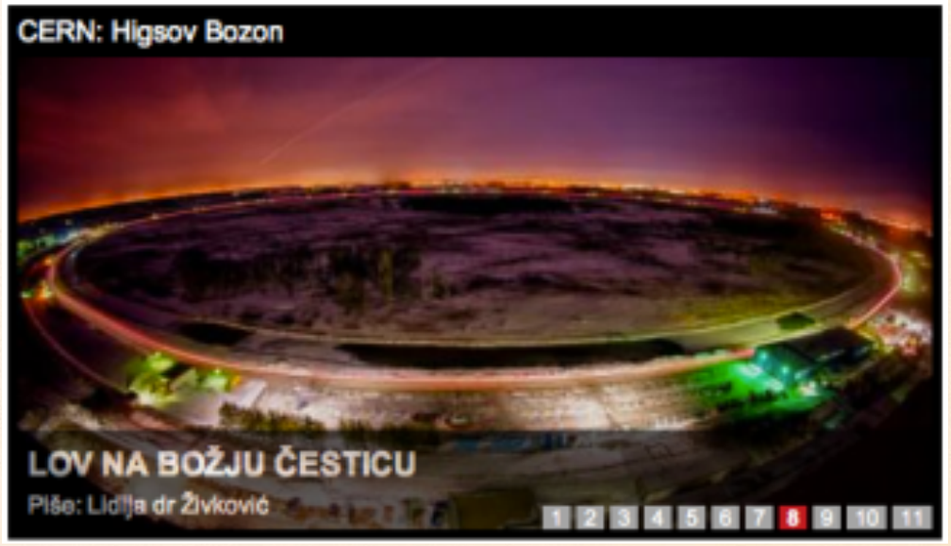


НОВА ЧЕСТИЦА

- У јулу 2012 ударна вест на свим светским медијима била је из науке, физике

  → Откривена је нова честица – Хигсов бозон

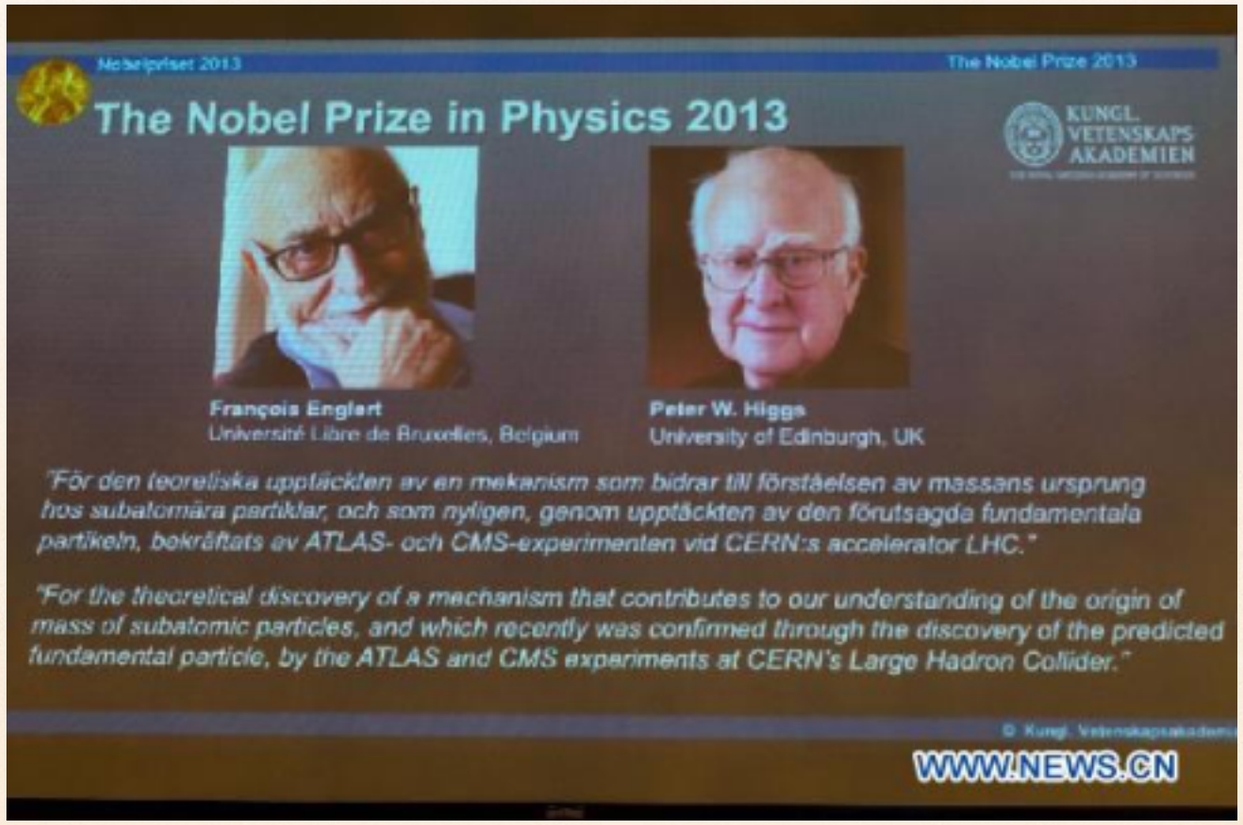
- Резултати су објављени у Церну уз директан пренос који су пратили научници широм света



НОБЕЛОВА НАГРАДА ЗА ФИЗИКУ 2013

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

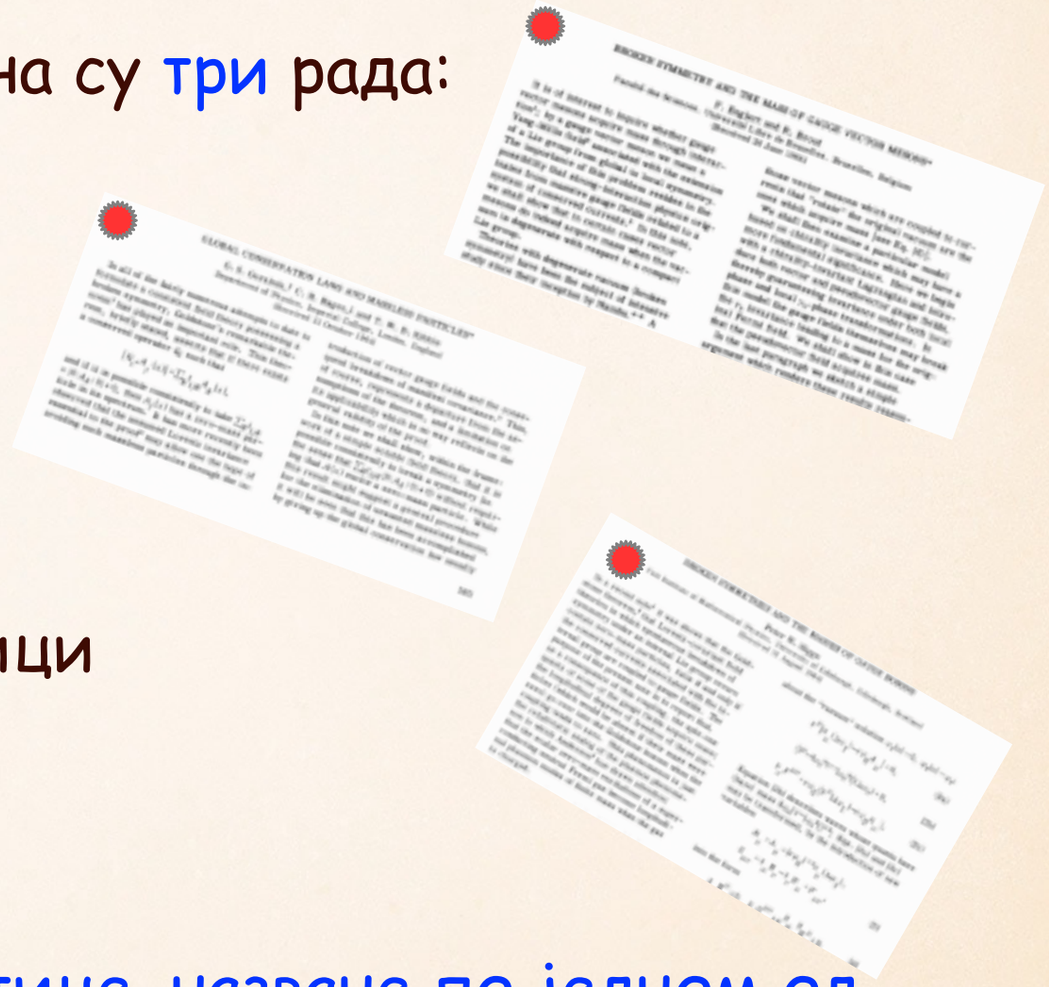
Франсоа Англер



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

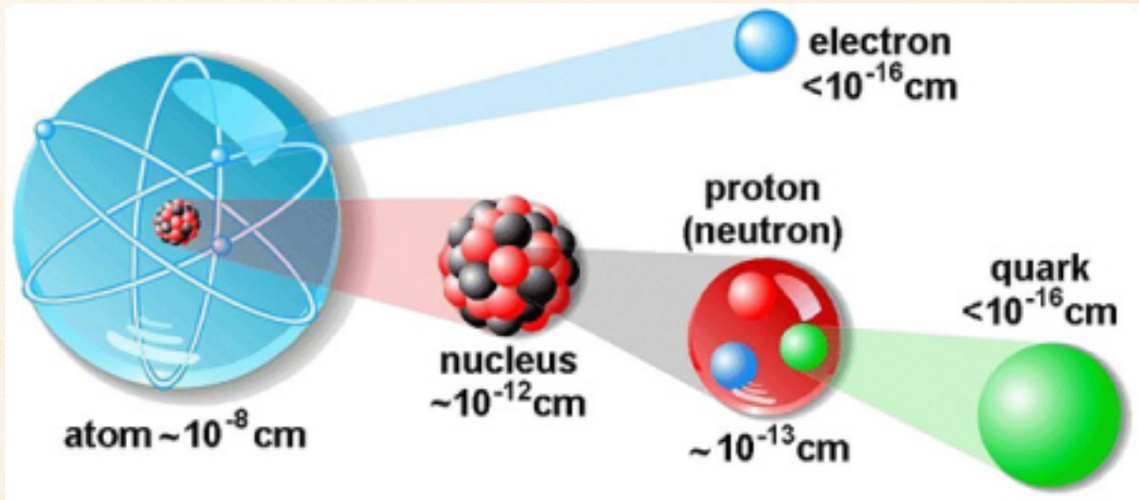


- Радови представљају револуцију у физици елементарних честица
  - Објашњавају порекло масе
  - Предвиђају постојање још једне честице, назване по једном од аутора, Хигсов бозон (или БЕХ, или БЕГХКХ)
- Позната је и као "Божија честица", "кум" је Леон Ледерман, предложио је "Проклета честица" - "God~~damn~~ 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 → ἄτομον (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



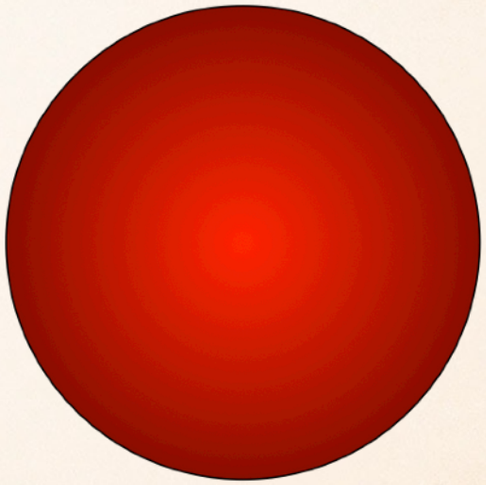
ШТА СУ ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ?

- Елементарне честице су основни делићи материје

Три копије - "генерације"

Кваркови

Up Quark	Charm Quark	Top Quark
~ 0.002 GeV	1.25 GeV	175 GeV
Down Quark	Strange Quark	Bottom Quark
~ 0.005 GeV	~ 0.095 GeV	4.2 GeV



These are relative masses not size – they have no measurable size

Лептони

Electron	Muon	Tau
0.0005 GeV	0.105 GeV	1.78 GeV
Electron Neutrino	Muon Neutrino	Tau Neutrino
~ 0	~ 0	~ 0

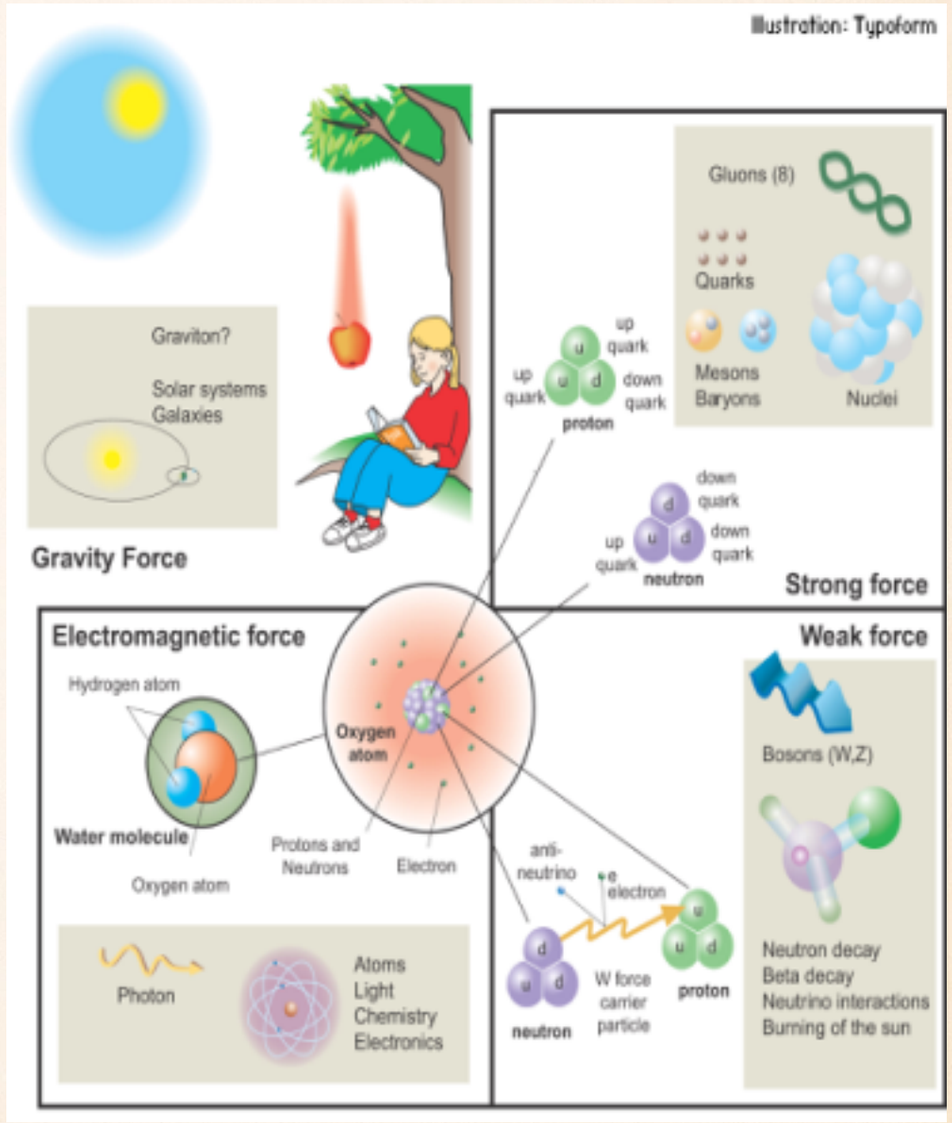
Originally thought to be massless but now not

For reference:

Proton
0.938 GeV

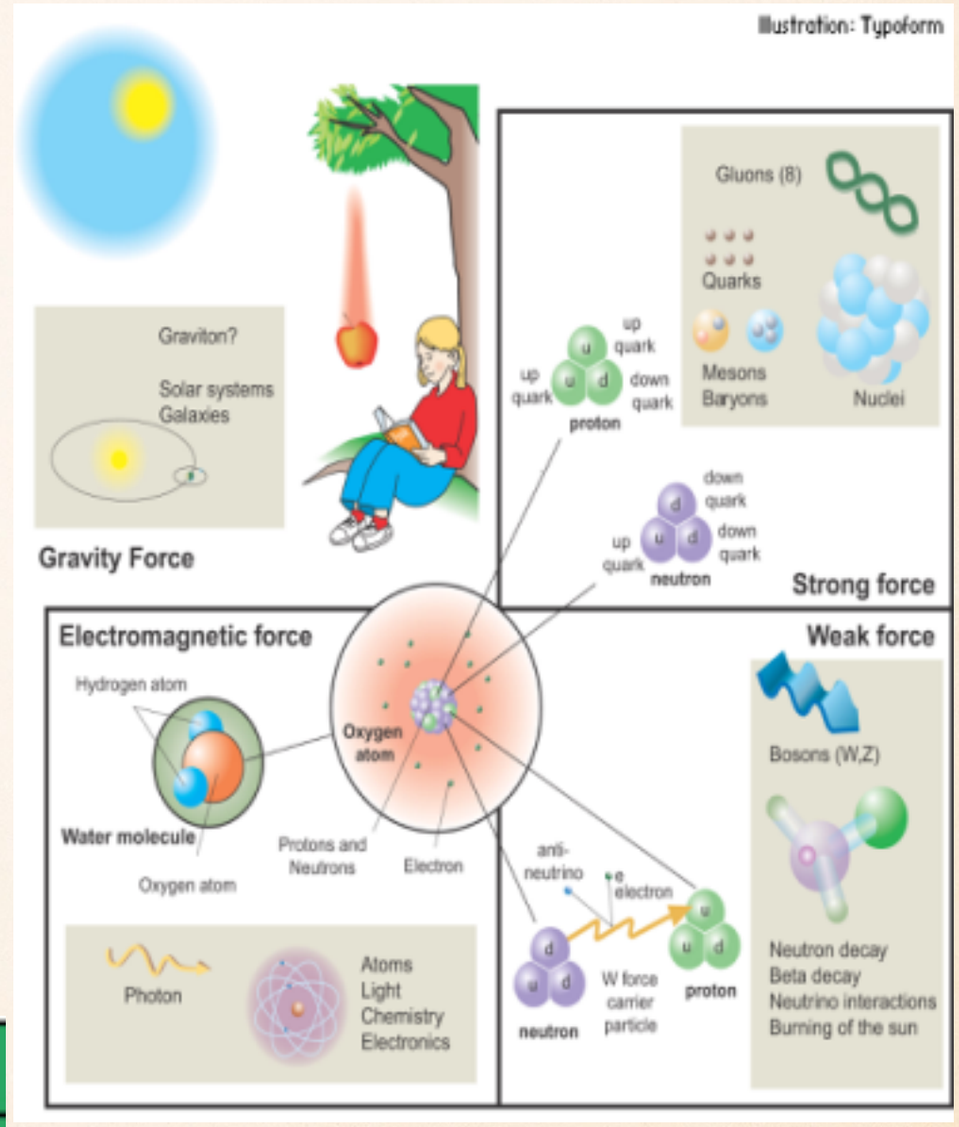
ОСНОВНЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ

- 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

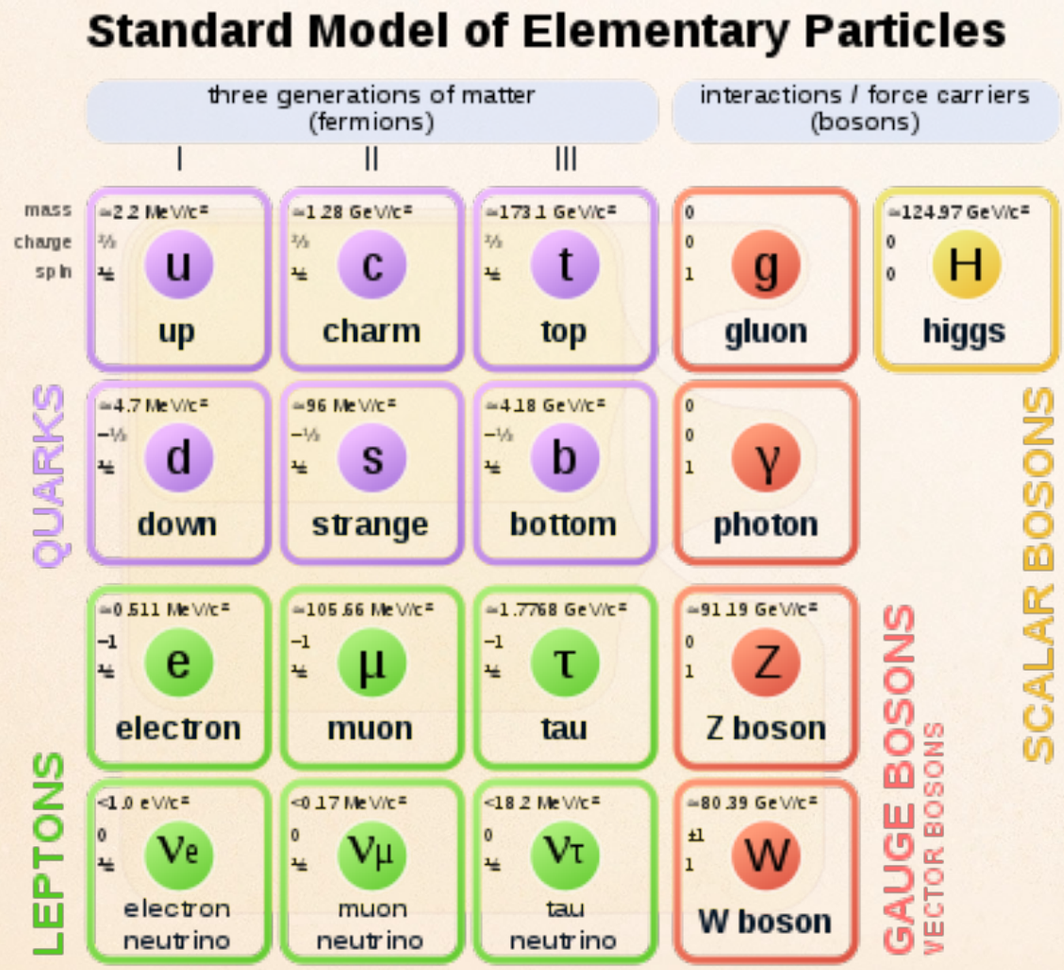
- Постоје четири основне интеракције у природи
- Гравитациона
- Електромагнетна
- Слаба – одговорна за радиоактивне распаде
- Јака – одговорна за нуклеарне силе
- Свака интаркција има свог преносиоца – када две честице интерагују, оне уствари размењују трећу, преносиоца интеракције

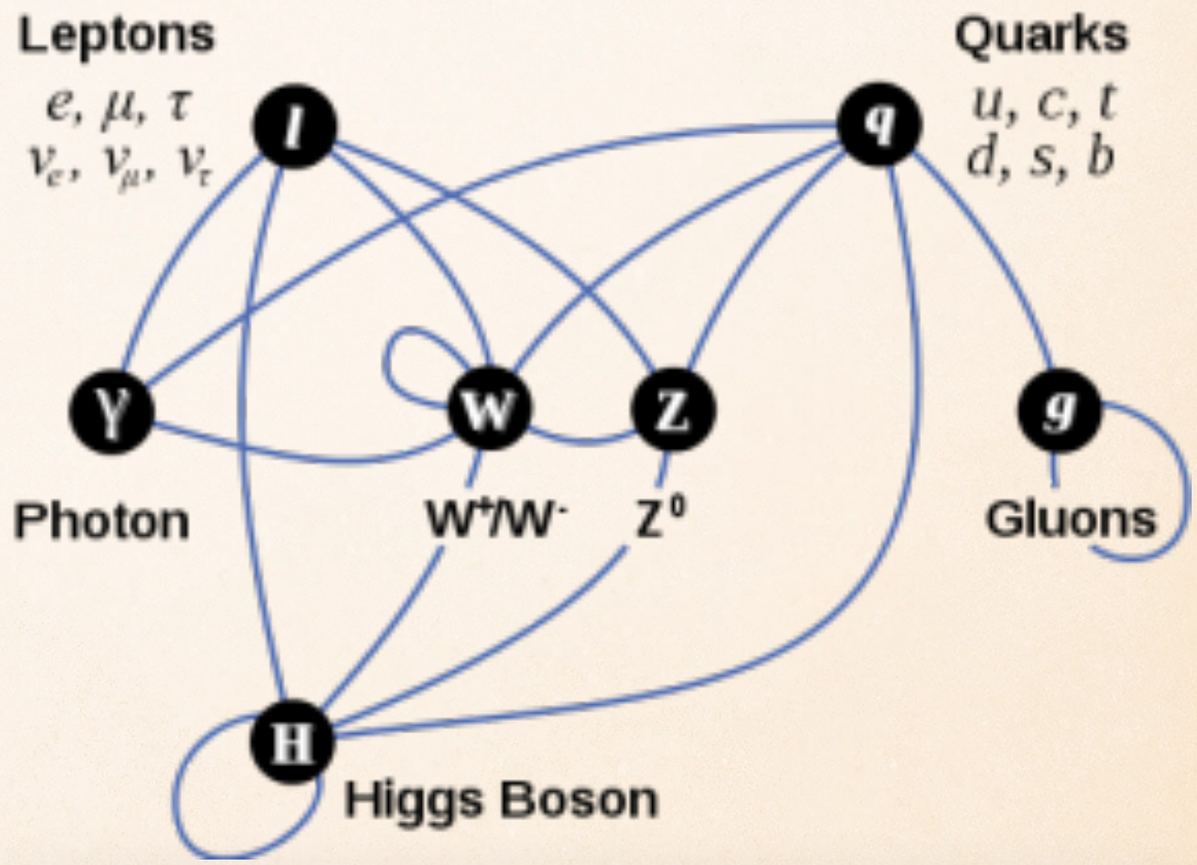


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

ШТА СУ ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ

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





Описано Стандардним моделом

ХИГСОВ МЕХАНИЗАМ

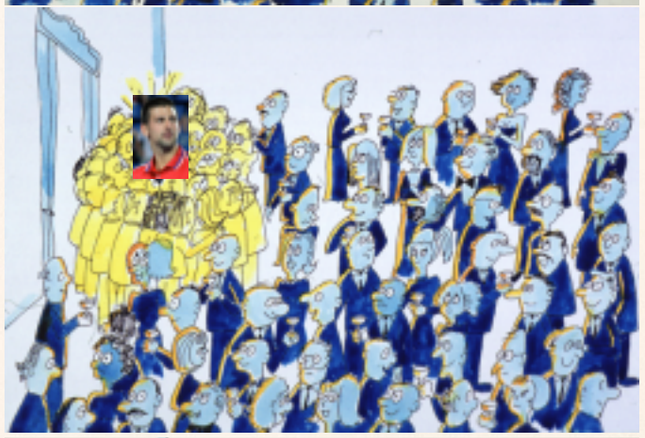
- У стандрадни модел уведено је комплексно скалрно поље

- нарушило је почетну симетрију

- генерисало масе честица

- појавила се нова честица – Хигсов бозон

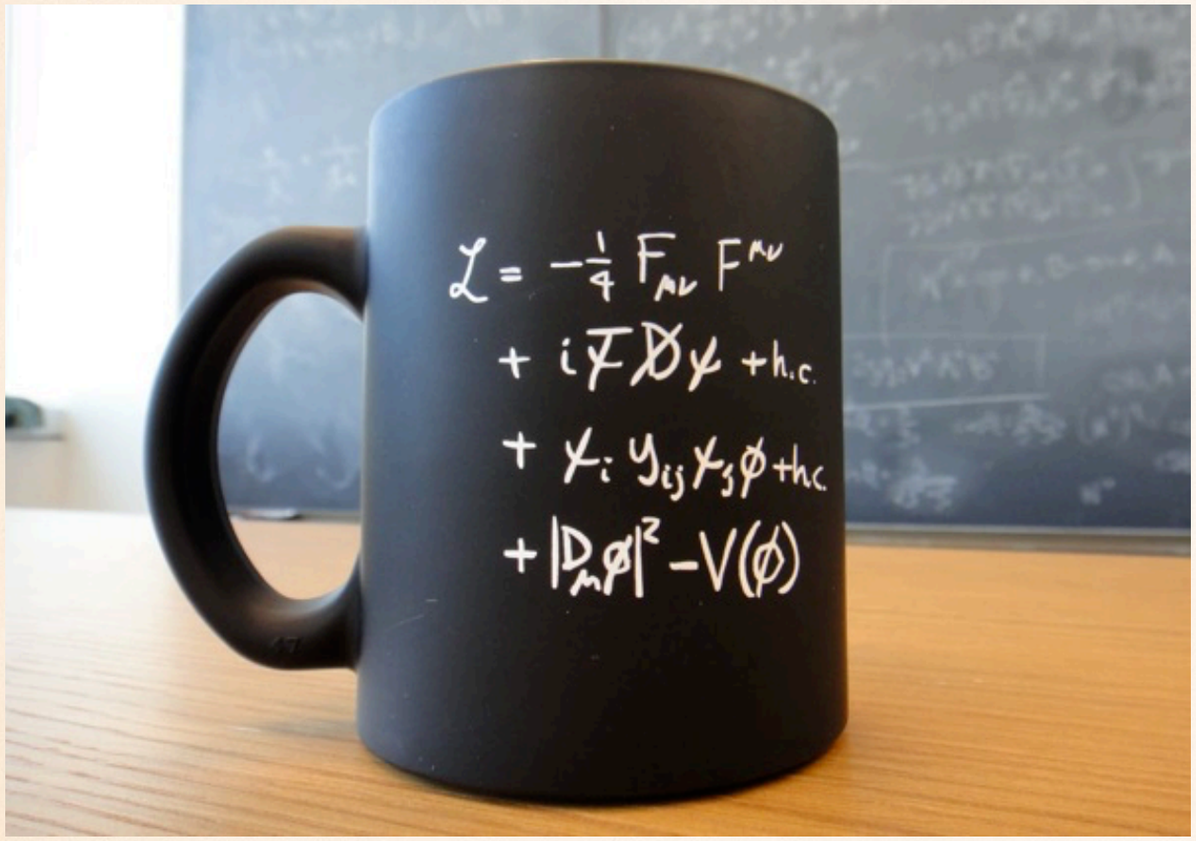
Ненарушена симетрија



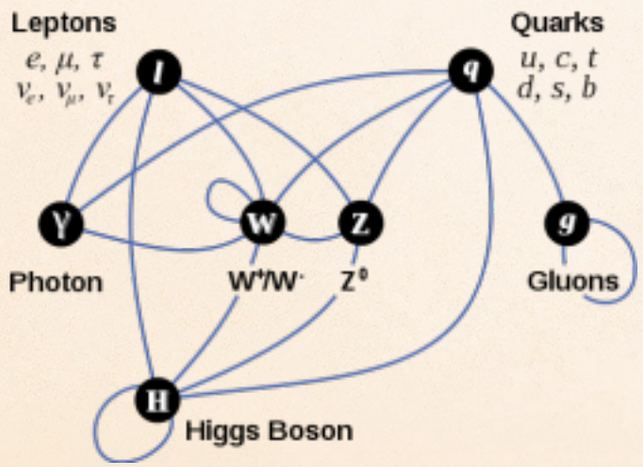
Улази Ноле, народ се окупља, Ноле добија "масу"
⇒ маса честица

Гласине о Нолету се шире
⇒ маса Хигса

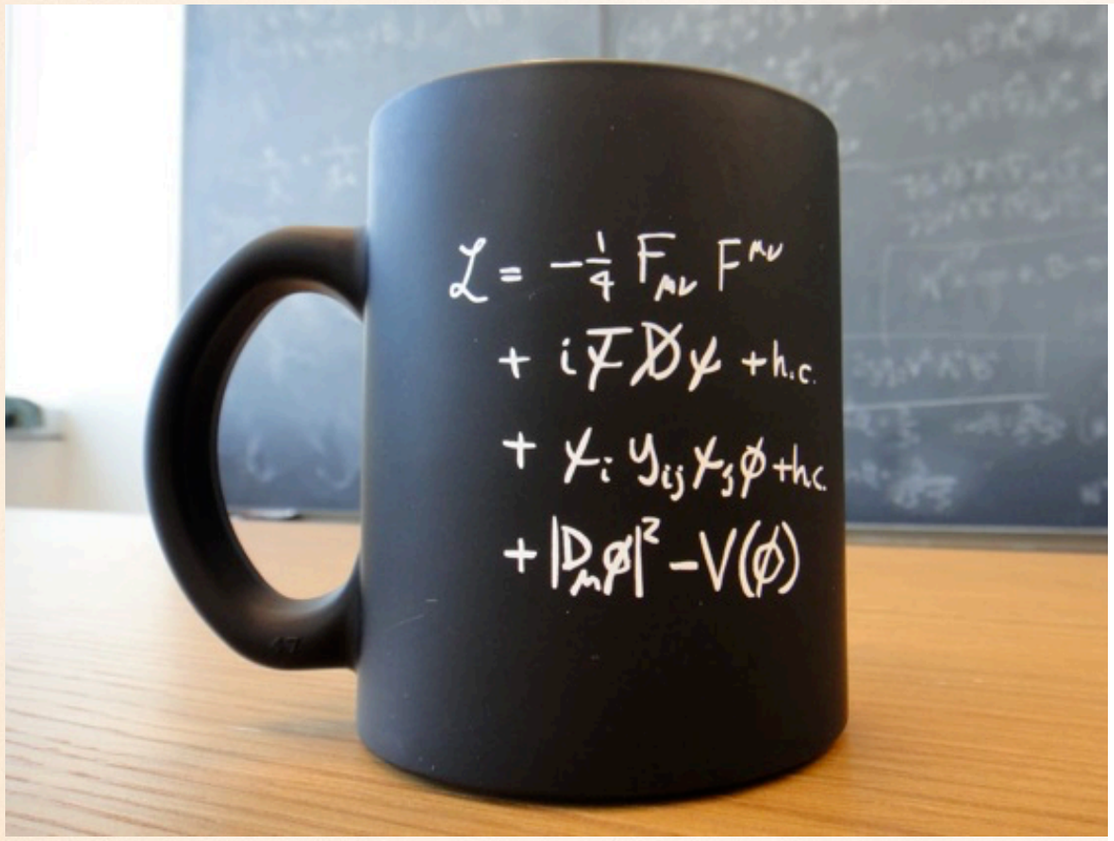
СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

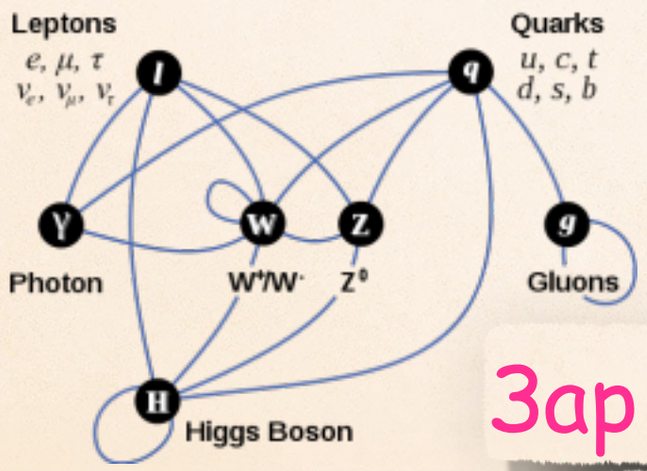


Једноставан и елегантан



СТАНДАРДНИ МОДЕЛ



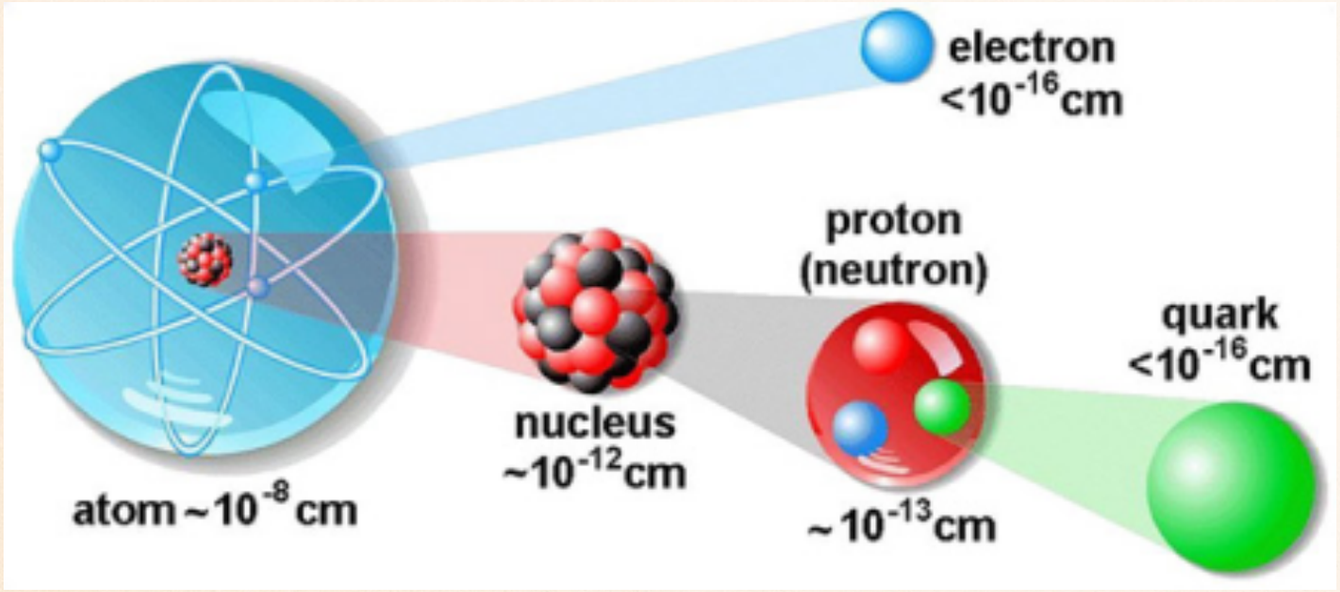


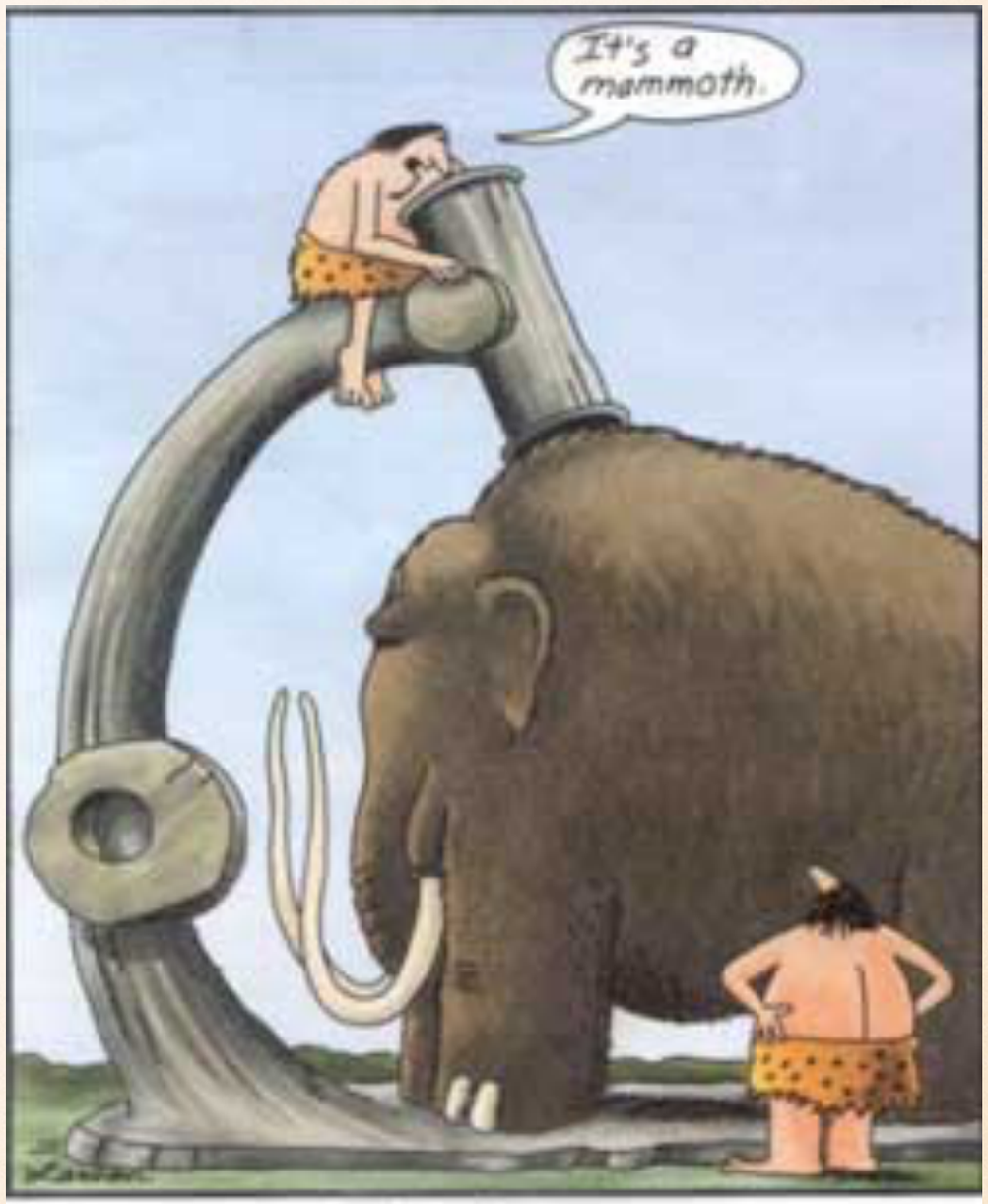
Зар не?

$$\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - igs_w(\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)) - \tfrac{1}{2} g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2} g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g} H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-) \right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - g\alpha_h M \left(H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^- \right) - \tfrac{1}{8} g^2 \alpha_h \left(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 \right) - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2} g \tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2} ig \left(W^+_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W^-_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right) + \tfrac{1}{2} g \left(W^+_\mu (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W^-_\mu (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right) + \tfrac{1}{2} g \tfrac{1}{c_w} (Z^0_\mu (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + M \left(\tfrac{1}{c_w} Z^0_\mu \partial_\mu \phi^0 + W^+_\mu \partial_\mu \phi^- + W^-_\mu \partial_\mu \phi^+ \right) - ig \tfrac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + igs_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - ig \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \tfrac{1}{4} g^2 W^+_\mu W^-_\mu \left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^- \right) - \tfrac{1}{8} g^2 \tfrac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu \left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+\phi^- \right) - \tfrac{1}{2} g^2 \tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + W^-_\mu \phi^+) - \tfrac{1}{2} ig^2 \tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2 \tfrac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+\phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2} ig_s \lambda^a_{ij} (\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j) g^a_\mu - \bar{e}^\lambda (\gamma\partial + m^\lambda_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma\partial + m^\lambda_\nu) \nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j (\gamma\partial + m^\lambda_u) u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j (\gamma\partial + m^\lambda_d) d^\lambda_j + igs_w A_\mu \left(-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu d^\lambda_j) \right) + \tfrac{ig}{4c_w} Z^0_\mu \{ (\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}^\lambda_j \gamma^\mu (\tfrac{4}{3} s_w^2 - 1 - \gamma^5) d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1 - \tfrac{8}{3} s_w^2 + \gamma^5) u^\lambda_j) \} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^+_\mu \left((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1+\gamma^5) C_{\lambda\kappa} d^\kappa_j) \right) + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^-_\mu \left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1+\gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1+\gamma^5) u^\lambda_j) \right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left(-m^\kappa_e (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) e^\kappa) + m^\lambda_\nu (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) e^\kappa) \right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left(m^\lambda_e (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) \nu^\kappa) - m^\kappa_\nu (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) \nu^\kappa) \right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa} (1-\gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \tfrac{1}{4} \overline{\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa} (1-\gamma_5) \hat{\nu}_\kappa} + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left(-m^\kappa_d (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) d^\kappa_j) + m^\lambda_u (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) d^\kappa_j \right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left(m^\lambda_d (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) u^\kappa_j) - m^\kappa_u (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) u^\kappa_j \right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M} H (\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M} H (\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M} \phi^0 (\bar{u}^\lambda_j \gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda_j \gamma^5 d^\lambda_j)$$

КАКО СЕ ДЕТЕКТУЈУ ЧЕСТИЦЕ

- Димензије честица су мале

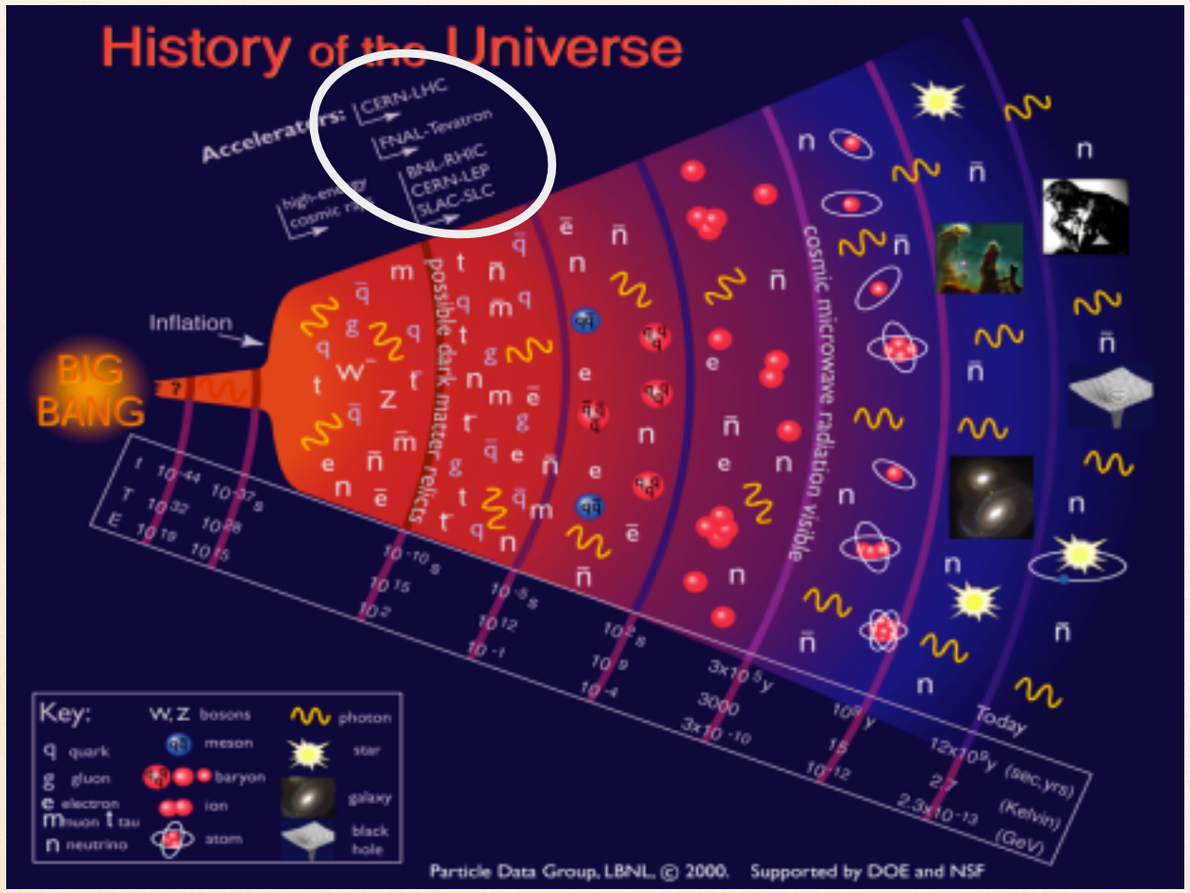


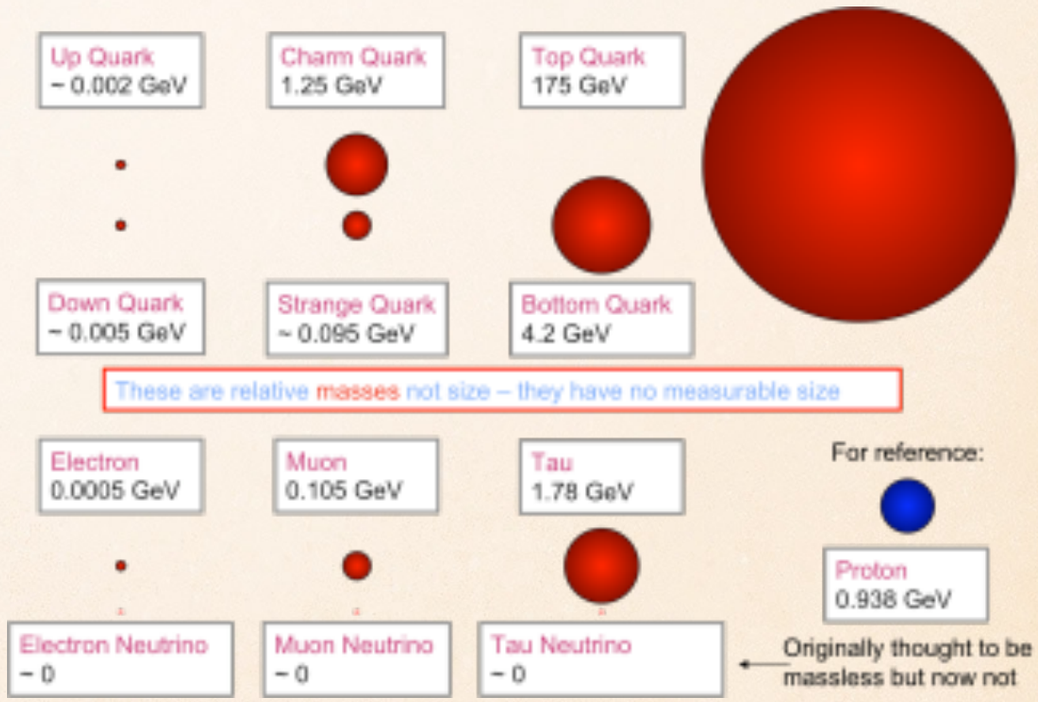


Early microscopes

КАКО СЕ ДЕТЕКТУЈУ ЧЕСТИЦЕ

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





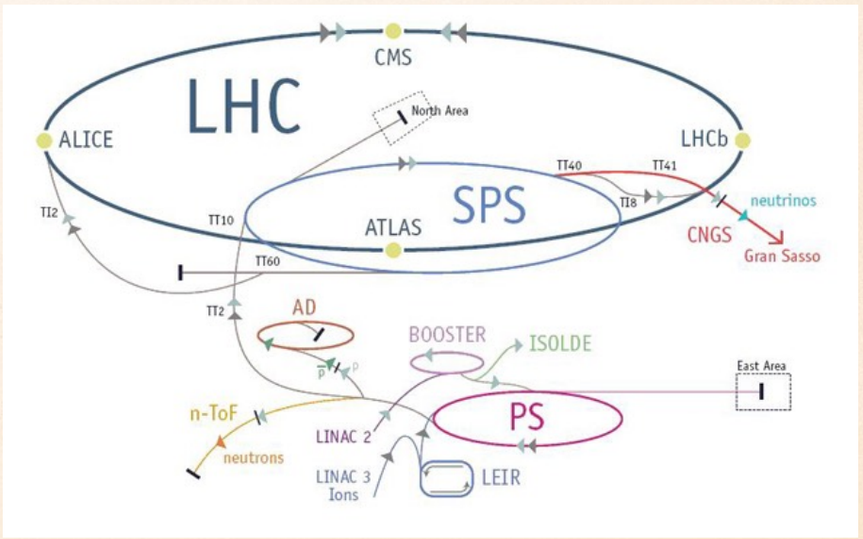
АКЦЕЛЕРАТОРИ

- Акцелератори су машине за убрзавање честица

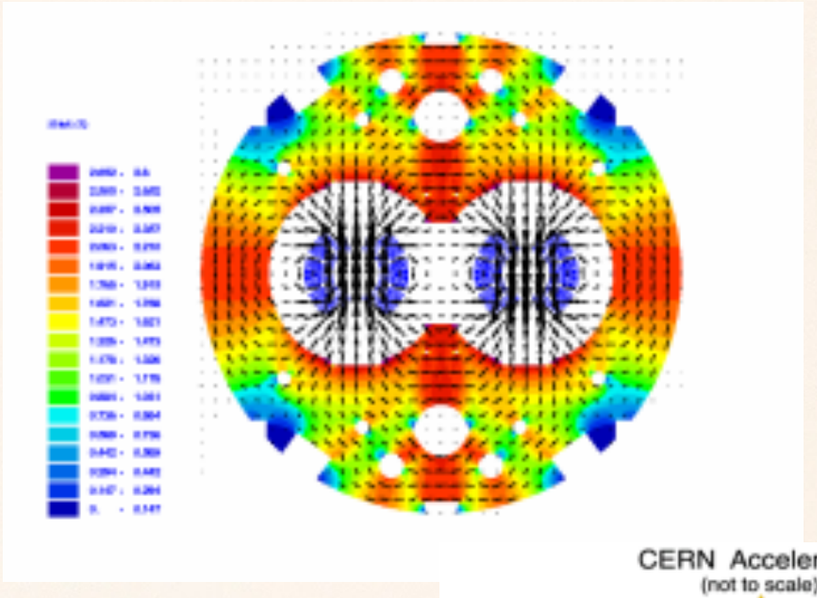
- Линеарни – користе елктрично поље за убрзавање наелектрисаних честица

- Кружни – користе елктрично поље за убрзавање наелектрисаних честица и магнетно поље за њихово скретање

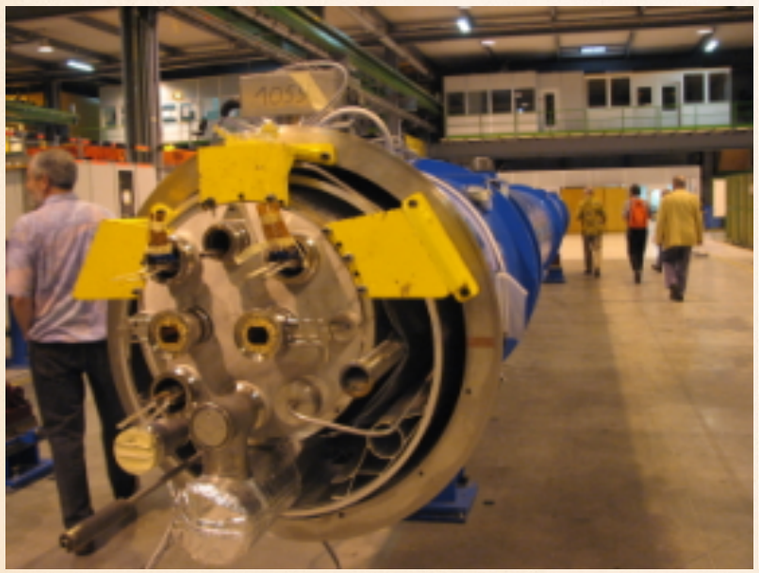
- Модерне машине су комбинација више технологија

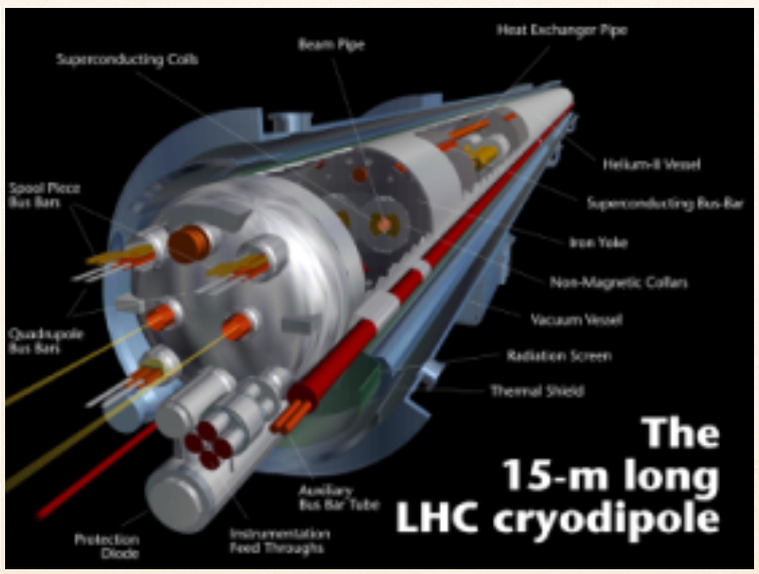


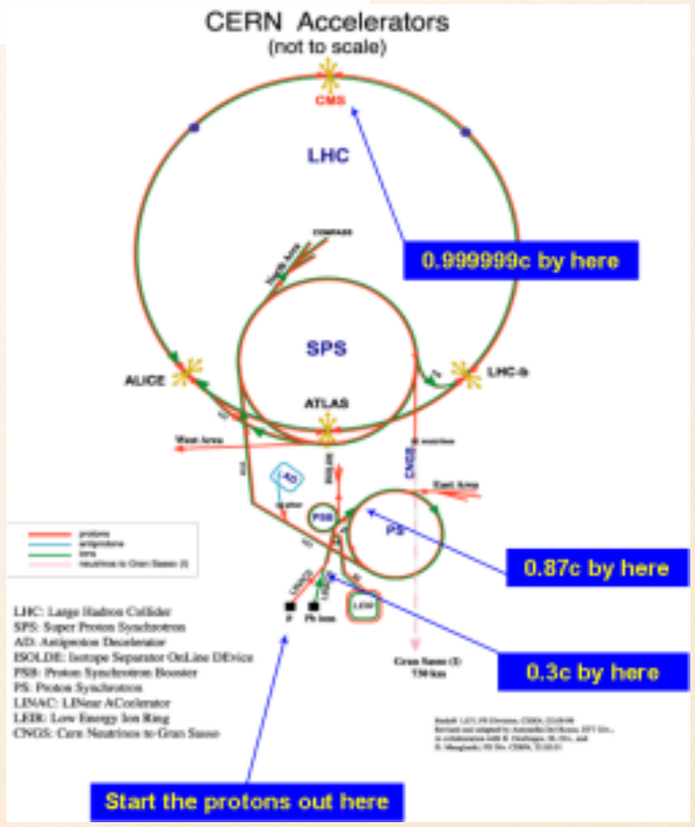
ВЕЛИКИ ХАДРОНСКИ СУДАРАЧ (LARGE HADRON COLLIDER – LHC)



Погледајте видео



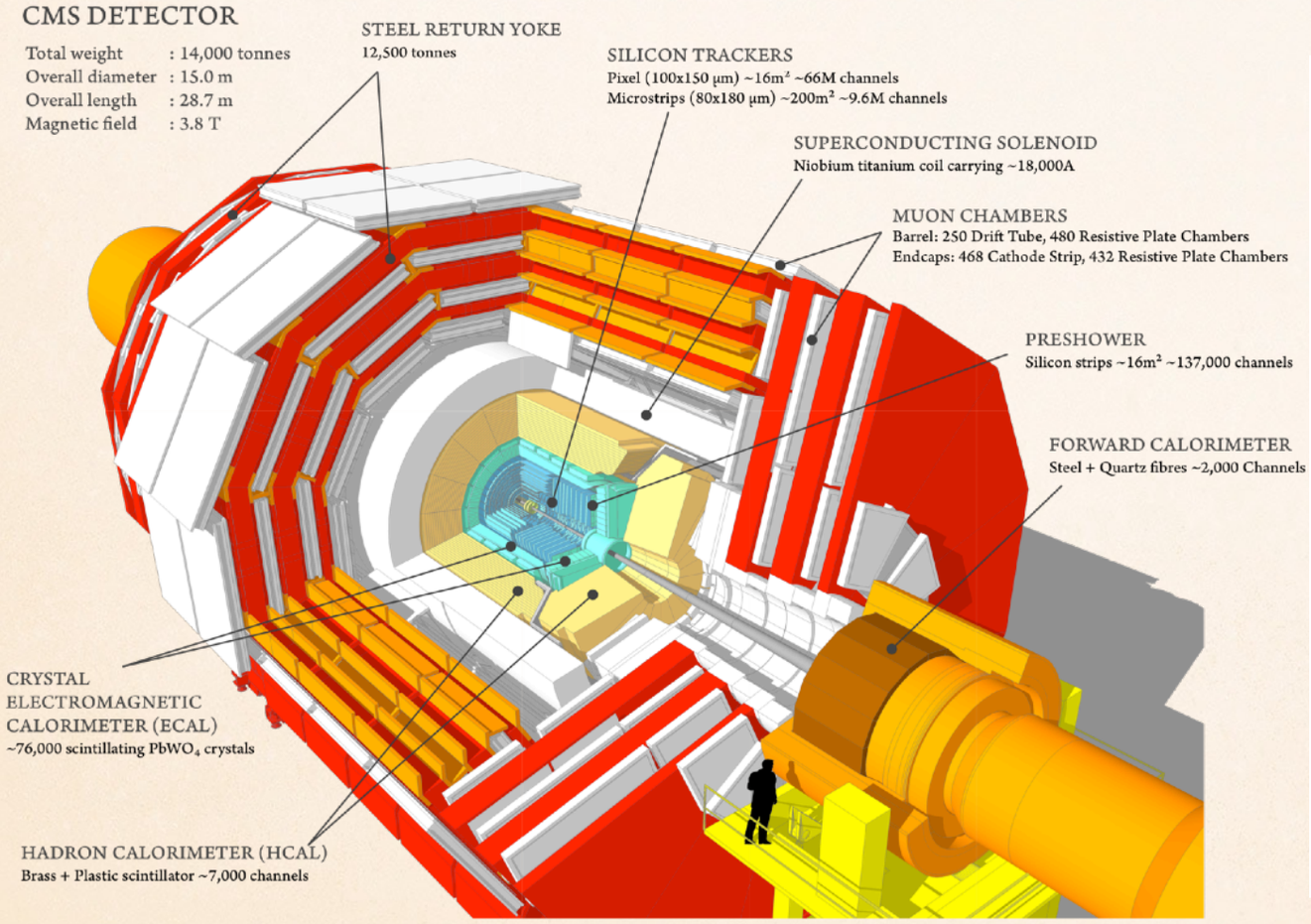


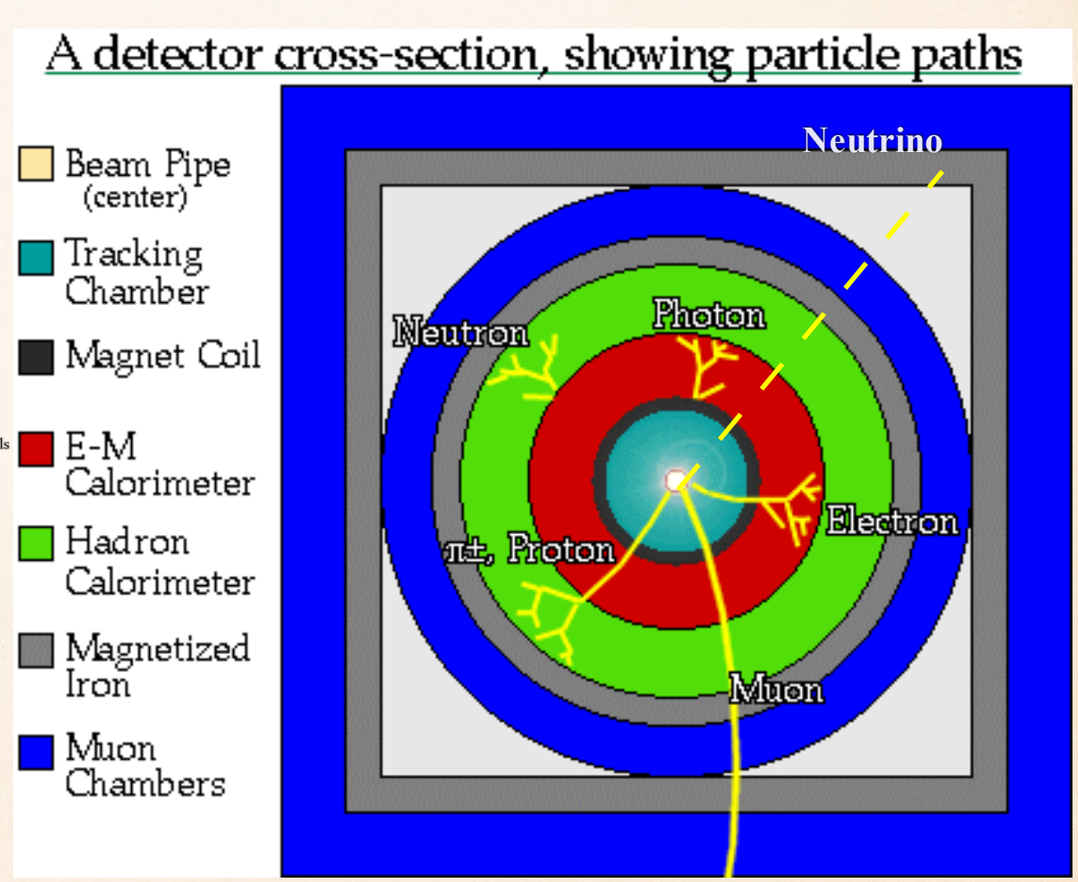


ДЕТЕКТОРИ

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

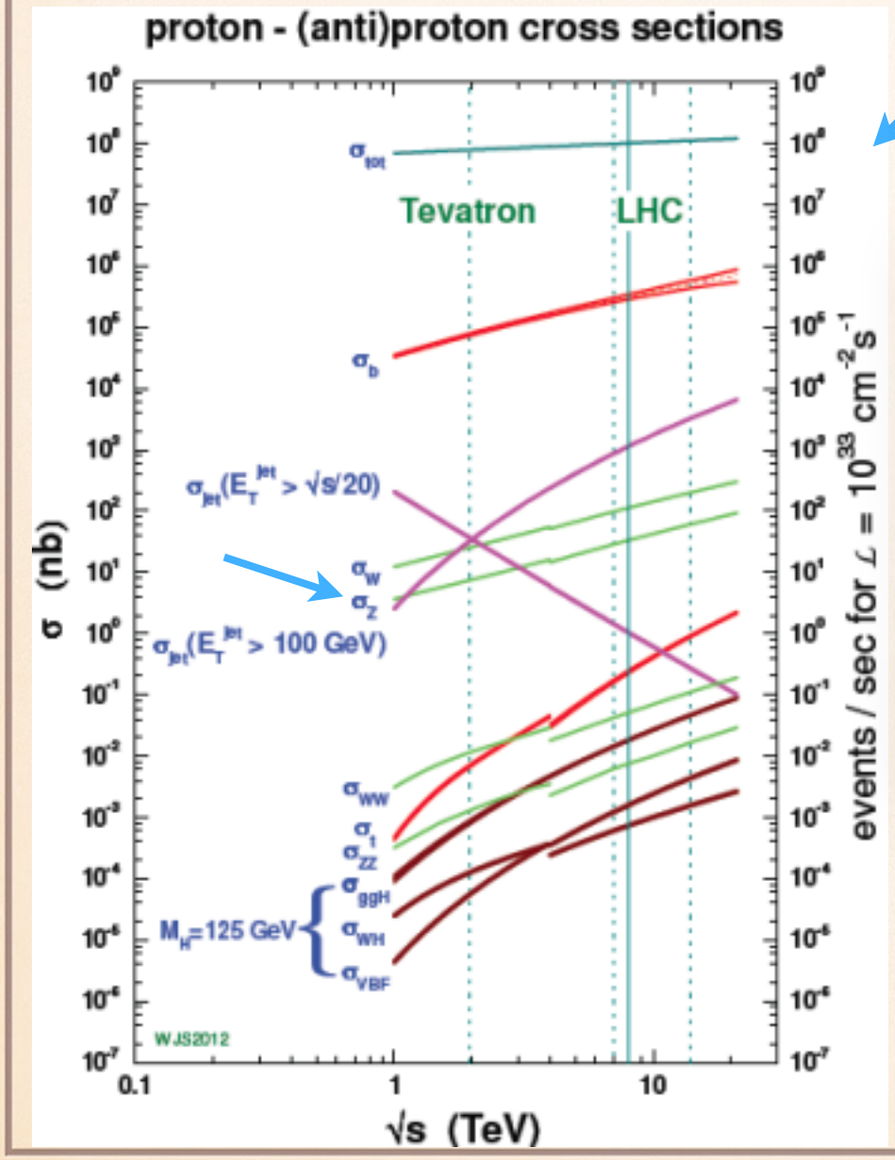
CMS: Compact Muon Solenoid





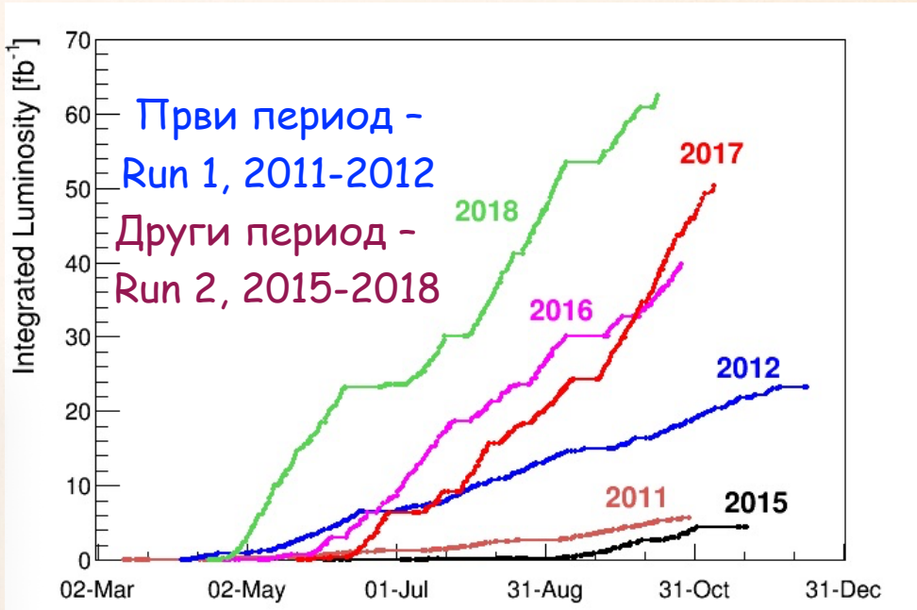
УКУПАН БРОЈ ДОГАЂАЈА

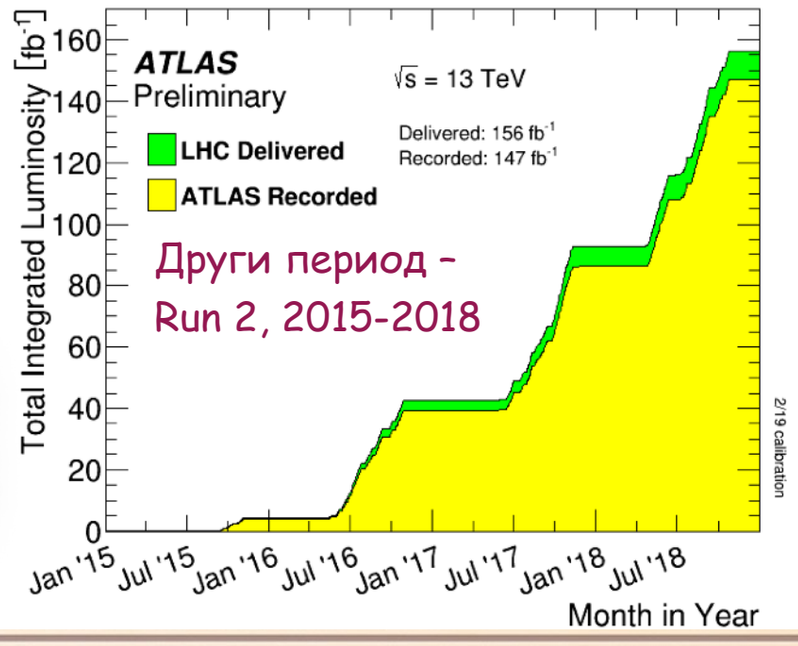
- Укупан број честица (N) = пресек (σ) * луминозност (L)
- Пресек зависи од енергије снопа



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

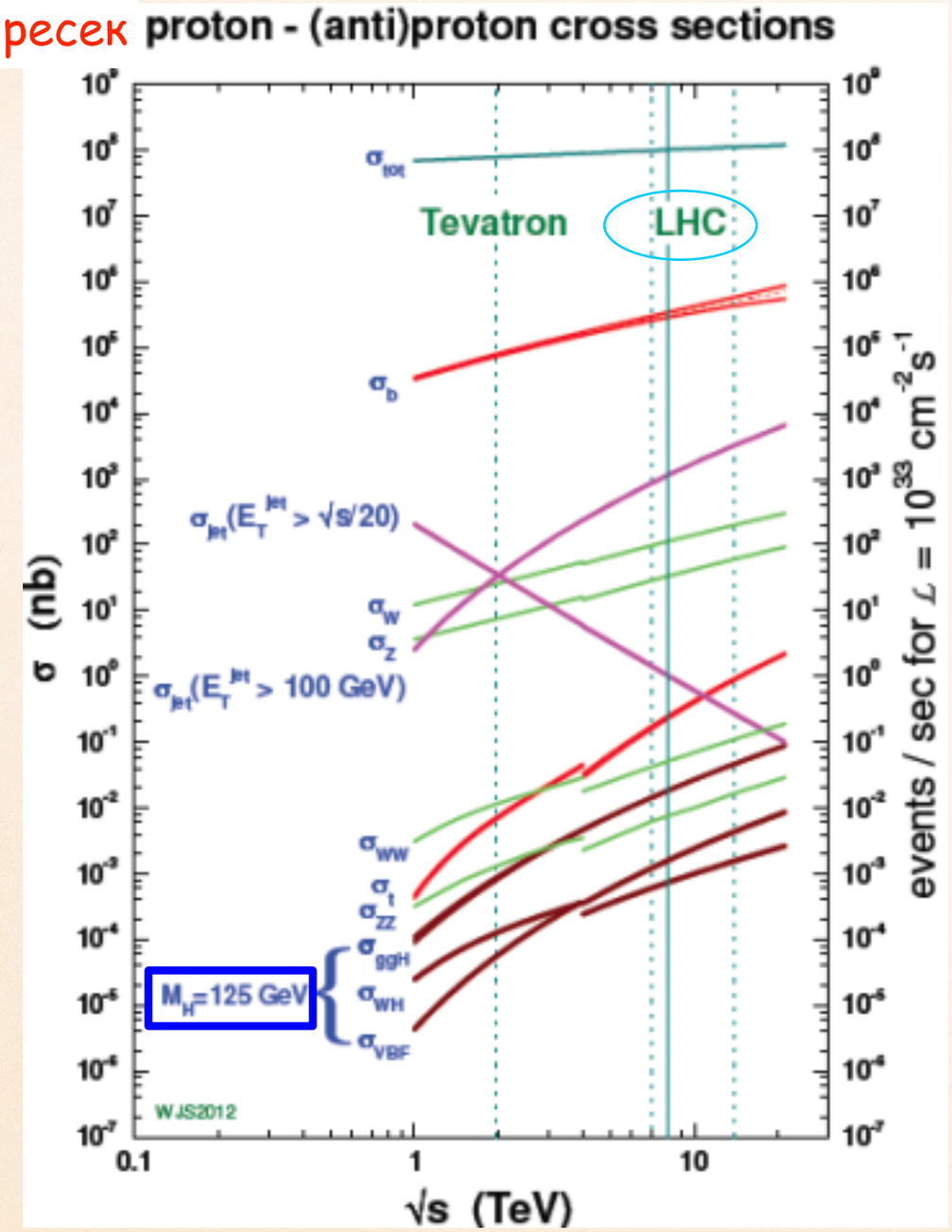
Добро за анализу: 139 fb^{-1}





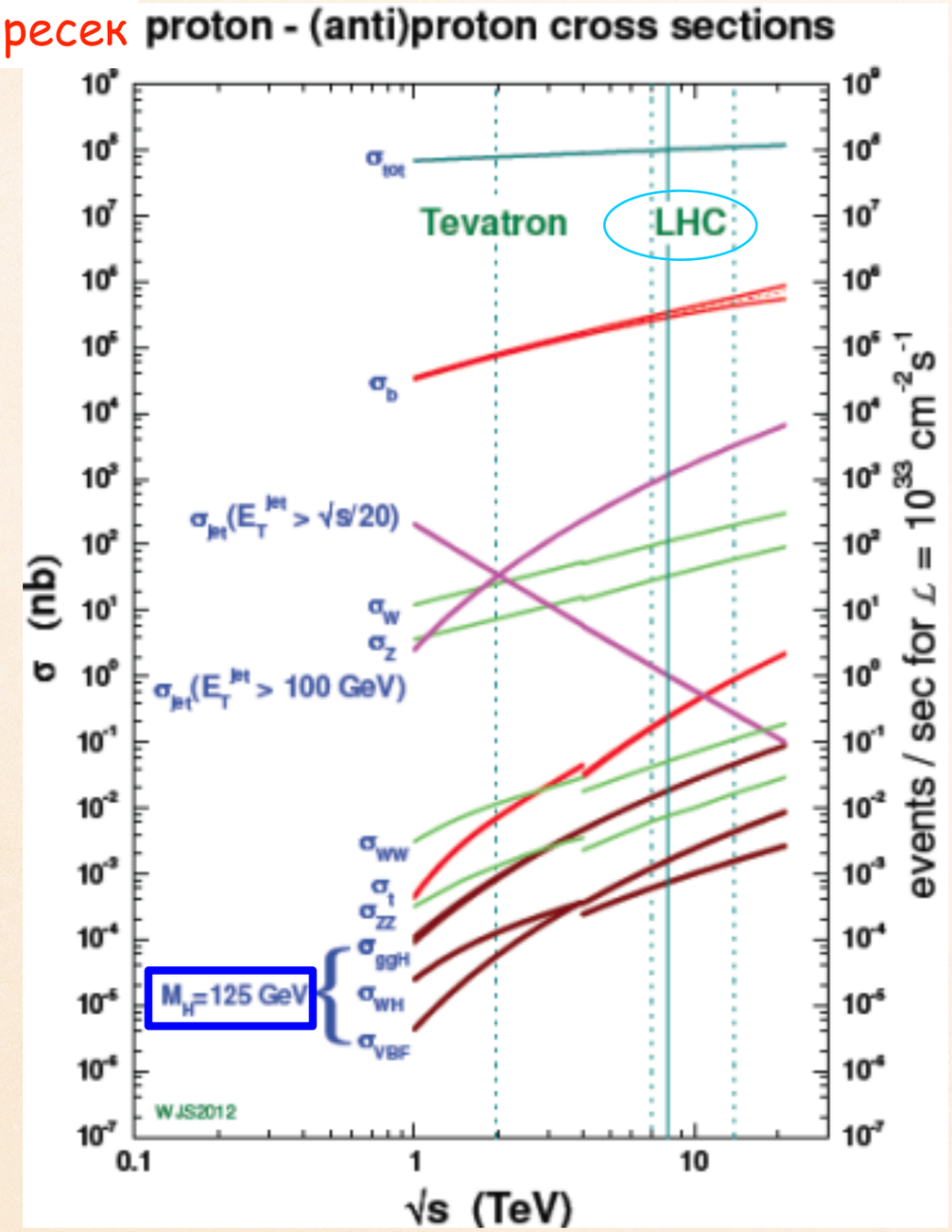
КАКО ТРАЖИМО ИНТРЕСАНТНЕ ДОГАЂАЈЕ

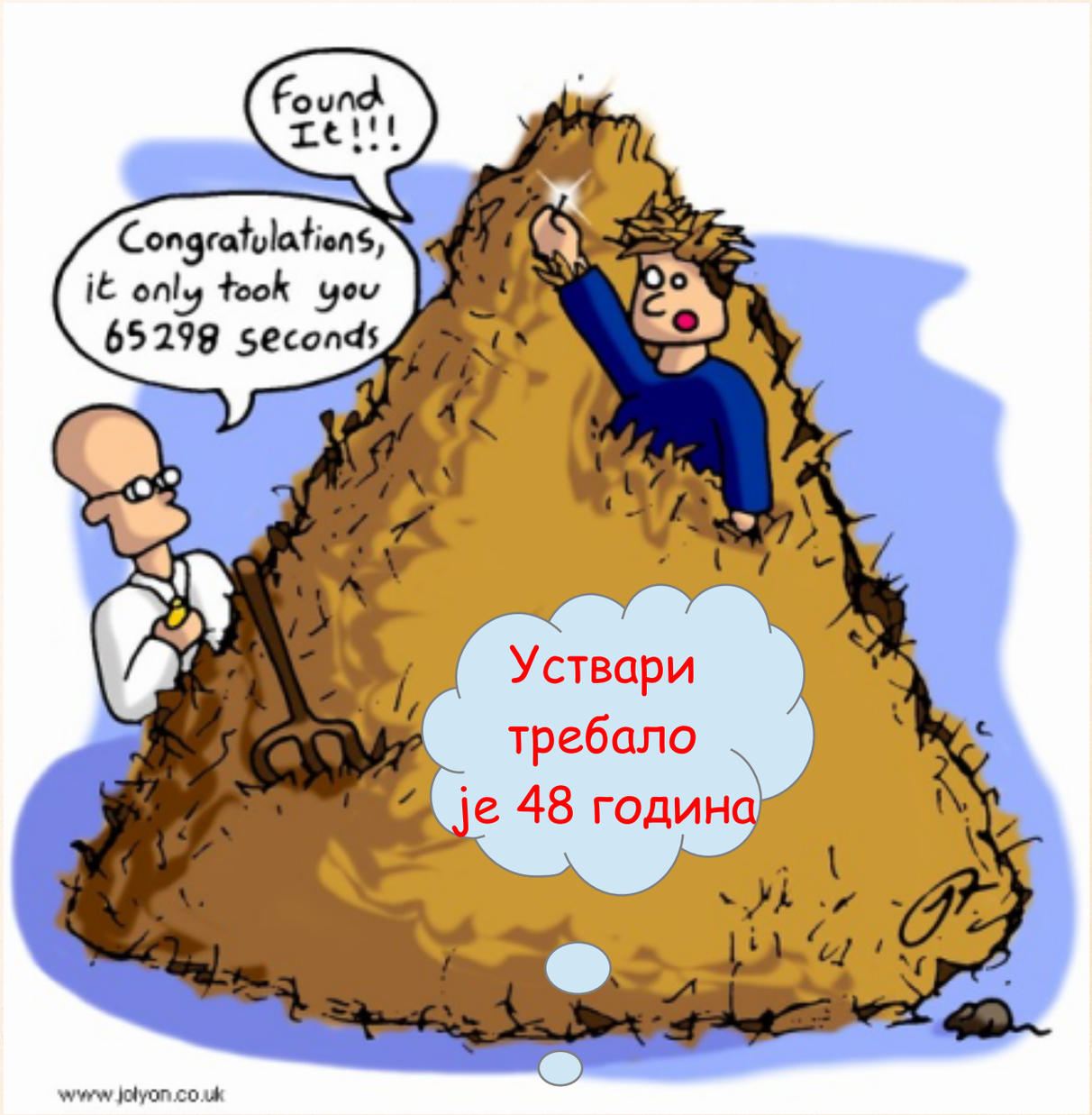
Пресек



КАКО ТРАЖИМО ИНТРЕСАНТНЕ ДОГАЂАЈЕ

Пресек

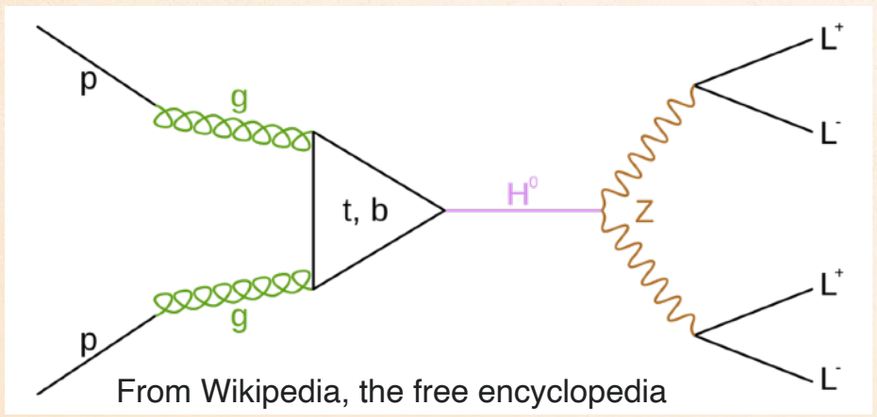




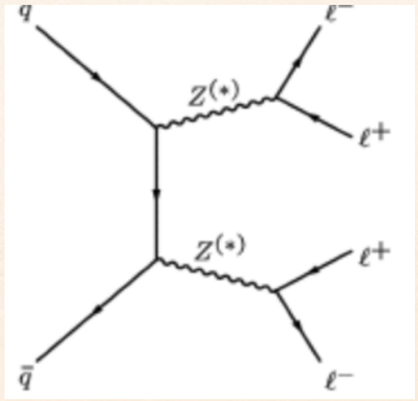
СИГНАЛНИ И ПОЗАДИНСКИ ПРОЦЕСИ

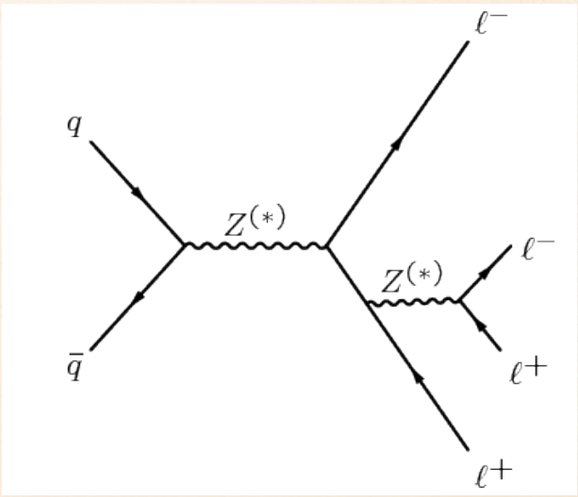
- Сигнал је процес који нас занима, који желимо да видимо, нађемо и меримо – Хигсов бозон
- Позадински процес је процес који се у детектору види исто као сигнал
  - Или има исте честице у финалном стању
  - Или неке честице погрешно идентификујемо
- Позадина обично има пресек који је већи неколико пута

Сигнал $H \to ZZ \to 4l$



Позадина

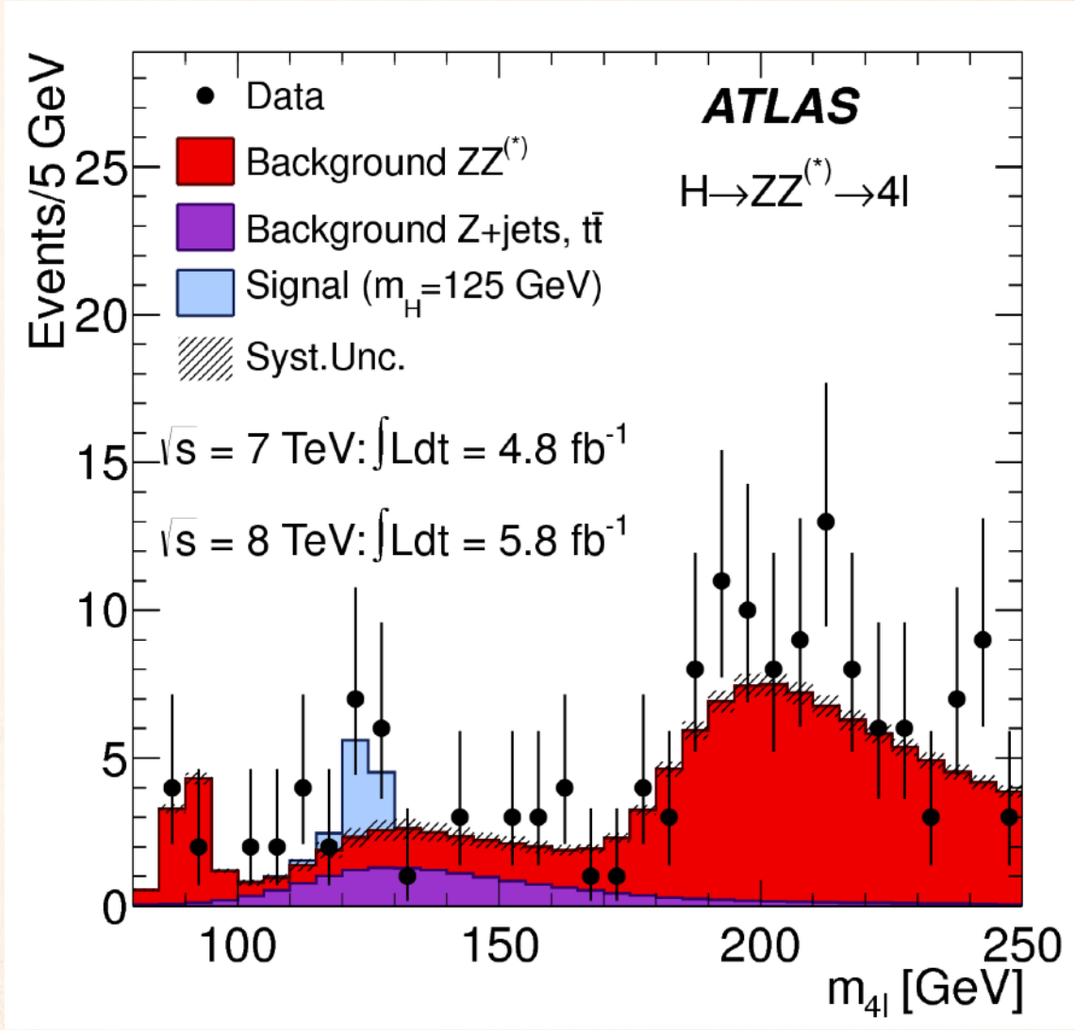




$H \to ZZ \to 4l$

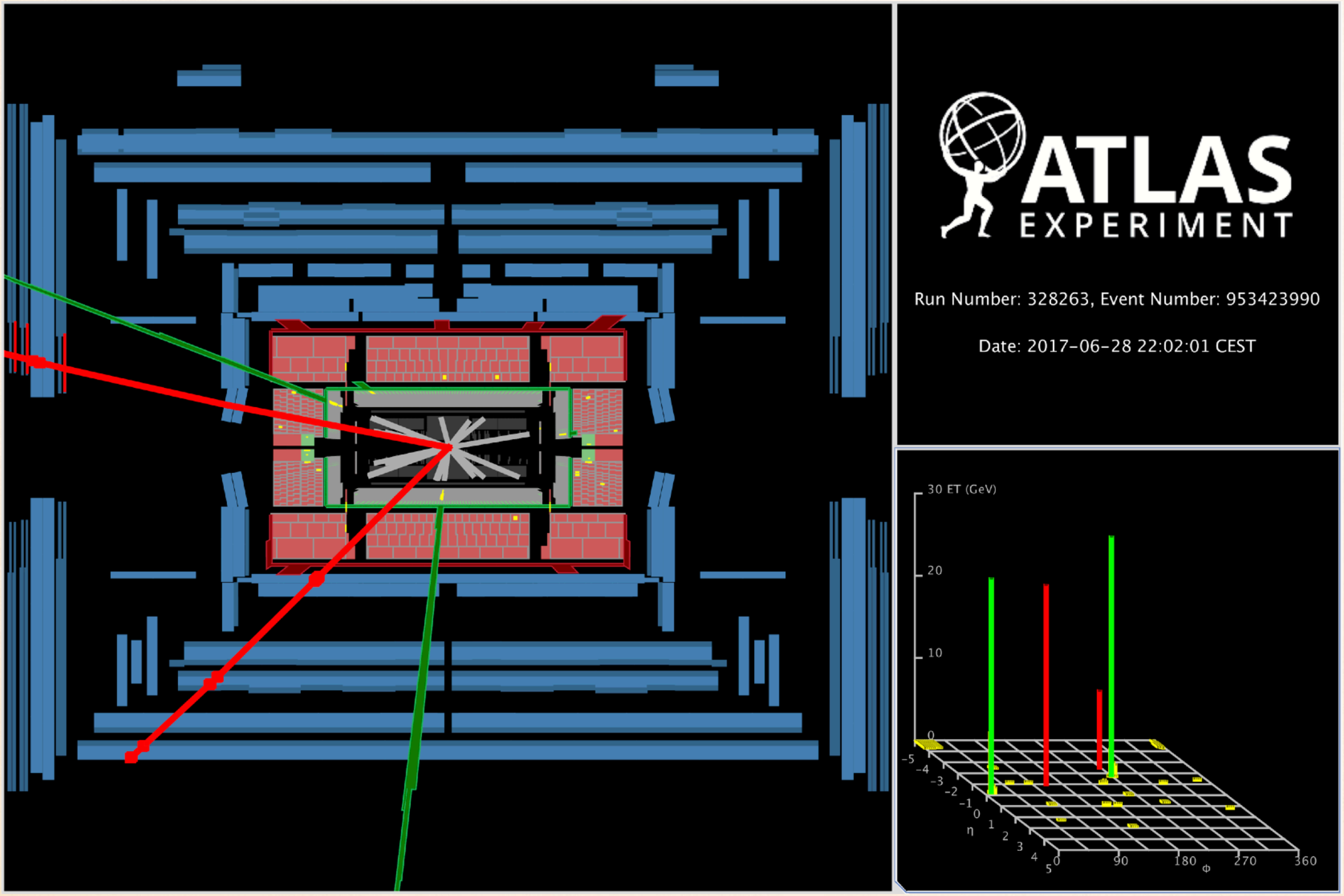
- Сигнал карактеришу четири добро дефинисана лептона, електрона или миона који долазе од два бозона Z (резонантна честица) који долазе од Хигсовог бозона (резонантна честица)
  - Може да се реконструише маса резонантне честице
- Позадина има другачији спектар

$$E = m \cdot c^2 \Leftrightarrow m^2 = E^2 - \vec{p}^{\,2}$$
$$\Rightarrow m_{12}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p_1} + \vec{p_2})^2$$
$$Z \to \ell\ell \quad \text{and} \quad H \to ZZ$$

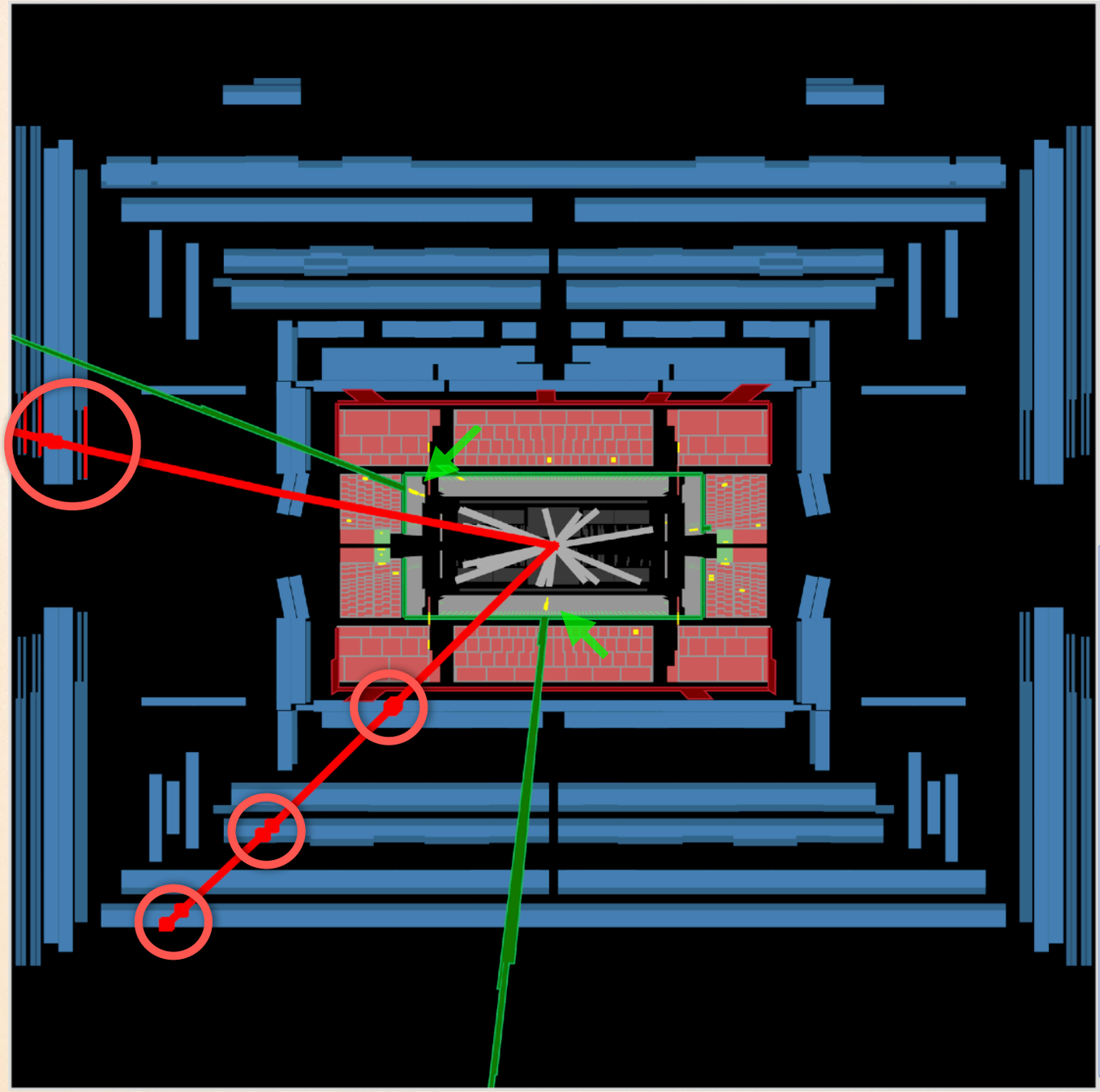


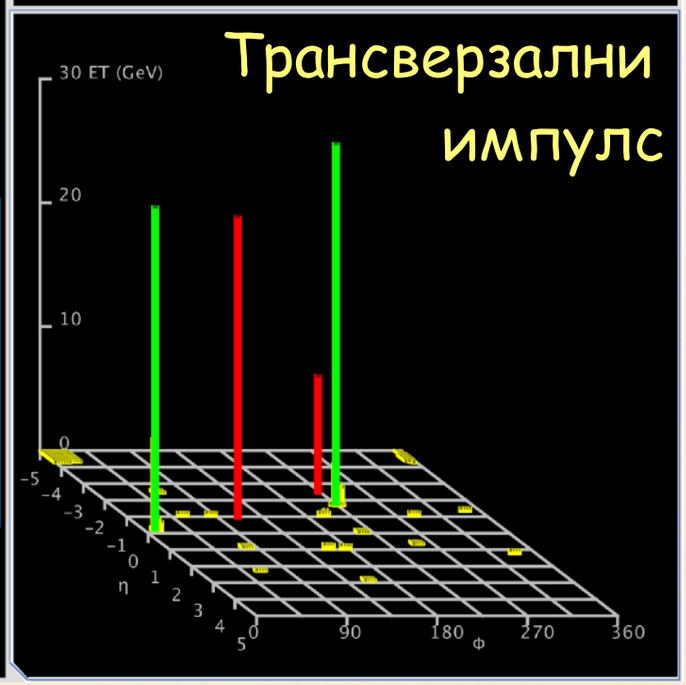
Ово је био почетак, једноставно
Данас користимо напредније технологије, на пример машинско учење

СТВАРНИ ДОГАЂАЈ



СТВАРНИ ДОГАЂАЈ

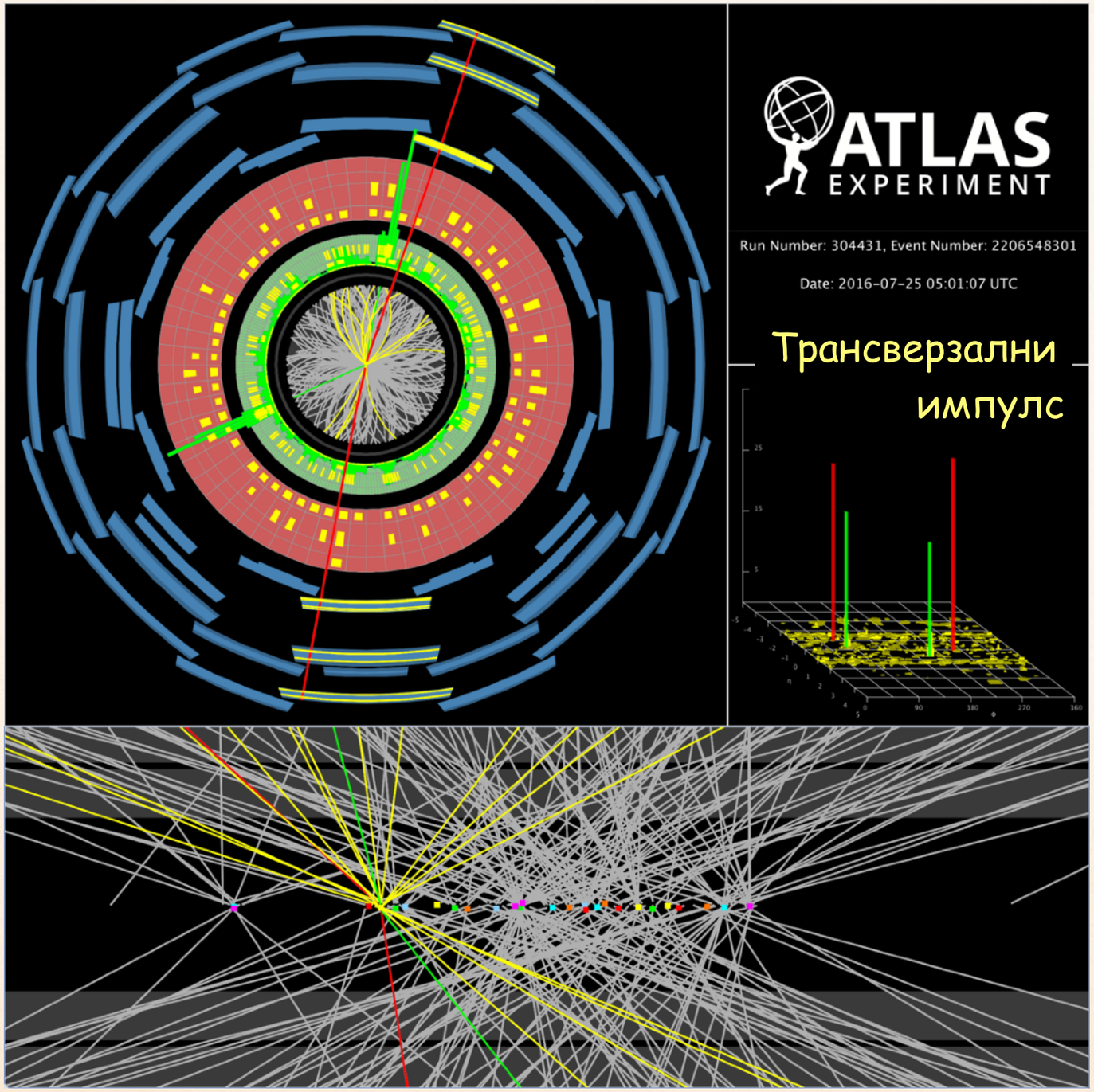




Мион

Електрон

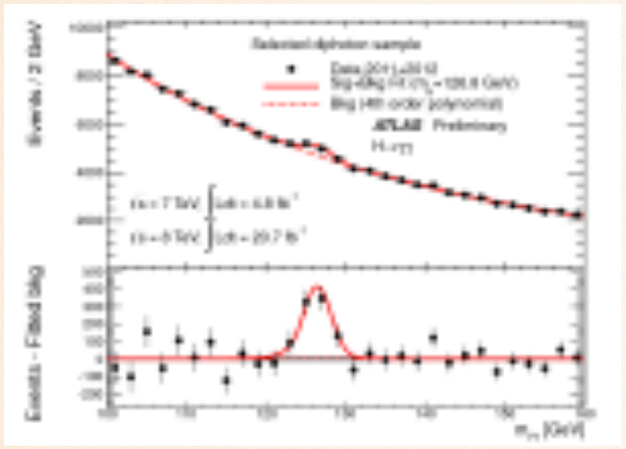
ЈОШ ЈЕДАН СТВАРНИ ДОГАЂАЈ

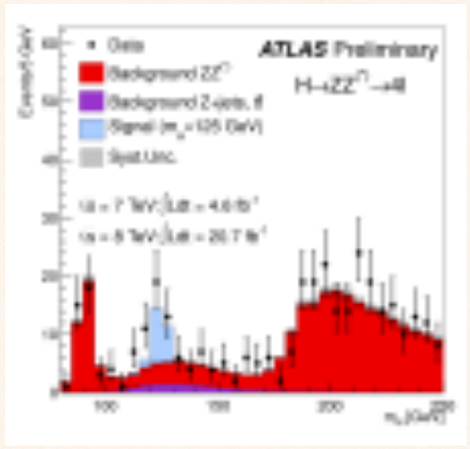


Мион

Електрон

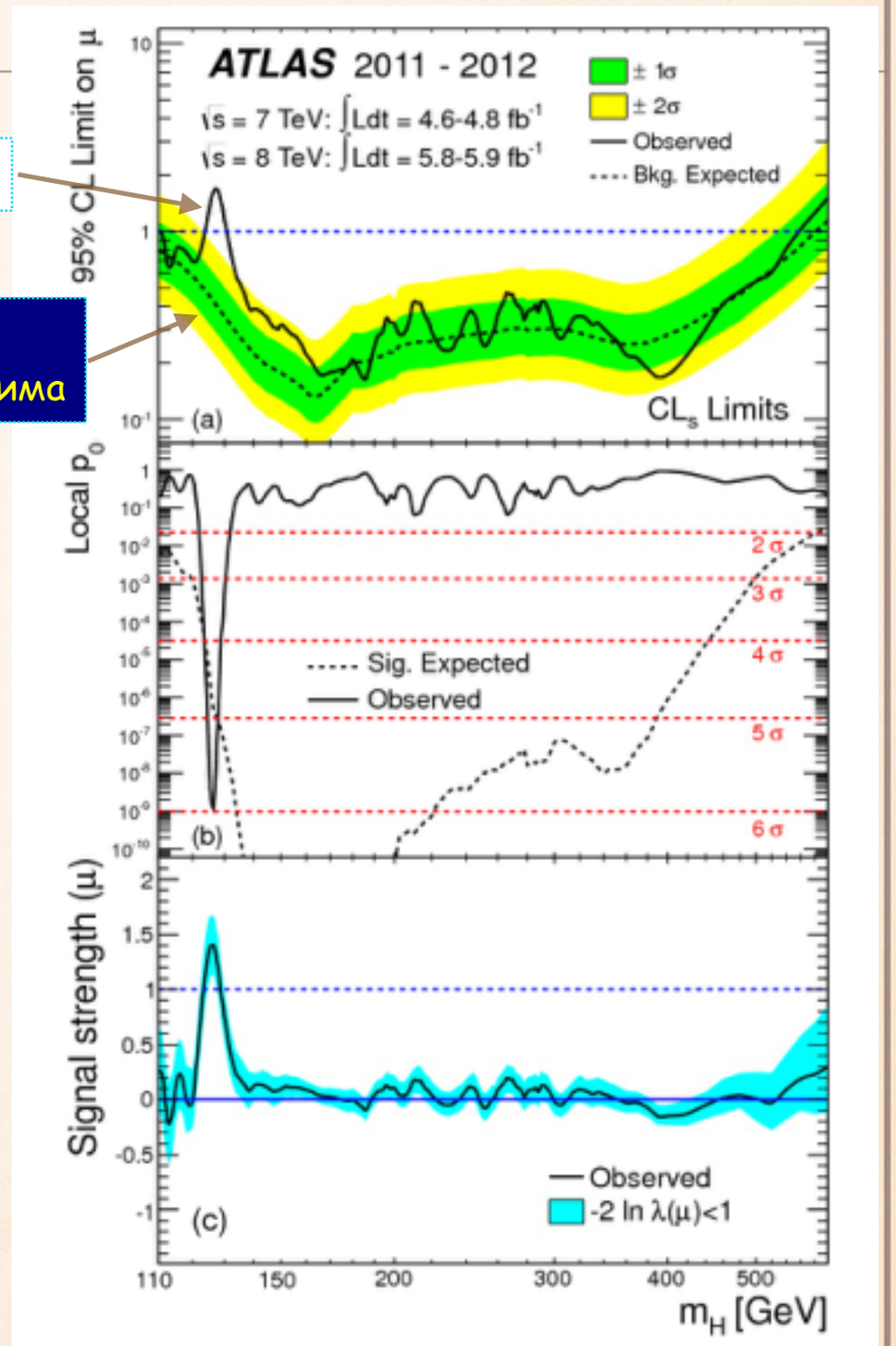
ОТКРИЋЕ!





Из података

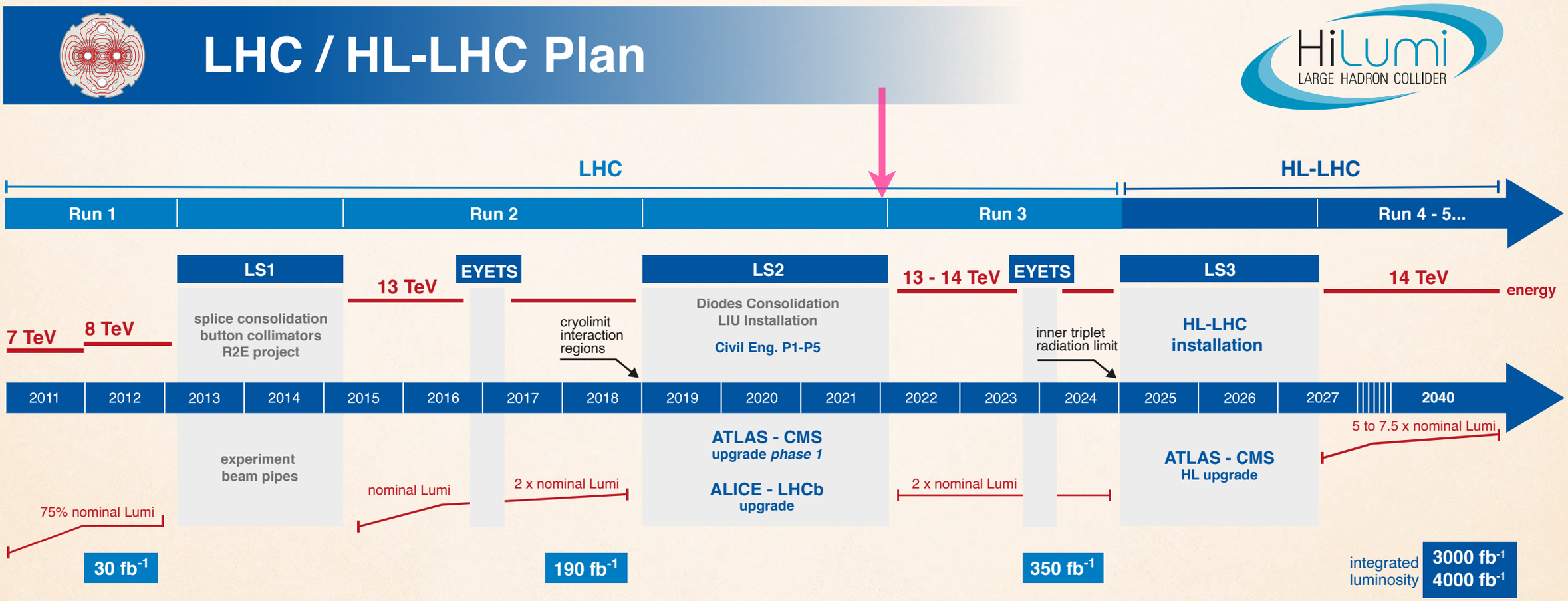
Из симулације
са неодређеностима



- 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:
  - γγ, ZZ, WW, bb и ττ

УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

- Још око 20 година истраживања је пред нама



КРАЈ

Велики хадронски сударач (Large Hadron Collider – LHC)

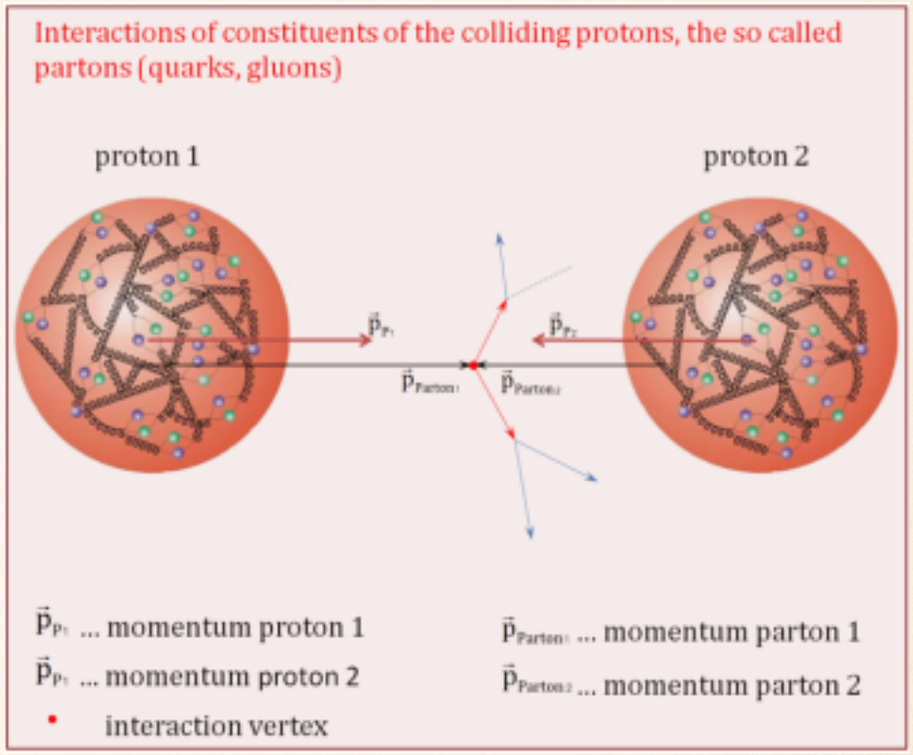
Обим	26659 m
Температура	1,9 K
Укупан број магнета (диполи, квадруполи…)	9300
Номинална енергија протона	7 TeV
Импулс судара	7 TeV/c
Импулс код инјекције	450 GeV/c
Пик магнетног поља дипола	8,33 T
Јачина струје у главном диполу	11800 A
Минимална дистанца између пакета	~7 m
Размак између пакета	25 ns
Дизајнирана луминозност	10^{34} $cm^{-2} \cdot s^{-1}$
Број пакета по снопу	2808
Број протона у пакету (на почетку)	$1{,}15 \cdot 10^{11}$
Број обртаја у секунди	11245
Број судара у секунди	600 милиона

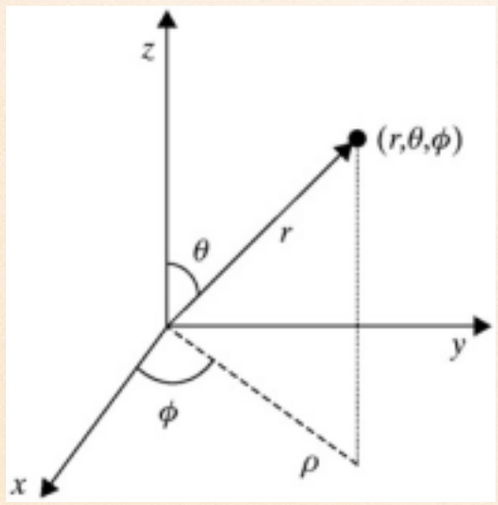
Најхладније место на планети

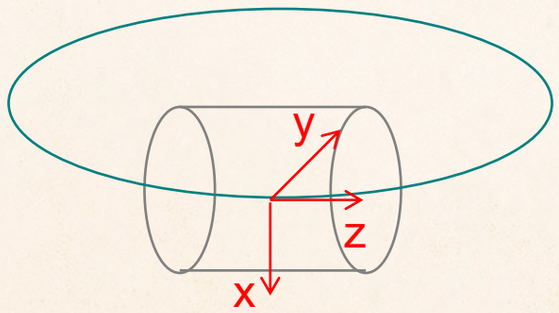
Велики хадронски сударач
(Large Hadron Collider – LHC)

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}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 b = 10^{-24} cm^2)

- Луминозност је мера броја судара у јединици времена по јединици површине
  - Дизајнирана луминозност Великог Хадронског Сударача је 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$
  - 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)