

Detektorji v fiziki delcev

Marko Mikuž

Univerza v Ljubljani & Institut Jožef Stefan



ONLINE Slovenian Teacher Programme

24. marec 2021



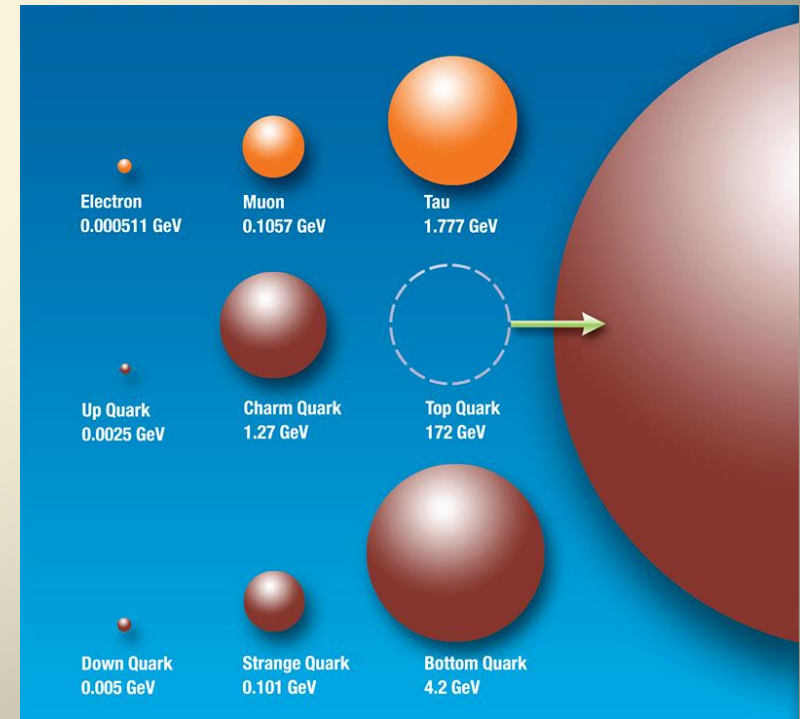
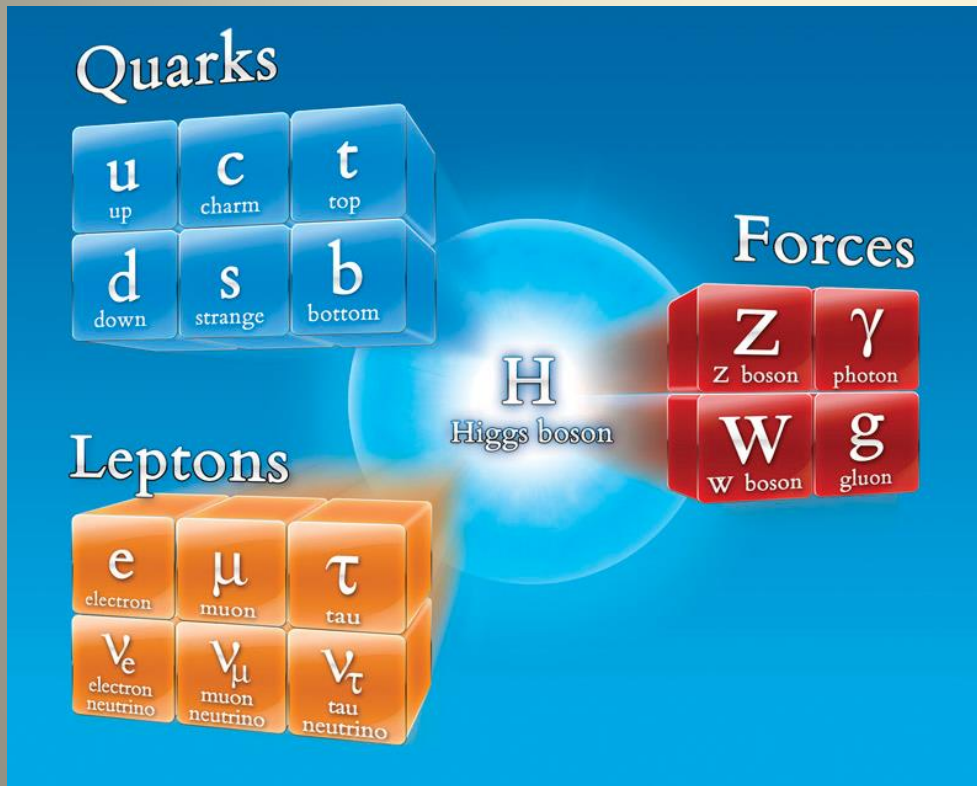
Detektorji v fiziki delcev



- Fizika je del naravoslovja
 - Osnova naravoslovja so **meritve** pojavov v Naravi
 - Modeli, teorija so **povzetek meritev**
- *No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.*
(Albert Einstein)
 - *Tisoč poskusov ne more dokazati, da imam prav, en sam pa lahko dokaže, da se motim.*
- Meritve v fiziki delcev – detektorji
 - Primer univerzalnega detektorja – ATLAS na LHC
 - Primer meritve – meritev Higgsovega bozona

Standardni model - Higgsov bozon

- Standardni model (Tomaž Podobnik):
 - Delci snovi (spin $\frac{1}{2}$): kvarki, leptoni v 3 generacijah
 - Posredniki sil (spin 1): foton (EM), gluon (močna), šibki bozoni W, Z (šibka)
 - Higgsov bozon (spin 0): odgovoren za vse mase osnovnih delcev



Higgs – zmuzljiv plen

- Zakaj ga je bilo tako težko ujeti ?
- Ker je **težek** (težji od atoma zlata)
 - Potrebno je veliko energije ($E = m \times c^2$) za njegovo tvorbo
- Rabimo veliko pokalico !
- **Slabo interagira** s snovjo, iz katere smo sestavljeni
 - Kvarki u & d ter elektroni so zelo lahki
 - Potrebno je veliko trkov, da ga odkrijemo v strahotno velikem ozadju mnogo bolj pogostih procesov
- Pravzaprav rabimo strojnico...
 - ✓ Veliko energijo in pogostost trkov



Energija 1 TeV – Veliki hadronski trkalnik LHC

- LHC – trkalnik protonov z načrtovano težiščno energijo 14 (2x7) TeV ($\sim W_k$ komarja v letu)
- Zakaj curki z energijo 7 TeV ?
 - LHC v predoru LEP (27 km, reciklaža)
 - Krožni tir z uporabo supraprevodnih magnetov, $T = 1,9 \text{ K}$
 - $B_{max} = 8,3 \text{ T} \rightarrow E_{max} = 7 \text{ TeV}$
- Zakaj 14 TeV, če rabimo 1 TeV ?
 - Protoni sestavljeni delci – energijo si delijo poleg treh kvarkov še pari kvark-antikvark in gluoni
 - Energija trkov ni natančno določena, energije večje od TeV možne, a malo verjetne
- Dosežena $E = 7/8/13 \text{ TeV}$ (2011/12/15-18)
- Fizikalni proces – tarča za proton: presek σ
 - Jedra, proton majhne tarče – enota barn: $b = 10^{-28} \text{ m}^2$
 - Delci “manjši“, efektivna tarča: nb, pb, fb
- Zmogljivost trkalnika – luminoznost L [$b^{-1}s^{-1}$]
- Pogostost procesa R [s^{-1}]
- Število dogodkov $\propto \int L dt$ [b^{-1}], LHC [fb^{-1}]



Pogostost trkov

Luminoznost (trkalnik)

$$R = \sigma \cdot L$$

Presek

(fizika procesa)

Delovanje LHC do 2018

- Dve obdobji delovanja

- Run1 2010-2012

- $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ pri 7 TeV
 - $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$ pri 8 TeV

- Run2 2015-2018

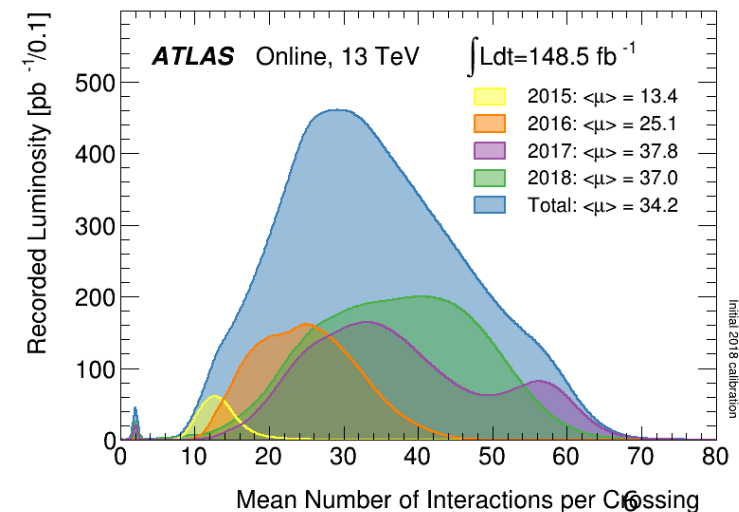
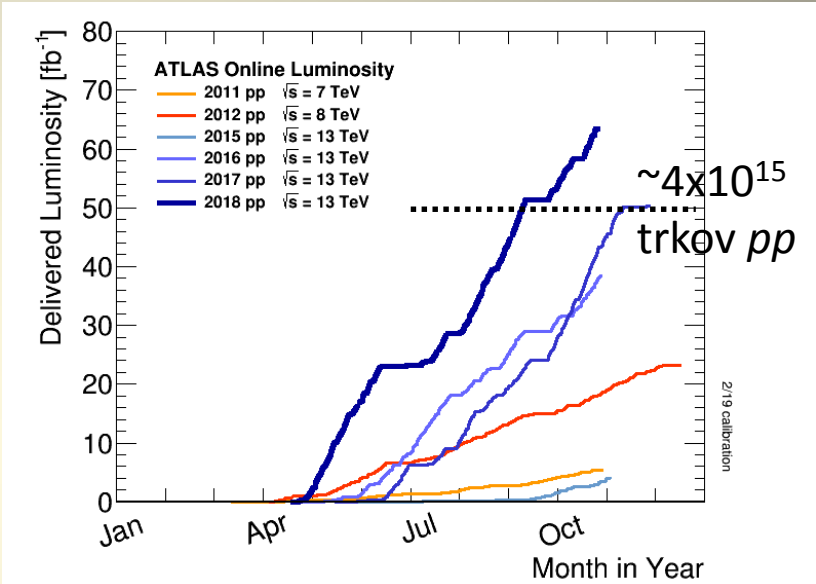
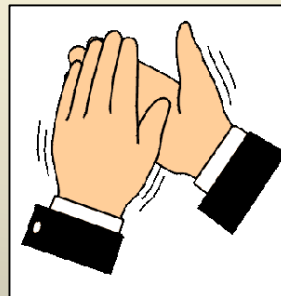
- $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$ pri 13 TeV
 - max. $\sim 20 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$
 - $\sim 1.6 \times 10^9$ trkov/s
 - ~ 50 trkov/gručo

- $1 \text{ fb}^{-1} \approx 8 \times 10^{13}$ trkov pp

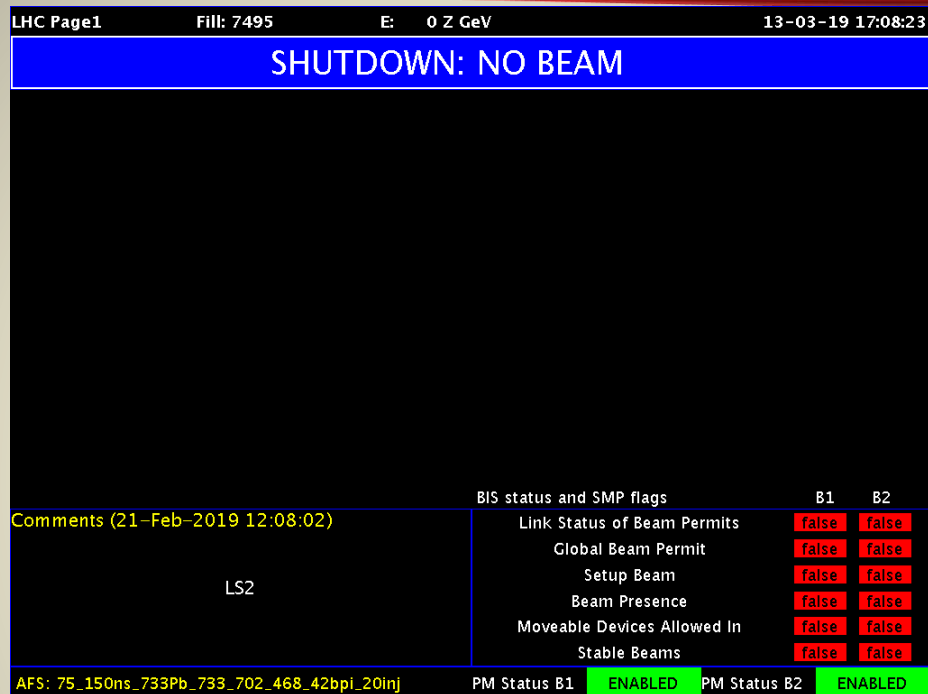
- Skupaj $\sim 1.5 \times 10^{16}$ trkov

- 15 milijonov milijard

- $\text{BNP}_{\text{svet}} \sim 10^{14}$ USD



Delovanje LHC v 2019/20/21

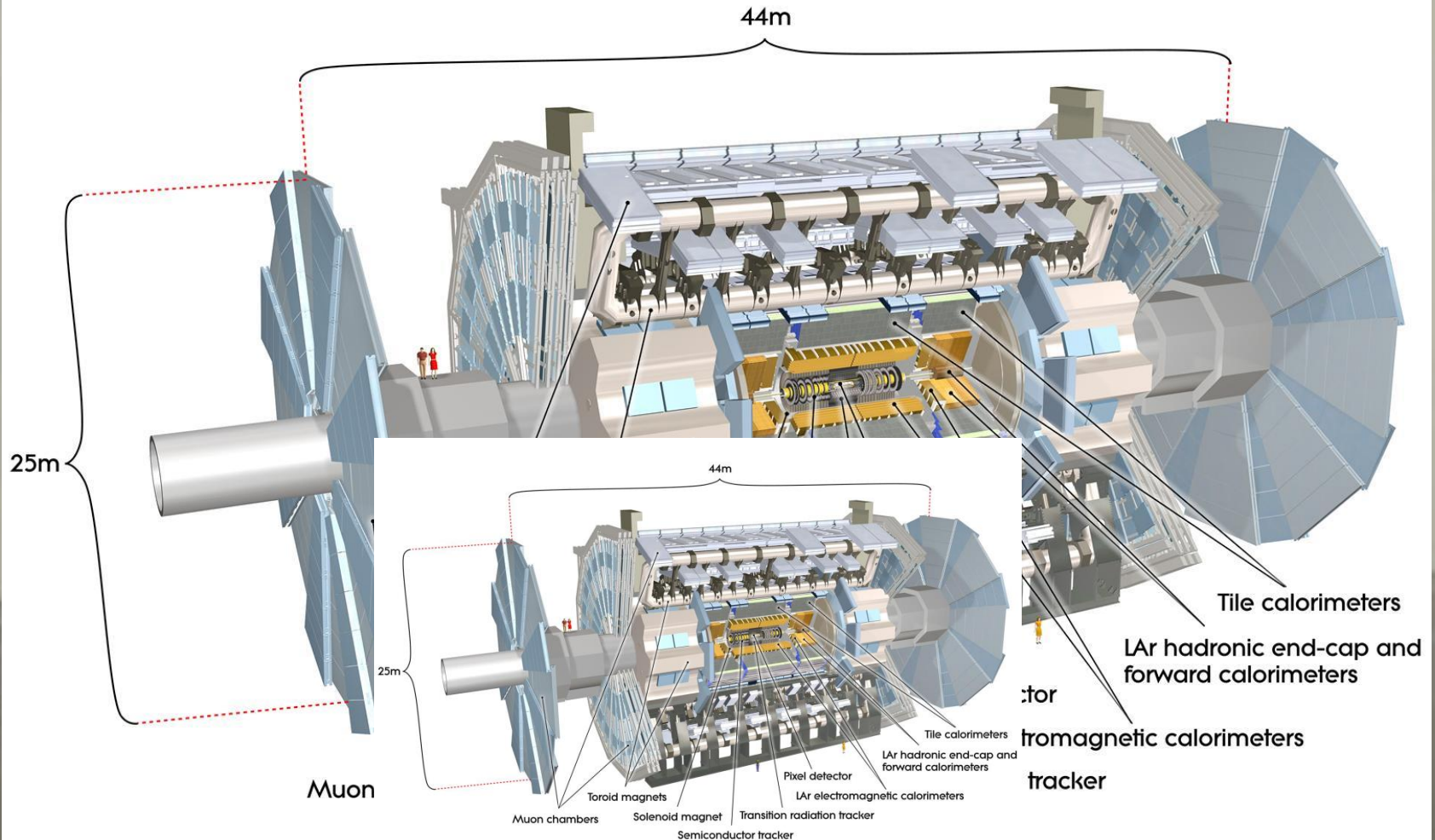


The screenshot shows the LHC control interface. At the top, it displays 'LHC Page1', 'Fill: 7495', 'E: 0 Z GeV', and '13-03-19 17:08:23'. A large blue banner at the top center reads 'SHUTDOWN: NO BEAM'. Below this, the main area is black. At the bottom, there is a table with the following content:

BIS status and SMP flags		B1	B2	
Comments (21-Feb-2019 12:08:02) LS2	Link Status of Beam Permits	false	false	
	Global Beam Permit	false	false	
	Setup Beam	false	false	
	Beam Presence	false	false	
	Moveable Devices Allowed In	false	false	
	Stable Beams	false	false	
AFS: 75_150ns_733Pb_733_702_468_42bpi_20inj	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED

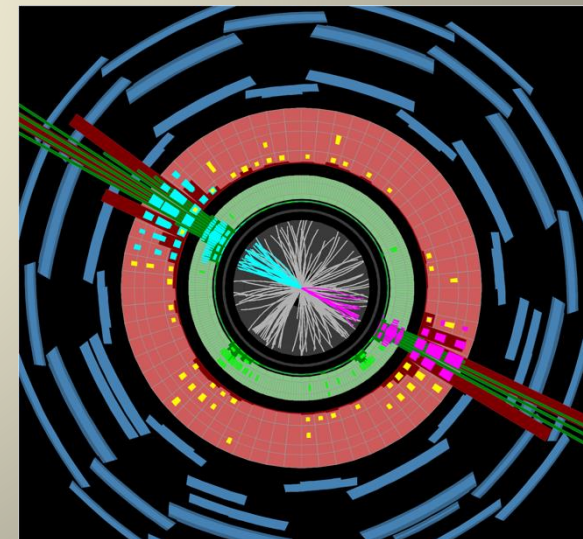
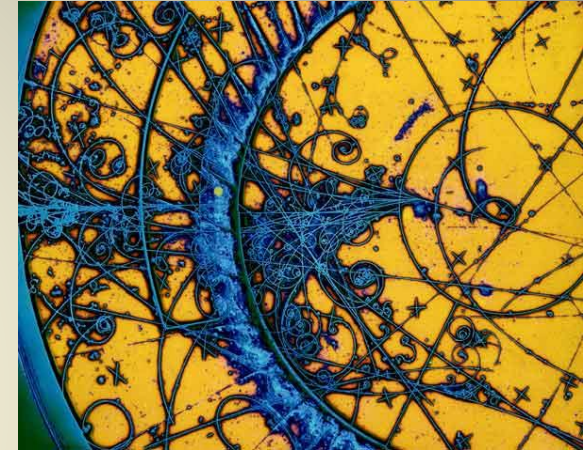
- Triletne (Covid +1 leto) priprave na tretje obdobje delovanja LHC – Run3
- Cilja
 - Doseči energijo 14 TeV
 - Bolj stabilna luminoznost: 300 fb⁻¹ v letih 2022-24 (podvojitve dosedaj zbrane)
- Potem 3-letna prekinitev za nadgradnjo LHC in detektorjev za HL-LHC
 - Cilj: ~3000 fb⁻¹ v ~10 letih

Detektor ATLAS



Kaj lahko zaznamo v detektorju ?

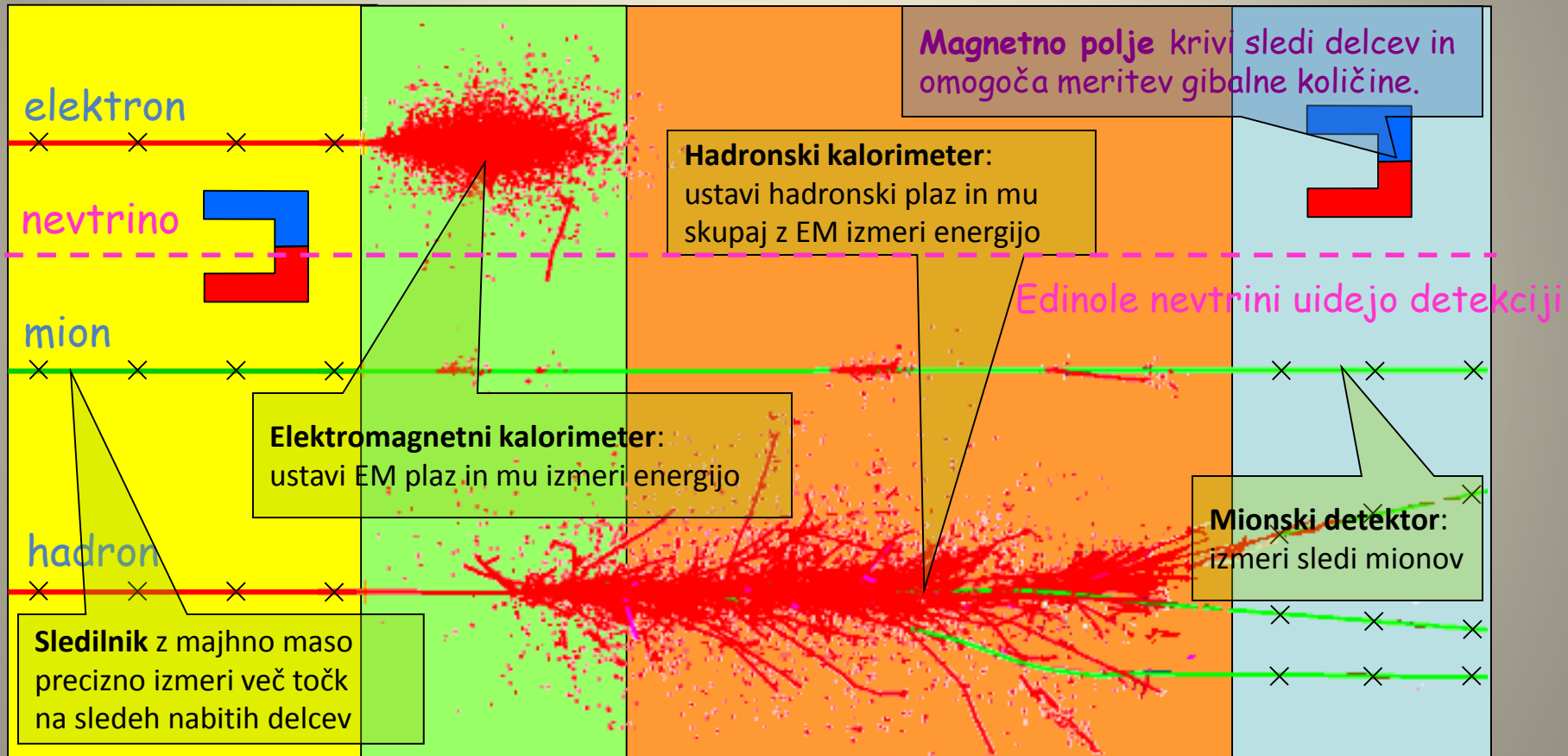
- Težji delci razpadajo v lažje
 - Lahko zelo hitro, Higgsov delec živi $\sim 10^{-22}$ s
- Zaznamo lahko (relativno) stabilne delce
 - Od osnovnih: elektron, mion ($\sim \mu\text{s}$), foton
 - Kvarki in gluoni ne pridejo daleč zaradi lastnosti močne sile
 - Tvorijo se dodatni pari kvark-antikvark
 - Nastanejo mezoni (kvark-antikvark) in barioni (3 kvarki)
 - Skupno ime hadroni
 - “Stabilna” mezona: pion, kaon (~ 10 ns), bariona: p, n
 - Pri velikih energijah kvarka/gluona nastane hadronski pljus (jet)
 - >10 hadronov (\sim pionov) znotraj stožca v smeri kvarka



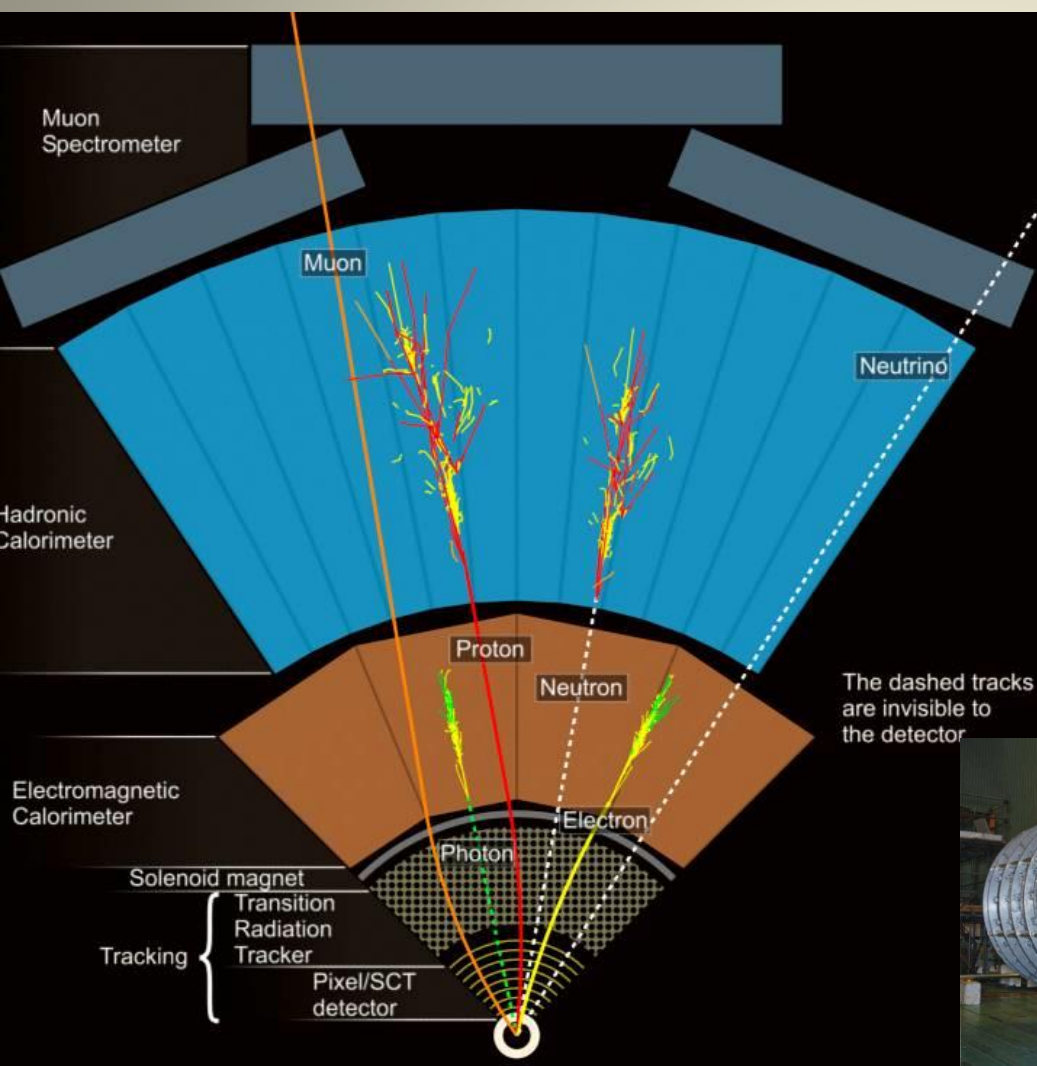
Kaj merimo ?

- Osnova zaznave: ionizacija nabitih delcev v snovi
 - Nevtralne (foton) najprej pretvorimo v nabite: $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
- Tipično delcem v detektorju izmerimo
 - Gibalno količino \vec{P} (sledilnik)
 - Ukrivljenost sledi v magnetnem polju: $P_T = eBr$
 - Tir vijačnica: $P = P_T / \cos \theta$
 - Smer \vec{P} iz presečišča sledi – mesto nastanka (vertex)
 - Energijo E (kalorimeter)
 - Delec ustavimo v snovi
 - Velika energija – plaz sekundarnih delcev
 - Izmerimo odziv snovi na odloženo energijo delca
 - **Naboj**, svetloba... temperatura
- V PTR velja zveza: $(mc^2)^2 = E^2 - (cP)^2$

Generičen detektor na LHC za (skoraj) vse delce



Ureditev za trkalnik



- Detektorji v plasteh obdajajo mesto trkov
- ATLAS uporablja dva sistema magnetov
 - SC tuljavo z 2 Tesla za detektor sledi delcev
 - Gigantski SC toroid s 4 T (max) za meritev mionov



ATLAS – sledilnik

Sledilnik – meritev sledi nabitih delcev

– Blaziničasti (pixel) silicijev detektor

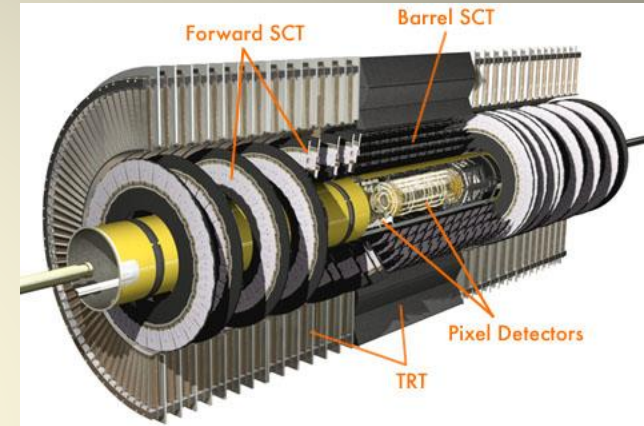
- Detektorji z blazinicami dimenzij $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ in $50 \times 250 \mu\text{m}^2$. Štirje valji in deset diskov obdajajo žarkovno cev.
- Bralna elektronika neposredno prispajkana na senzor z In kroglicami, $\sim 200 \text{ M}$ senzorjev in bralnih kanalov
- Natančne točke na začetku sledi omogočajo rekonstrukcijo mest razpadov kratkoživih hadronov z natančnostjo pod mm
- Močno orodje za prepoznavo sledi

– Silicijev pasovni detektor – SCT (slovenska skupina)

– Detektor prehodnega sevanja – TRT

- Kremenove slamice $\Phi=4 \text{ mm}$, poljne s plinsko mešanico, ki vsebuje ksenon
- V sredini vsake slamice napeta žička – deluje kot plinski proporcionalni števec
- Pri prehodu meje med kremenom in plinom nabiti delci sevajo žarke X – prehodno sevanje
- Zaznava prehodnega sevanja s fotoefektom na ksenonu
- Sevanje sorazmerno z Lorentzovim faktorjem $\gamma = E/mc^2$, torej mnogo močnejše za elektron kot za pion
- Veliko število (~ 40) signalov na sledi – elektronska mehurčna celica

– Celoten sledilnik v supraprevodni tuljavi premera 2.2 m, dolžine 7 m in s poljem 2 T



ATLAS – polvodniški sledilnik SCT

- Srednji del sledilnika pri polmeru od 30 do 56 cm in $|z| < 2.8$ m

- Centralni valjasti del

- 2112 detektorskih modulov, vsak s po štirimi silicijevimi mikropasovnimi senzorji, paroma zasukanani za 20 mrad
- Senzorji dimenzije $\sim 6 \times 6$ cm² s 768 pasovi širine 80 μ m
- Nameščeni na štiri koncentrične valje iz karbonskih vlaken

- Dva pokrova

- 1976 detektorskih modulov trapezne oblike
- Nameščeni na 9 diskov na vsaki strani, ki so vrinjeni v valj, vse strukture so iz karbonskih vlaken

- Čitalna elektronika – 12 128-kanalnih integriranih vezij na hibridu ob senzorjih, povezava z ožičenjem

- Elektronika ima 132 celic globoko matriko za spravljanje podatkov do prihoda prožilnega signala

- Prenos podatkov in krmiljenje vezij po optični povezavi

- Celoten detektor 63 m² silicijevih senzorjev in 6,3 M bralnih kanalov

- Sevalno polje v 10 letih obratovanja do 100 kGy in 2×10^{14} delcev/cm²

- 4096 modulov troši ~ 40 kW moči, hlajenje z izhlapevanjem freona, okoli 150 “hladilnikov” SCT hladi na -7°C

- Izdelava detektorskih modulov

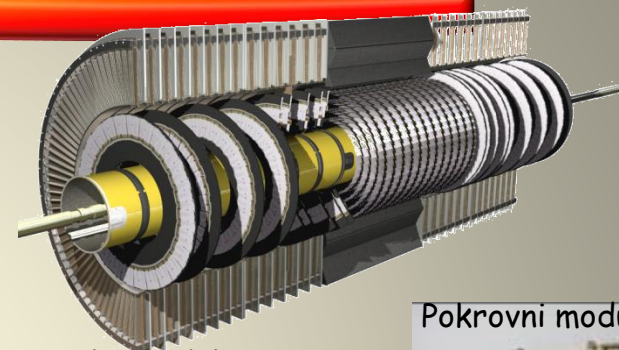
- Porazdeljena izdelava v 11 središčih (4 centralne, 7 pokrovne)

- Izdelava trajala ~ 2 leti

- Montaža modulov na strukture

- Oxford centralni del, Liverpool in NIKHEF vsak svoj pokrov

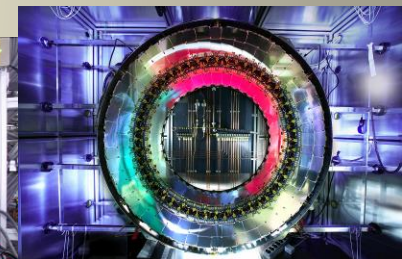
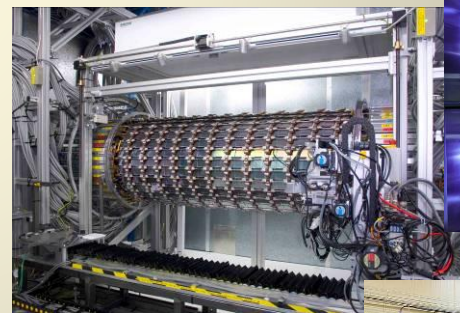
- Končni preizkus in sestavljanje s TRT - CERN



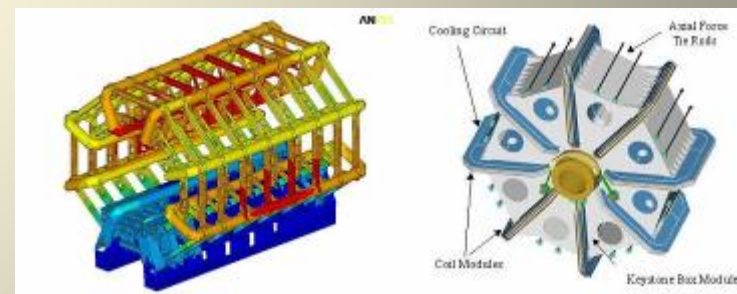
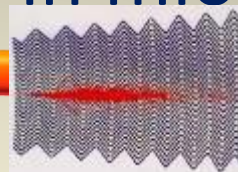
Centralni modul



Pokrovni modul



ATLAS – kalorimetra in mionski sistem



- ElektroMagnetni kalorimeter – meritev e in γ
 - Vzorčevalni kalorimeter
 - Aktivni del tekoči argon, v katerem nabiti delci EM plazmu ionizirajo kapljevino
 - Absorber svinčene plošče prevlečene s segmentiranimi bakrenimi elektrodami, ki zbirajo naboj iz argona; plošče zvite v harmoniko za čimkrajšo pot in hitro zbiranje naboja
 - Celoten detektor v kriostatu na temperaturi tekočega dušika 77 K
 - Meritev energije elektronov in fotonov z ločljivostjo 1,5 % pri $E = 100 \text{ GeV}$
 - Drobna segmentacija elektrod omogoča ločevanje posamičnih fotonov od tistih iz $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Hadronski kalorimeter – meritev hadronov
 - Vzorčevalni kalorimeter
 - Aktivni del plošče iz plastičnega stinitilatorja, v katerem nabiti delci hadronskega plazmu scintilirajo; nastalo svetlobo vodimo po svetlobnih vodnikih do fotopomnoževalk
 - Absorber železo
 - Moduli v obliki trapezoida se zložijo kot obok v valj
 - Kalorimeter predstavlja hkrati povratni jarem tuljave notranjega detektorja
- Mionski detektor - meritev mionov
 - Dve vrsti plinskih detektorjev
 - Hitri detektorji (TGC, CSC) za proženje
 - Precizni detektorji (MDT, RPC) za natančno merjenje sledi
 - Mionski sistem v supraprevodnem svitku; centralni del z zunanjim premerom 20 m, dolžino 23,5 m in s poljem do 3,9 T, zaprt s pokrovoma, v katerih je tudi toroidalno polje do 4,1 T

Kolaboracija ATLAS

- Pri detektorju ATLAS sodeluje
 - ~3000 znanstvenikov
 - 1800 z doktoratom
 - 1200 doktorskih študentov
 - 178 institucij
 - 38 držav
- Od zasnove traja projekt že skoraj 30 let
- Investicija ~550 MCHF
- Slovenska skupina sodeluje pri projektu od junija 1996



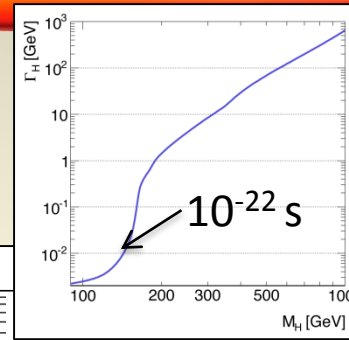
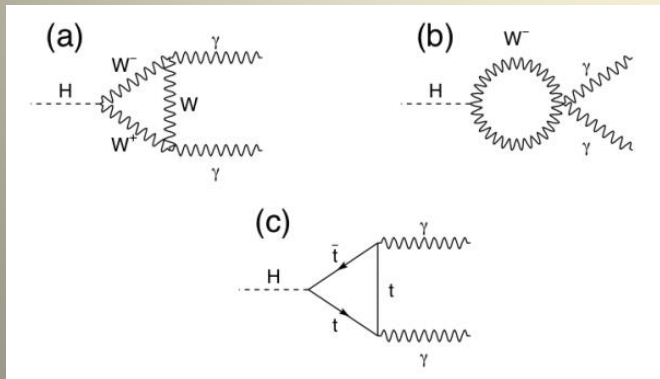
Tvorba Higgsovega delca na LHC



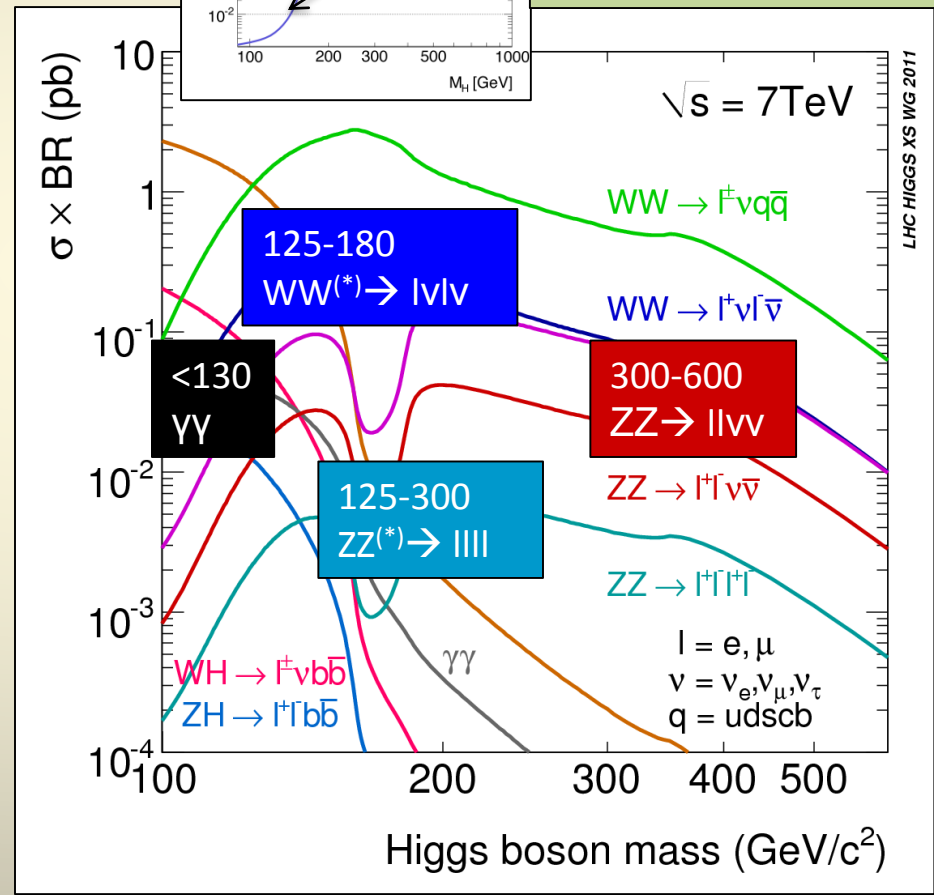
V kateri kopicici je igla ?

Razpadi Higgsa

- Higgsovi razpadni načini določeni s sklopitvam
 - Prevladujejo razpadi v šibke bozone W in Z , če je masa dovolj velika
 - Eden od bozonov je lahko virtualen
 - Za majhne mase razpadi v dva fotona, kvarka b in lepton tau
 - Dva fotona preko zank

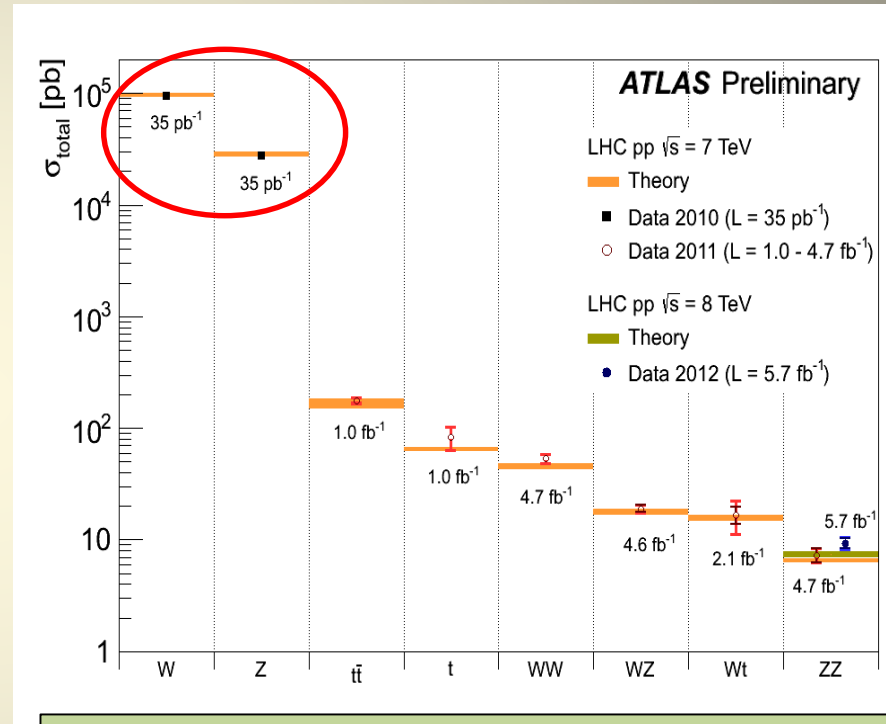


Hitreje kot razpade, manj natančno maso ima - Heisenberg



Zaznava Higgsa na LHC

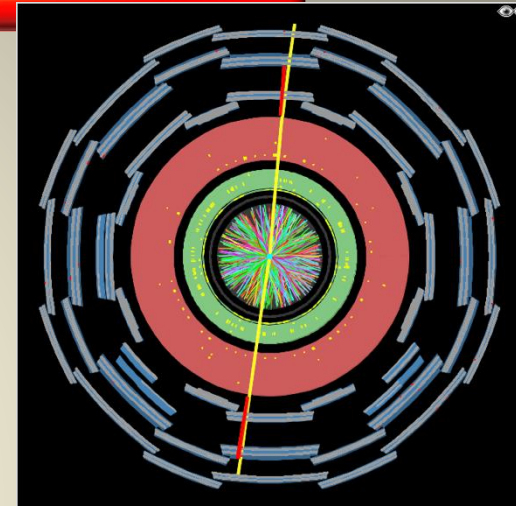
- Redek proces
 - Tvorba le $\mathcal{O}(10^{-10})$ od celotne
 - Nadaljnje zmanjšanje zaradi izbire razpadnega načina
- Ogromno ozadje
 - Zahtevamo značilne lastnosti dogodkov
 - Leptoni (e, μ) iz W, Z
 - Fotoni z veliko energijo
 - “Zlati” razpad: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ in $H \rightarrow \gamma\gamma$ lahko v celoti rekonstruiramo: določimo maso H, toda σ_{BR} le $\mathcal{O}(10 \text{ fb})$
 - Pri $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ uideta dva ν , toda $\sigma_{BR} \mathcal{O}(100 \text{ fb})$
 - Razumeti moramo ozadje in ga znati modelirati
 - Iz podatkov in računalniške simulacije



Včerajšnji signal je
današnje ozadje!
(100M W, 10M Z, 100M t)

Dodatna ovira – več trkov

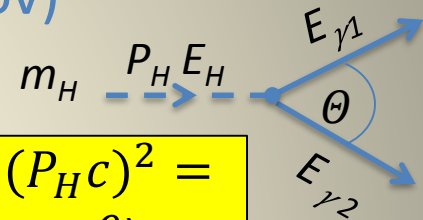
- Do ~ 50 trkov, naloženih drug na drugega
- Zahtevno okolje
 - $\mathcal{O}(1000)$ sledi,
 - več 10 izvorov trkov
 - izkaz perfektne zmogljivosti detektorja sledi
- Izgubimo npr. informacijo, od kod izhaja $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Še težje nadzorovati ozadje



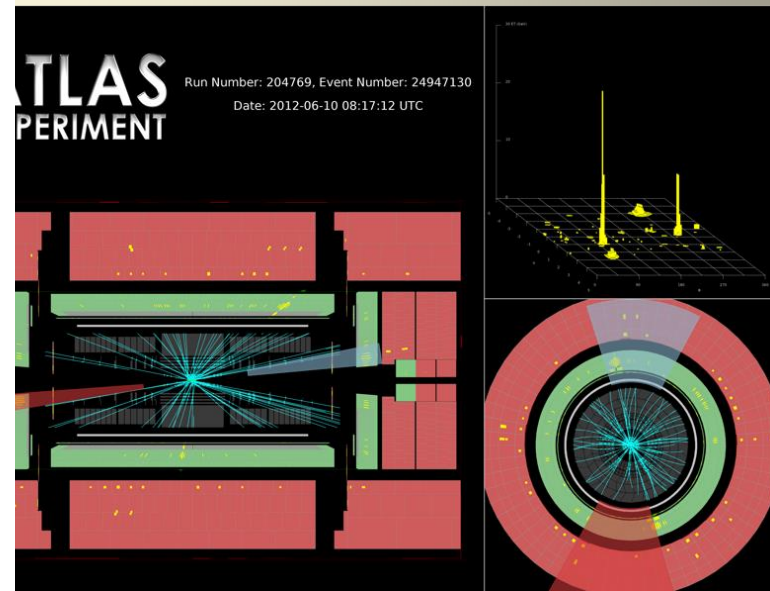
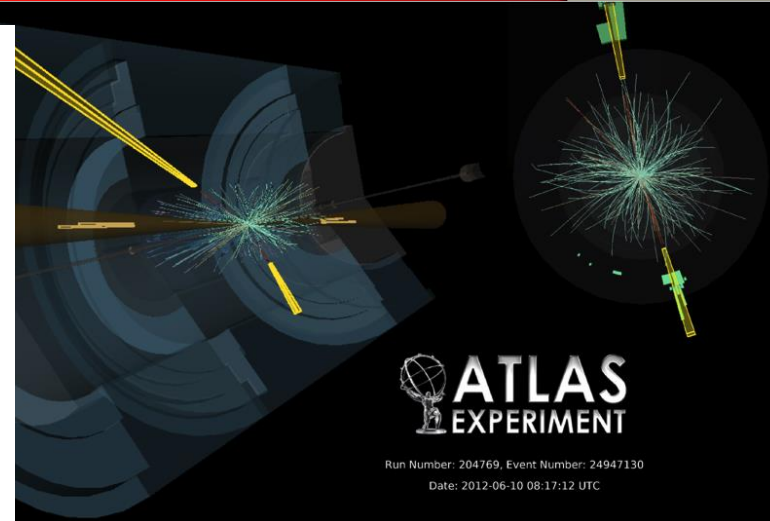
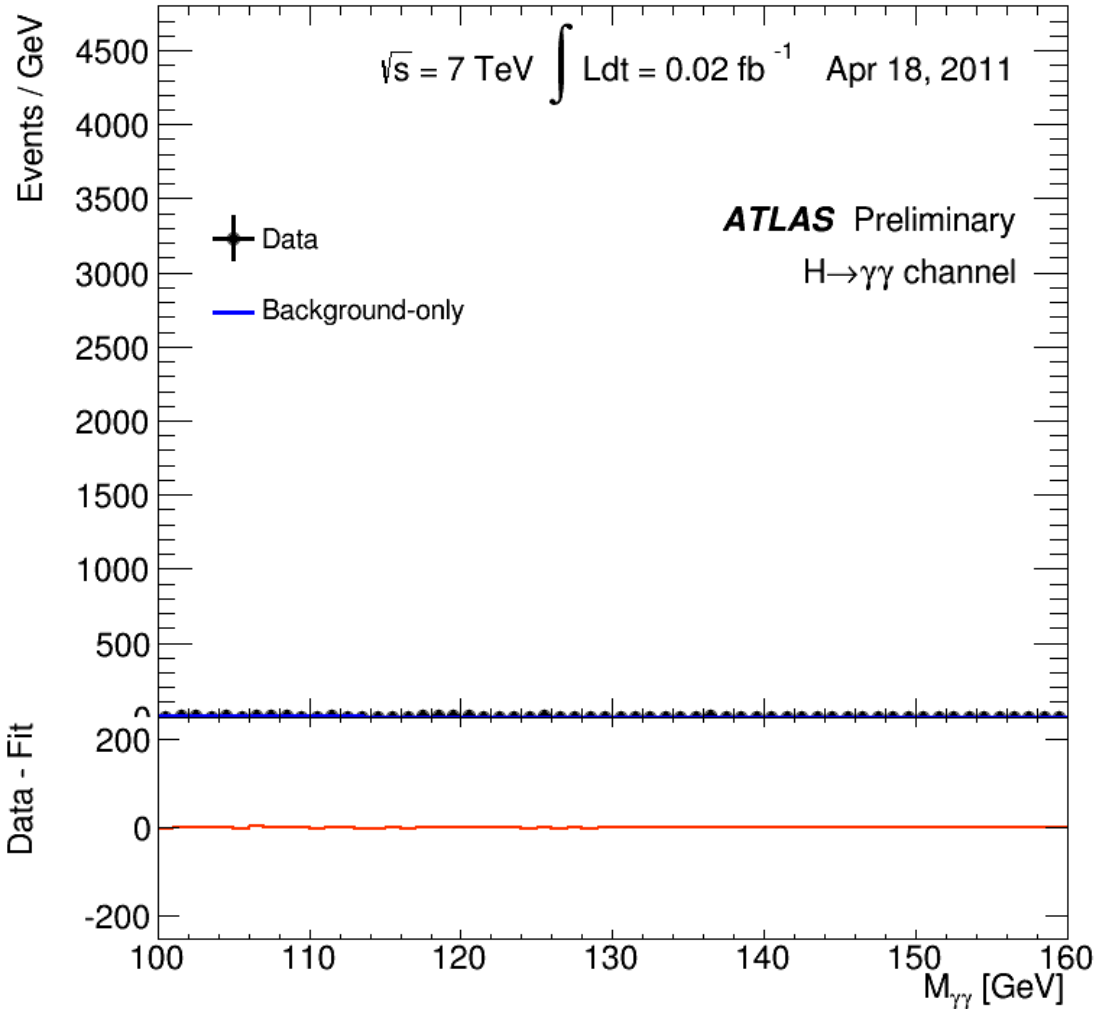
Signal v prisotnosti ozadja

- Najmočnejši razpadi za detekcijo pri majhnih masah H
 - $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ (štetje presežka dogodkov)
 - $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ (masa H)
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$ (masa H)
- Pri vseh prisotno ozadje
 - Leptoni iz razpadov W in Z, ozadje QCD
- Mahjen σ_{BR} botruje majhnim vzorcem signala
 - Fluktuacija signala navzdol lahko prepreči zaznavo
 - Lažno negativen rezultat (signal tolmačen kot ozadje)
 - Fluktuacija ozadja navzgor lahko potvori signal
 - Lažno pozitiven rezultat (ozadje tolmačeno kot signal)
- Rabimo previdno, nepristransko statistično analizo !

$$(m_H c^2)^2 = E_H^2 - (P_H c)^2 = 2E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos \theta)$$

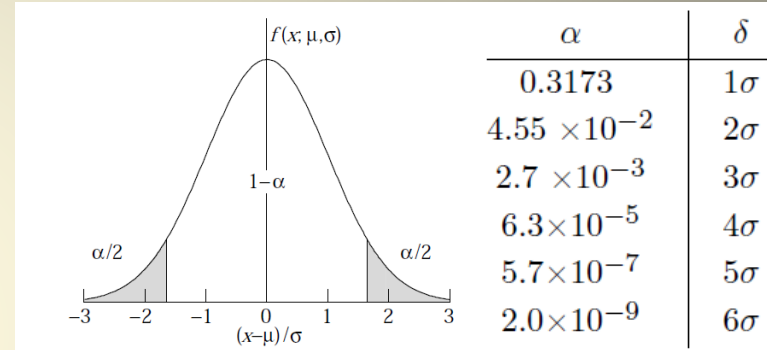


Vzorec $H \rightarrow \gamma\gamma$



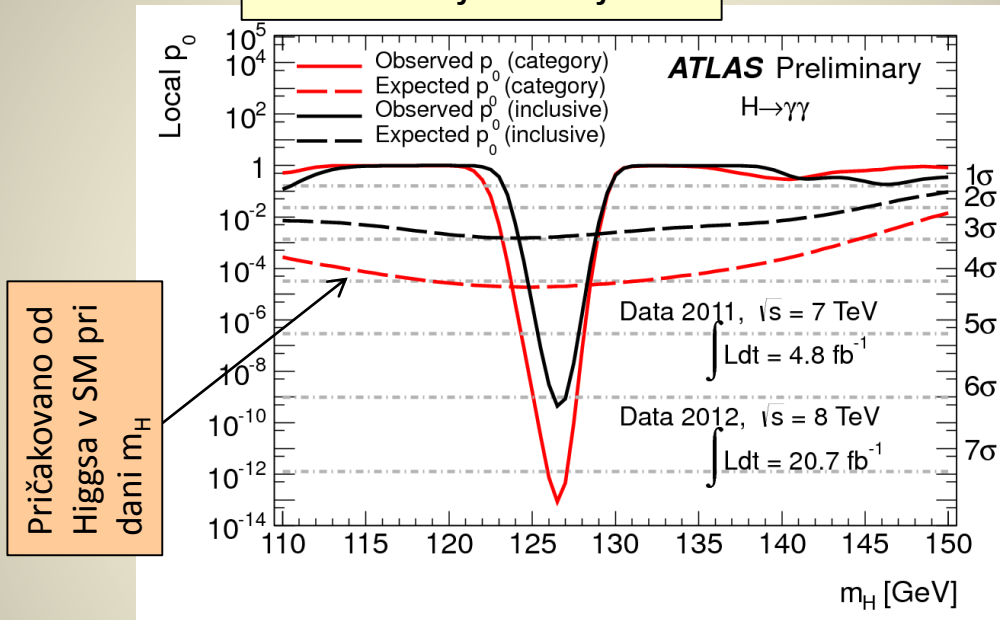
Fluktuacije ozadja

- Ozadje je naključen proces, N_{bg} je pogosto dobro opisano s Poissonovo (Gaussovo) porazdelitvijo
- N - σ signifikanca je povezana z verjetnostjo za odmik izmerka od pričakovane vrednosti
- Za **izključitev** prisotnosti signala dopuščamo $\sim 2 \sigma$ fluktuacijo S+B od pričakovane, s čimer dopuščamo 5 % lažnih negativnih rezultatov
- Za meritev novih delcev uporabljamo dve dogovorjeni meji
 - 3 σ : **dokaz**, 0.13 % lažnih pozitivnih rezultatov
 - 5 σ : **odkritje**, $< 3 \times 10^{-7}$ lažnih pozitivnih rezultatov
- Za ilustracijo teh mej
 - Za pošteno kocko, ki ustreza ozadju brez signala
 - 1 σ fluktuacija: \sim šestica v prvem poskusu
 - 2 σ fluktuacija: \sim 2 zaporedni šestici
 - 3 σ **dokaz**: \sim 4 zaporedne šestice v dveh poskusih
 - 5 σ **odkritje**: \sim 8 zaporednih šestic
- **Kdaj boste posumili, da nekdo goljufa ?**



Odkritje H v razpadu $H \rightarrow \gamma\gamma$

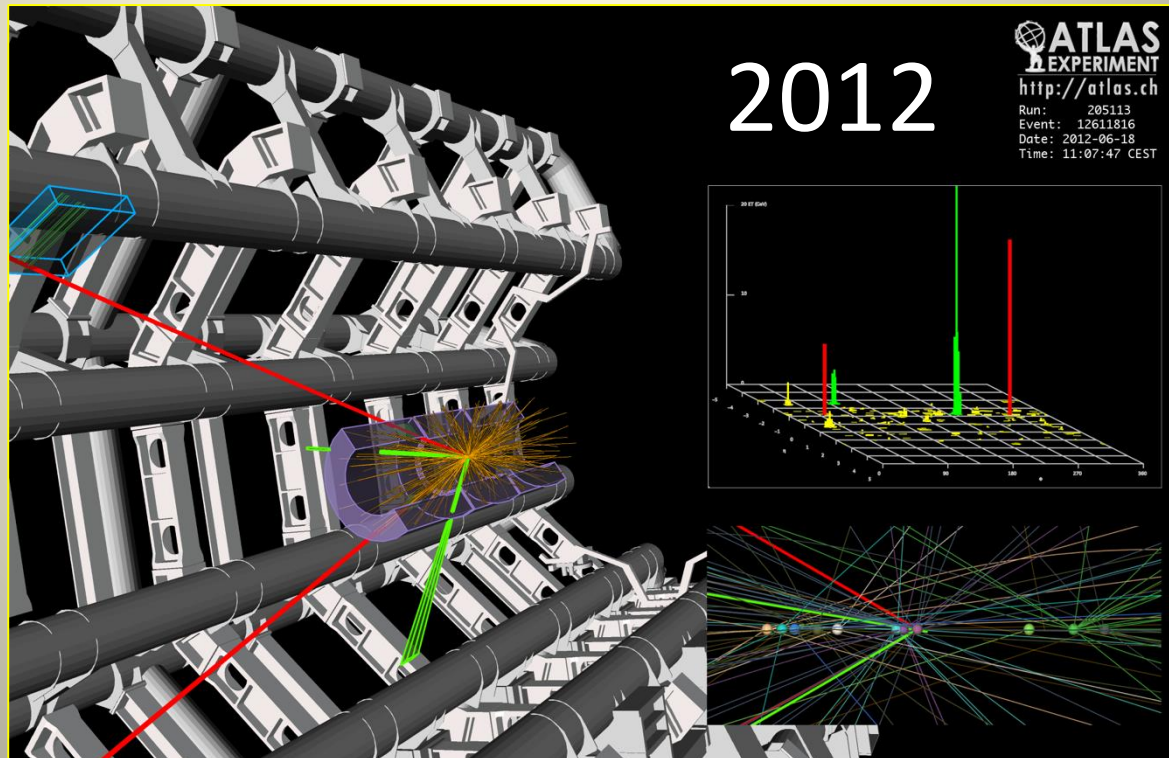
p_0 – skladnost izmerka s fluktuacijo ozadja



- Maksimalno neujemanje s predpostavko o ozadju pri $m_H = 126.5$ GeV:
 - Vrednost p_0 : $\approx 10^{-13}$ ali **7.4 σ** pri **126.5 GeV**
 - Pričakovano od Higgasa v SM : $\approx 4.1 \sigma$
- Opažamo več signala, kot ga napove SM... fluktuacija signala navzgor?
- **Odkritje** v tem razpadnem načinu, ni več smiselno postavljati izključitve...

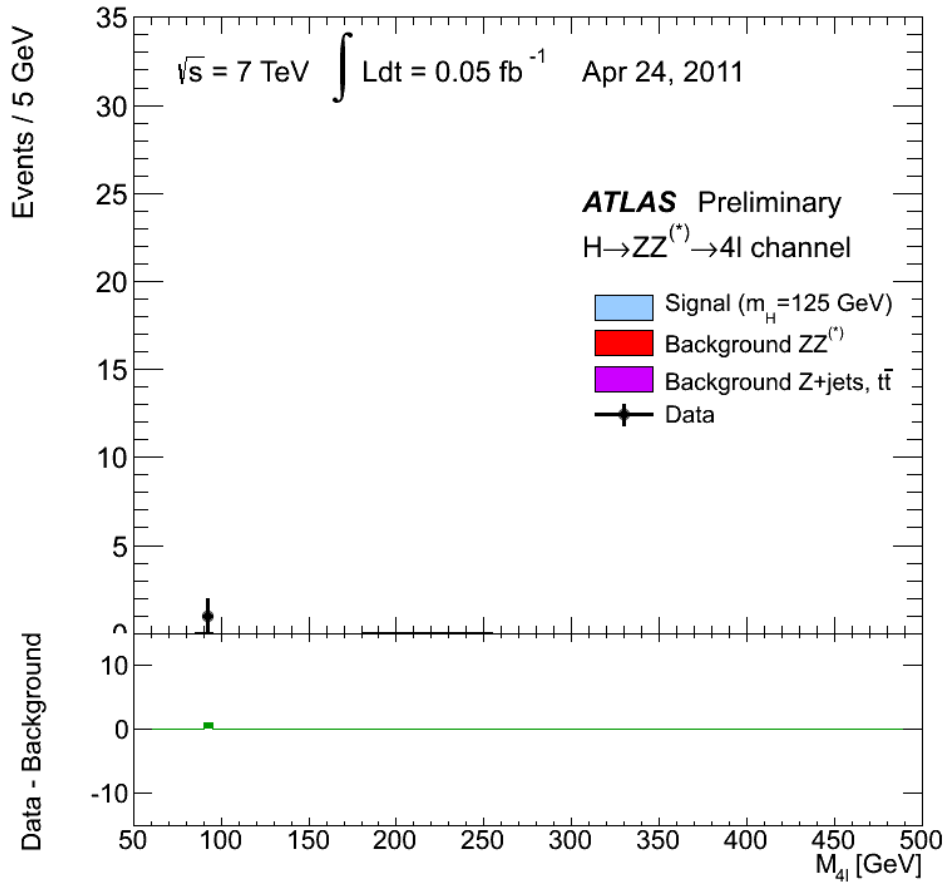
$$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$$

- Presek je samo 2-3 fb, vendar:
 - Lahko rekonstruiramo maso $H \rightarrow$ signal se zbere v ozkem vrhu
 - Čist signal: $S/B \gtrsim 1$, ozek vrh širine $\sigma \approx 2$ GeV
- $ZZ^{(*)} \rightarrow 4e, 4\mu, 2e2\mu$

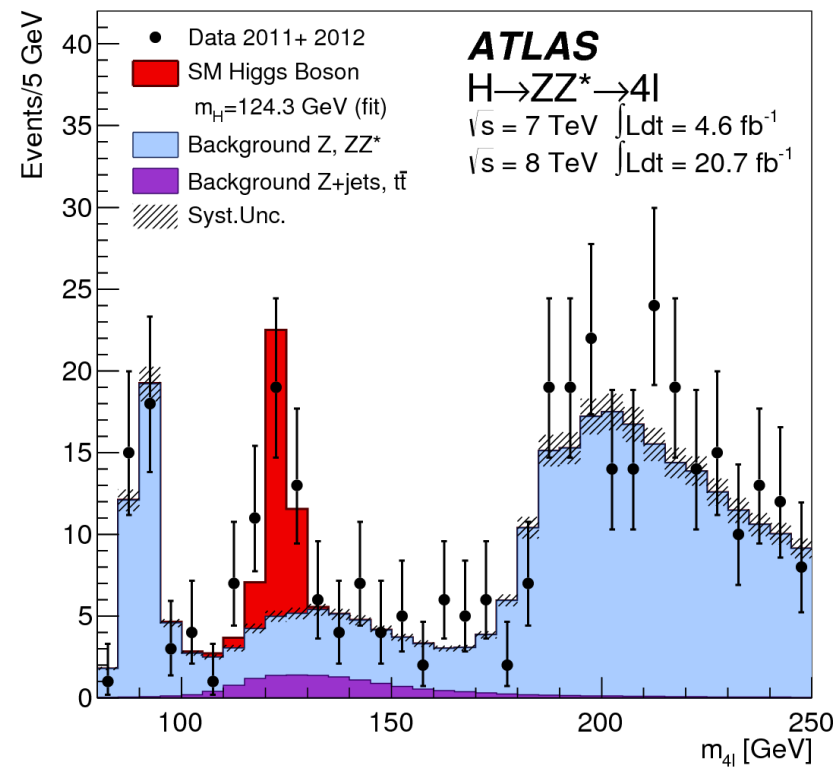


Vzorec $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$

Dogodki med $120 < m_{4l} < 130$ GeV

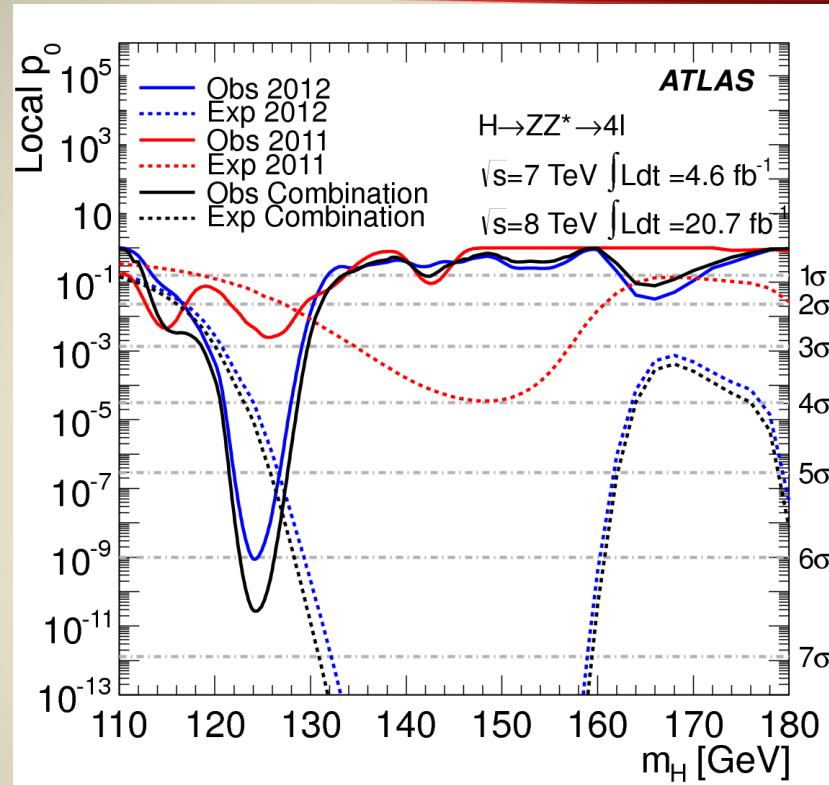


	Signal	ZZ^*	Z + jets, $t\bar{t}$	Observed
4μ	6.3 ± 0.8	2.8 ± 0.1	0.55 ± 0.15	13
$2e2\mu/2\mu2e$	7.0 ± 0.6	3.5 ± 0.1	2.11 ± 0.37	13
$4e$	2.6 ± 0.4	1.2 ± 0.1	1.11 ± 0.28	6



H → ZZ(*) → 4l Results

p_0 – skladnost podatkov z ozadjem
brez prisotnosti signala



- Maksimalno neujemanje s predpostavko o ozadju pri $m_H = 124.3$ GeV:
 - Vrednost p_0 : $\sim 2.7 \cdot 10^{-11}$ ali 6.6σ pri **124.3 GeV**
 - Pričakovano od Higgosa v SM : $\sim 4.4 \sigma$
- Potrditev odkritja v neodvisnem razpadnem načinu

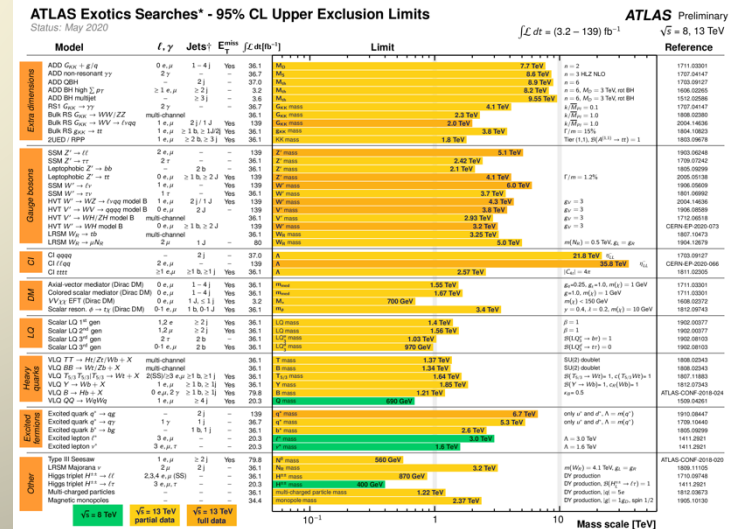
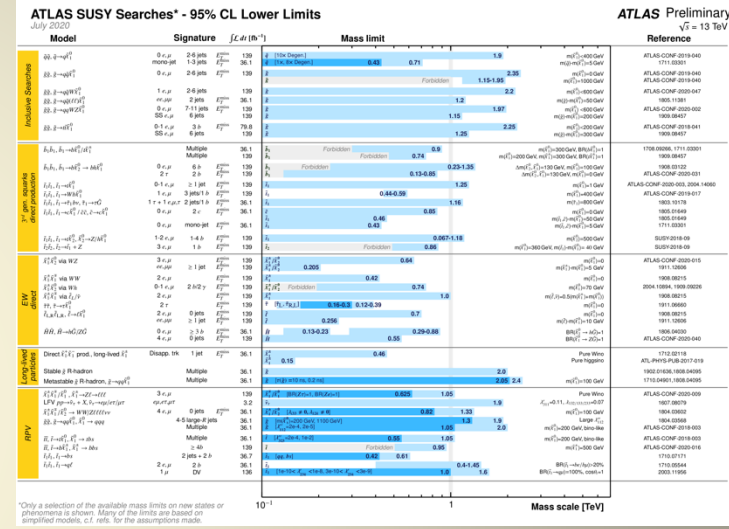
Nova fizika ?

- Odkritje Higgsovega bozona zaokrožilo Standardni model
 - Vse izmerjene lastnosti H (tvorba, razpadni načini, spin...) se dobro ujemajo z napovedmi Standardnega modela
- ATLAS in LHC delujeta perfektno
 - >10x več trkov pri višjih energijah kot ob odkritju Higgsovega bozona 4.julija 2012
 - Optimani izkoristki detektorja in številne izboljšave orodij za fizikalno analizo

- Žal ni signalov, ki jih ne bi mogli pojasniti v okviru fizike Standardnega modela

- Odsotnost signalov lahko v okviru modelov Nove fizike pretvorimo v spodnje meje za maso novih delcev

- Supersimetričnih delcev ni do 1-2 TeV
- Bolj eksotičnih delcev ni celo do 10 TeV



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models. C.f. refs. for the assumptions made.

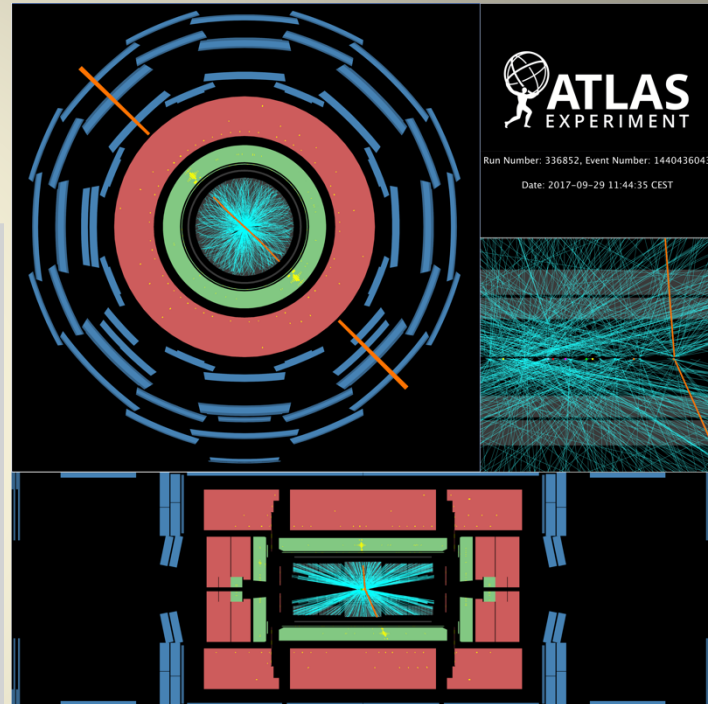
(Lažni) žarek upanja...

- Leta 2015 sta ATLAS in CMS opazila vrh v spektru dvofotonske mase pri 750 GeV
- Podobna signifikanca ($\text{ATLAS} \lesssim 4\sigma$) kot za Higgsov bozon le v $H \rightarrow \gamma\gamma$ ob odkritju
- Toda treba je biti previden
 - $\lesssim 3\sigma$, če upoštevamo, da je vrh lahko kjerkoli v spektru
 - Odločitev, da počakamo na več podatkov naslednje leto
- >10x več podatkov v 2016
- Vrh je izginil !
- V vmesnem času je bilo objavljenih 600 člankov o tolmačenju “opaženega” vrha...

Zadnji rezultati

iz Run2

- Iskanje novega bozona, ki bi razpadel na elektrone in pozitrone
 - Signal z dvema hitrima elektrona
 - Ni opazena masa para 4 (E1 = E2 ≈ 2 TeV)
 - Težji brzo šibkega bozona z pi razpadom $Z' \rightarrow e^+e^-$ in v spektru tvoril vrh pri svoji masi
- Nikakršnega presežka nad napovedanim ozadjem po SM
- Meje na Z' okoli 5 TeV



Zaključek



- Detektor ATLAS je izjemno uspešno deloval na LHC med 2010 in 2018 (Run1 in Run2)
 - Odkritje Higgsovega bozona in meritve njegovih lastnosti
 - Precizne meritve procesov Standardnega modela
 - Iskanje signalov Nove fizike
 - Fizika trkov težkih ionov
- Skupaj okoli 950 znanstvenih člankov
- Žal (še) nismo opazili pojavov izven Standardnega modela
 - Postavljene meje preko 1 TeV na večino modelskih napovedi
- Od 2022-24 nas čaka Run3
 - 14 TeV in dvakrat več trkov
- Potem pa še HL-LHC od leta 2027
 - Še 10x več trkov v 10 letih z nadgrajenim detektorjem ATLAS