

Detektorji v fiziki delcev

Marko Mikuž

Univerza v Ljubljani & Institut Jožef Stefan

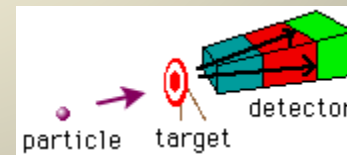
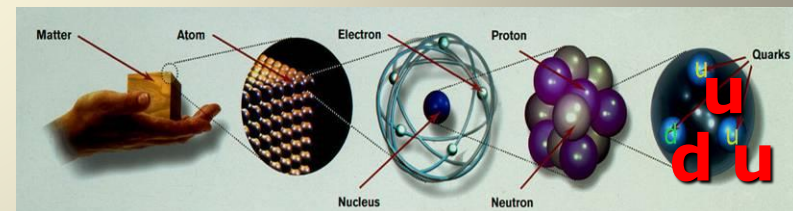
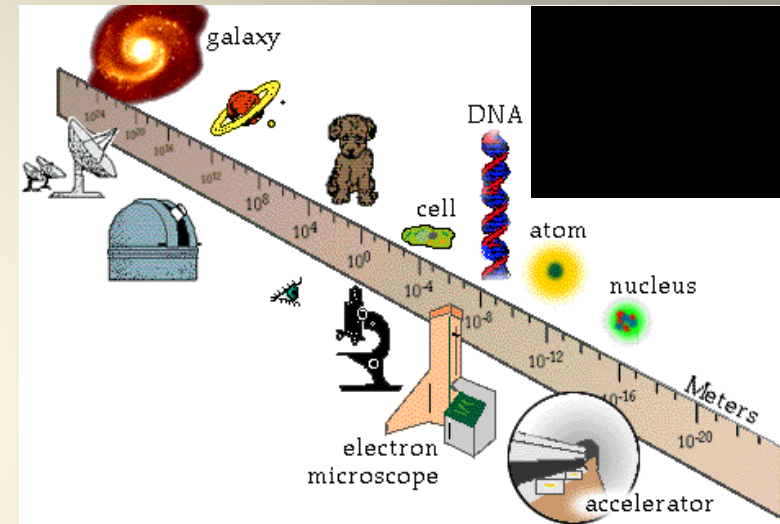
Slovenian Teachers Programme

CERN, 5. oktober 2023



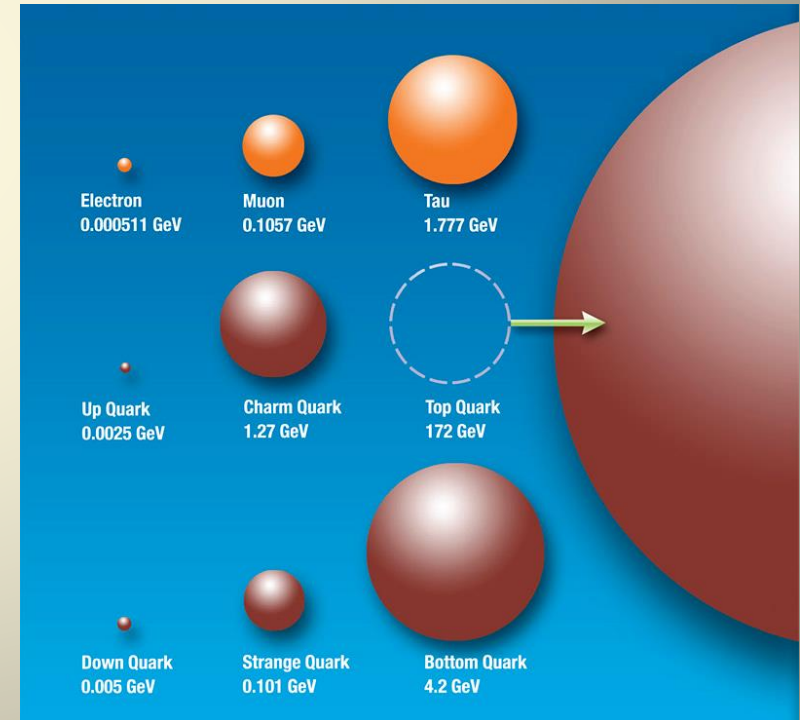
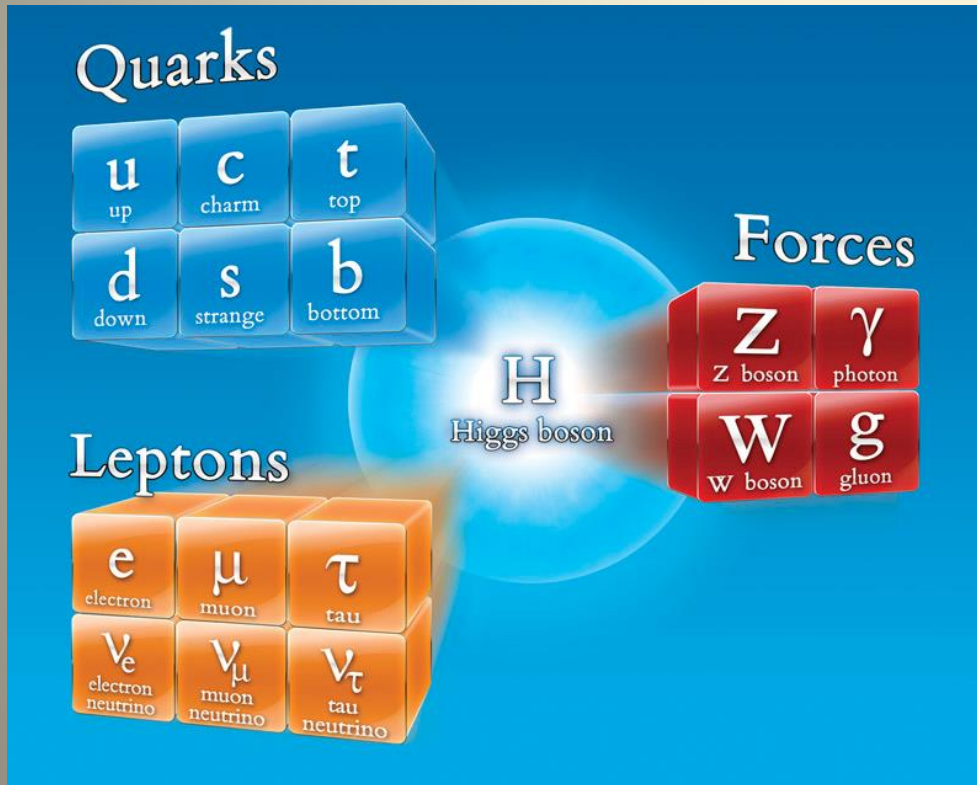
Zakaj pospeševalniki ?

- Zaznavanje objektov v Naravi
- Detekcija valovanja, ki ga objekt zmoti
- Uklon – valovanje ne zazna objekta, ki je mnogo manjši od valovne dolžine
 - Vidna svetloba: $\sim 0.5 \mu\text{m}$
 - Rentgenska svetloba: $\sim 0.1 \text{ nm}$
- Valovna narava delcev: De Broglie
 - $\lambda = h/P \sim hc/E$ ($E \gg mc^2$)
 - LHC: $E \sim 1 \text{ TeV} \rightarrow \lambda \sim 10^{-18} \text{ m}$
- Odkritje novih delcev
 - Einstein: $E = mc^2$
 - Delec v tarčo: $E \sim \sqrt{(2m_t c^2 E_p)}$
 - Trkalnik: $E \sim 2E_p$



Standardni model - Higgsov bozon

- Standardni model:
 - 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 (~ 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 $E = 7/8/13/13,6 \text{ TeV}$ (2011/12/15-18,22-23)
- 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 [$\text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$]
- 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

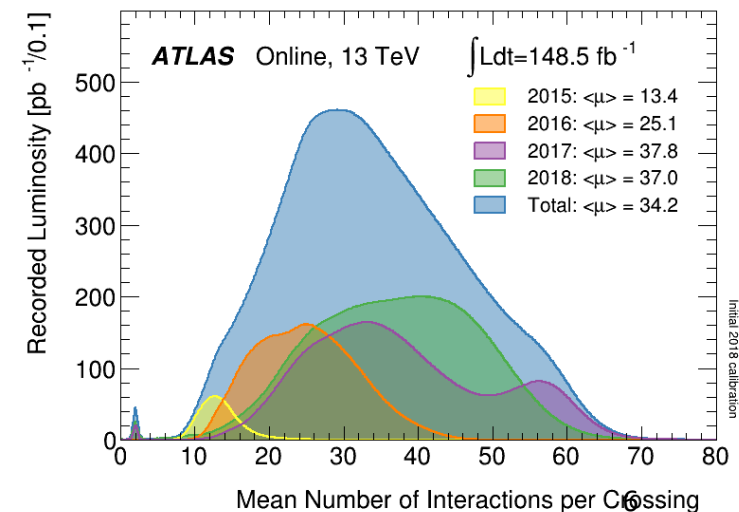
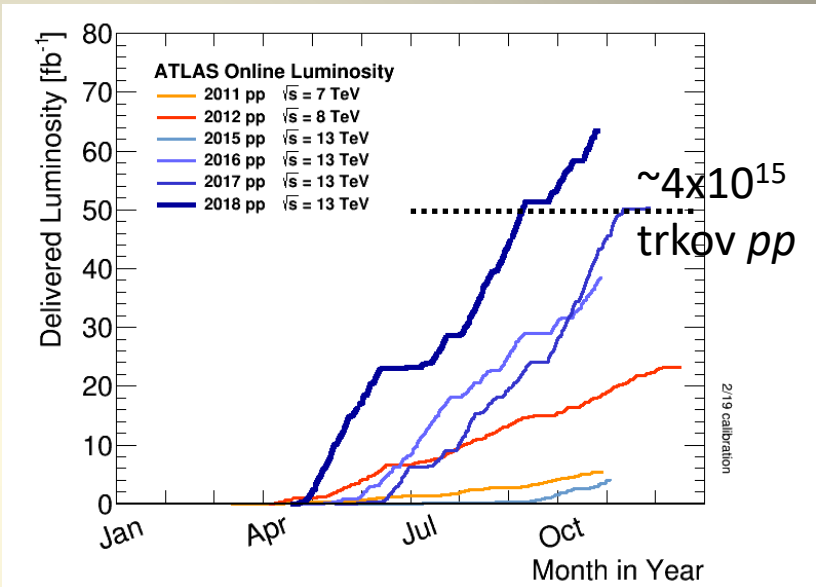
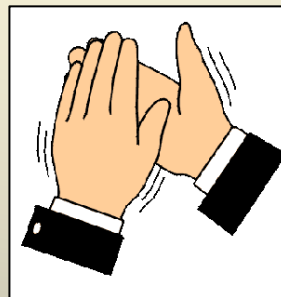
- $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$ pri 13 TeV
- max. $\sim 20 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$
 - $\sim 1.6 \times 10^9$ trkov/s
 - ~ 50 trkov/gručo

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

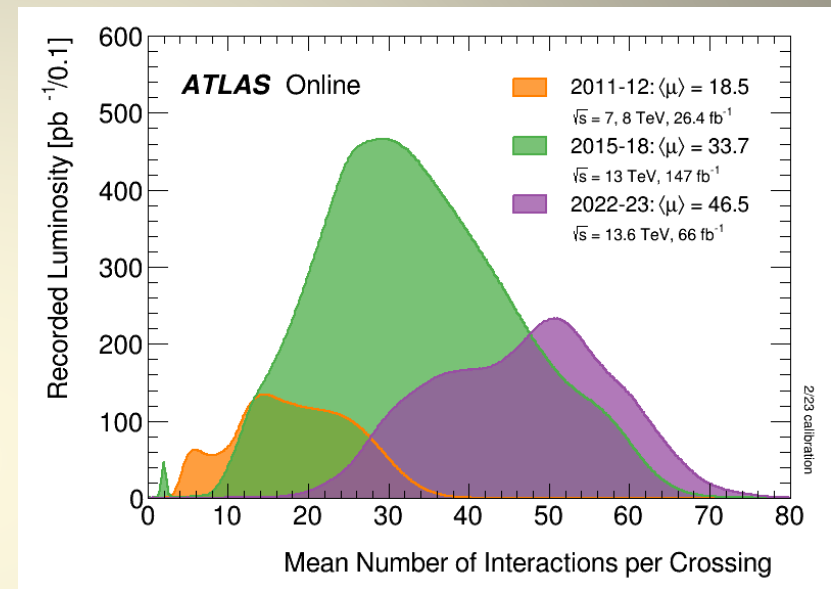
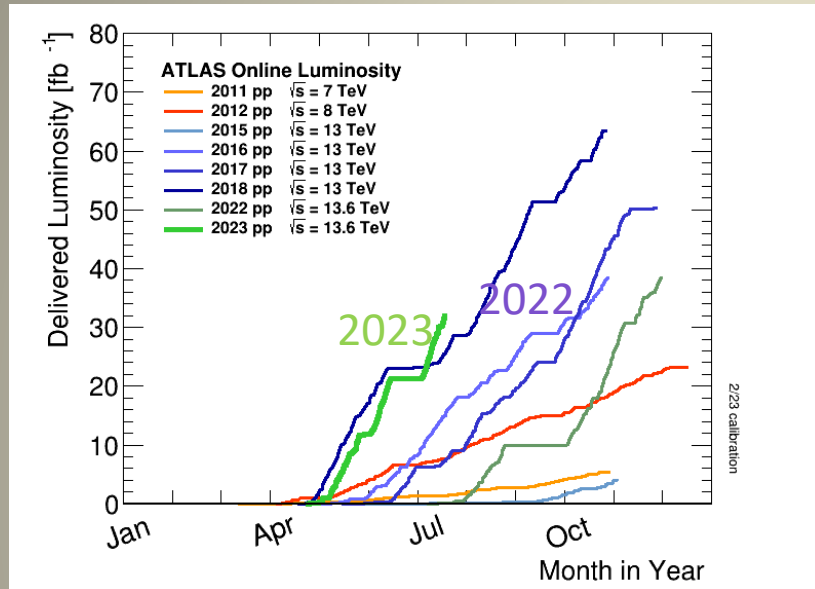
- Skupaj $\sim 1.6 \times 10^{16}$ trkov

- 16 milijonov milijard

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



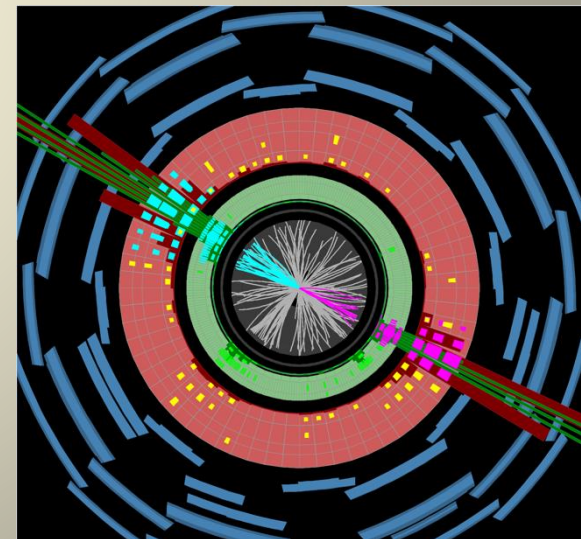
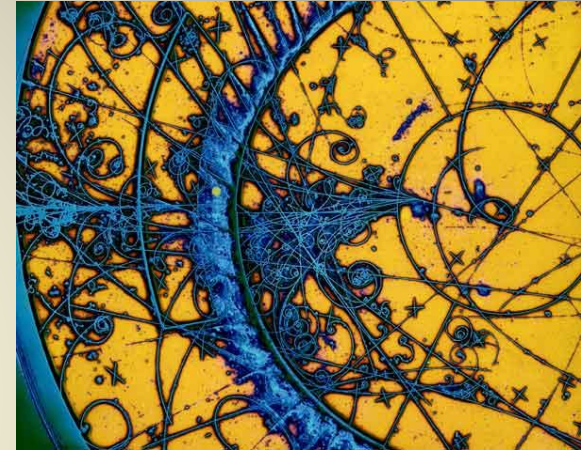
Delovanje LHC v 2022/23...



- Cilja za Run 3
 - Doseči energijo 14 TeV, doseženih 13,6 TeV
 - Bolj stabilna luminoznost: 300 fb^{-1} v letih 2022-25 (podvojitev dosedaj zbrane)
 - zaenkrat zgolj 36+30/fb, pozen začetek 22, hiter konec 23 ☹️
 - vseeno optimizem zaradi izboljšav v delovanju LHC – blizu 300/fb še vedno dosegljivo
- Potem 3-letna prekinitev za nadgradnjo LHC in detektorjev za HL-LHC
 - Cilj: ~3000 fb^{-1} v ~10 letih

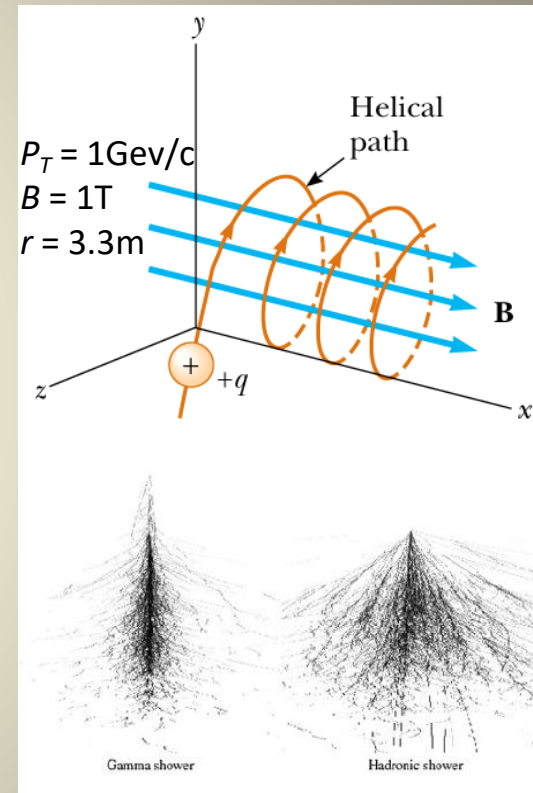
Kaj lahko zaznamo v detektorju ?

- 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: proton, nevtron (~ 15 min)
 - Pri velikih energijah kvarka/gluona nastane hadronski pljusk (jet)
 - >10 hadronov (večinoma 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: $(mc^2)^2 = E^2 - (cP)^2$
- Če izmerimo vektorje \vec{P} in energije E vseh razpadnih produktov
 - Ohranitev \vec{P} in E : izmerimo maso (vrsto) delca

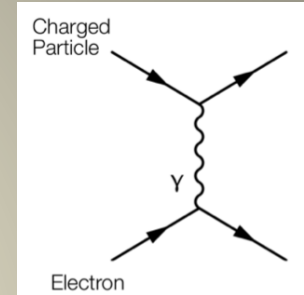


Ionizacija nabitih delcev

- Ionizacija: enačba Bethe-Blocha

Bethe-Bloch Formula

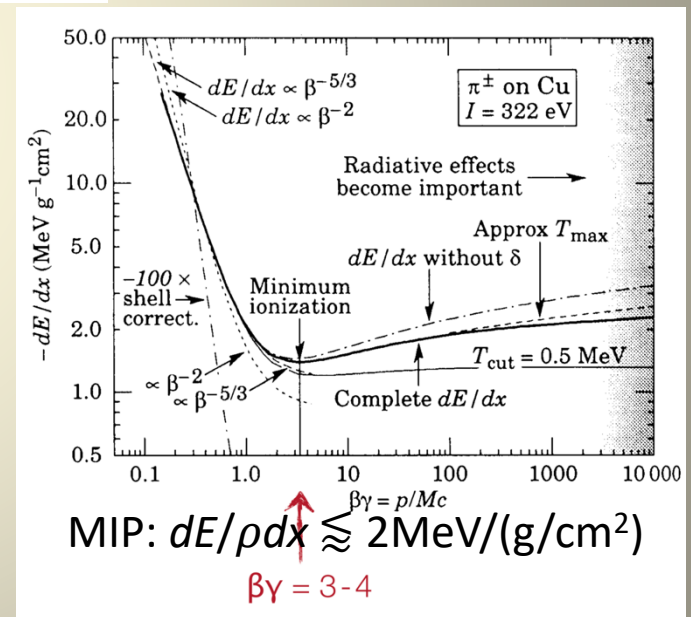
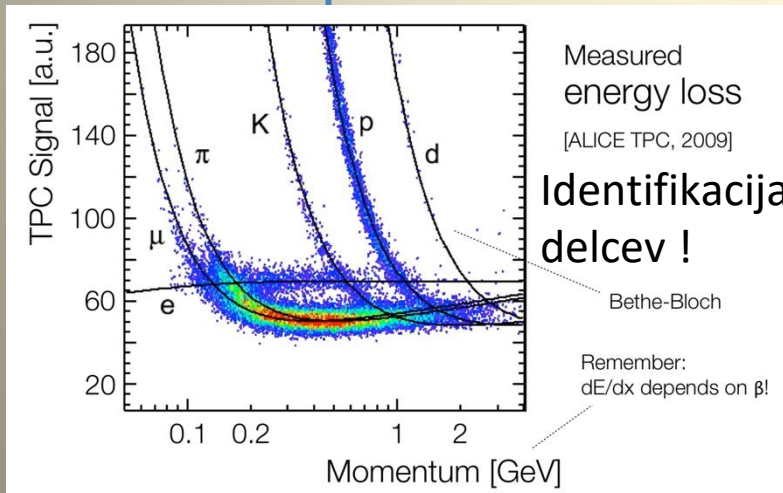
$$-\left\langle \frac{dE}{\rho dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



le funkcija hitrosti $\beta=v/c$

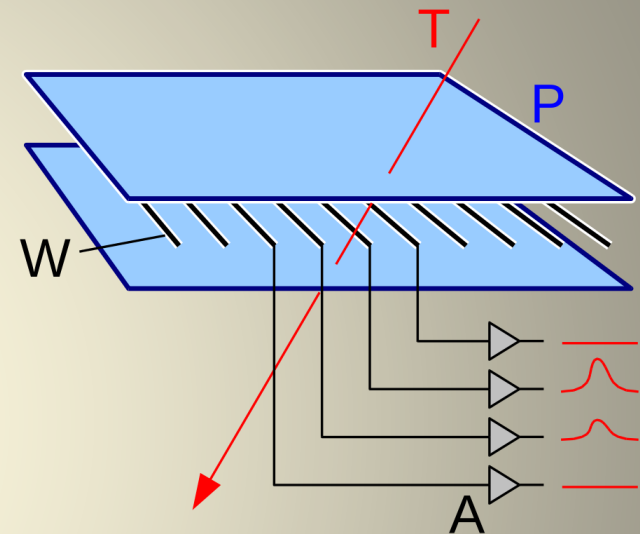
- Težki nabiti delci (ne e^\pm)

– Za e^\pm podobno



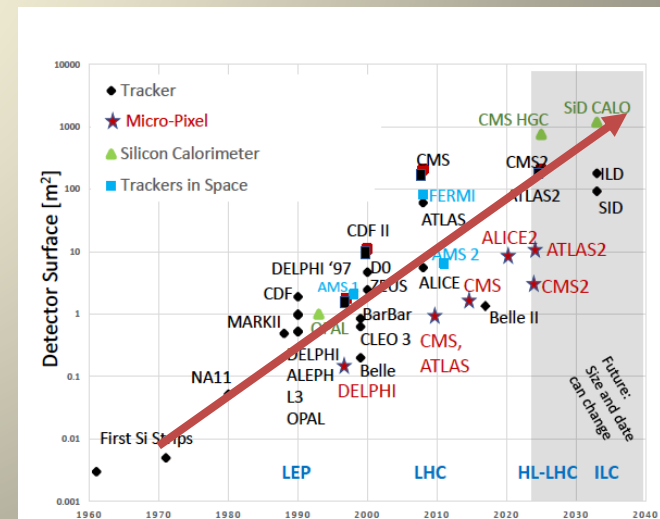
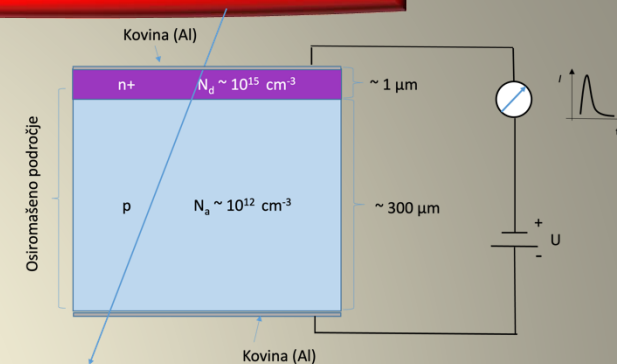
Sledilnik - plinski detektorji

- Prva “elektronska mehurčna celica”
 - elektronski signali
 - hitro zajemanje dogodkov
 - računalniška obdelava
- G. Charpak 1968 -> Nobel 1992
 - nabiti delci ionizirajo plin v komori
 - žice (anode) na pozitivni visoki napetosti
 - el. polje pomnoži elektrone -> večji signal
 - naboj sorazmeren z absorbirano energijo
- Izboljšave/razvoj: Drift chamber, Time-projection chamber...
- Danes v delih detektorja z ne preveliko gostoto sledi
 - sledilniki pri trkalnikih težkih ionov in e^+e^-
 - detektorji mionov v ATLAS, CMS



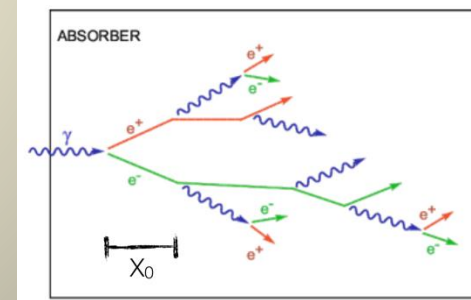
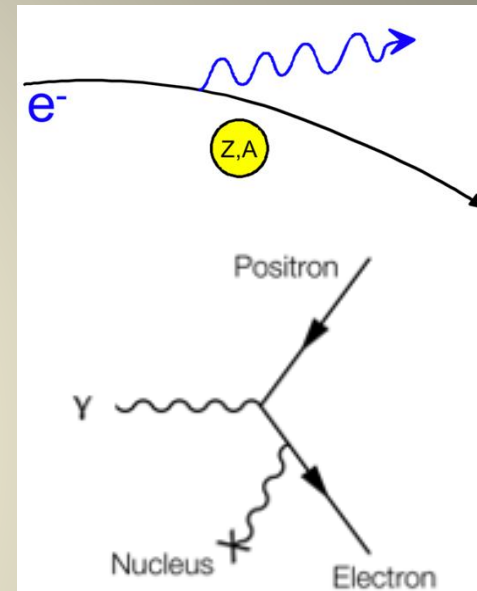
Sledilnik – polprevodniški detektorji

- Polprevodnik – silicij
 - monokristalne rezine do $d=45\text{ cm}$
- Za detektor potrebujemo $p-n$ stik (dioda) pod zaporno napetostjo
 - osiromašena plast ($d = 100\text{-}300\ \mu\text{m}$) deluje kot ionizacijska celica
 - premikanje ioniziranih parov ($100\ e\text{-}h/\mu\text{m}$) elekton-vrzel \rightarrow el. signal
- Detektor segmentiran v pasove ali blazinice
 - litografska tehnologija
 - meritev koordinat z natančnostjo $1\text{-}100\ \mu\text{m}$
- Več zaporednih meritev \rightarrow sled nabitega delca
 - tipično 3-4 plasti blazinic in 3-4 plasti pasov
 - dimenzije prilagojene ločljivosti in gostoti sledi
- Površine Si v sledilnikih naraščajo eksponentno
 - podvojitveni čas 4 leta



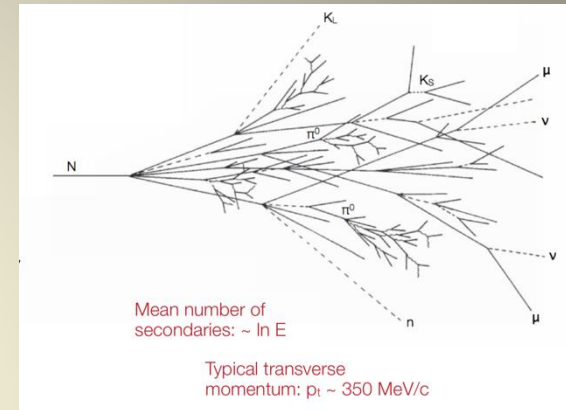
Kalorimeter: elektroni, fotoni

- Ionizacija le manjši del izgub pri velikih energijah – prevladuje zavorno sevanje
 - elektron izseva foton v EM polju jedra
 - kot v rentgenski cevi
- Foton se v polju jedra pretvori v par e^\pm - tvorba parov
 - pri nižjih energijah (<1 MeV) še: fotoefekt, Compton
- Oba procesa – radiacijska dolžina X_0
 - X_0 Pb = 5.6 mm, scintilator(plastika) = 35 cm
- Elektroni in fotoni se podvajajo, dokler je dovolj energije – kritična energija E_c , potem prevlada ionizacija
 - EM plaz, dolžina $\propto \ln(E/E_c)$
 - EM kalorimetri: debelina $\sim 25 X_0$
- Končni signal - naboj zaradi ionizacije
- Linearni odziv EM kalorimetra
- Relativna ločljivost se izboljšuje kot $1/\sqrt{E}$
- Tipične vrednosti $\lesssim 10\%$ za $E = 1$ GeV
- Dve izvedbi
 - homogeni: kristali (CMS)
 - vzorčevalni: plasti absorber(Pb) / ionizacijska celica ali scintilator



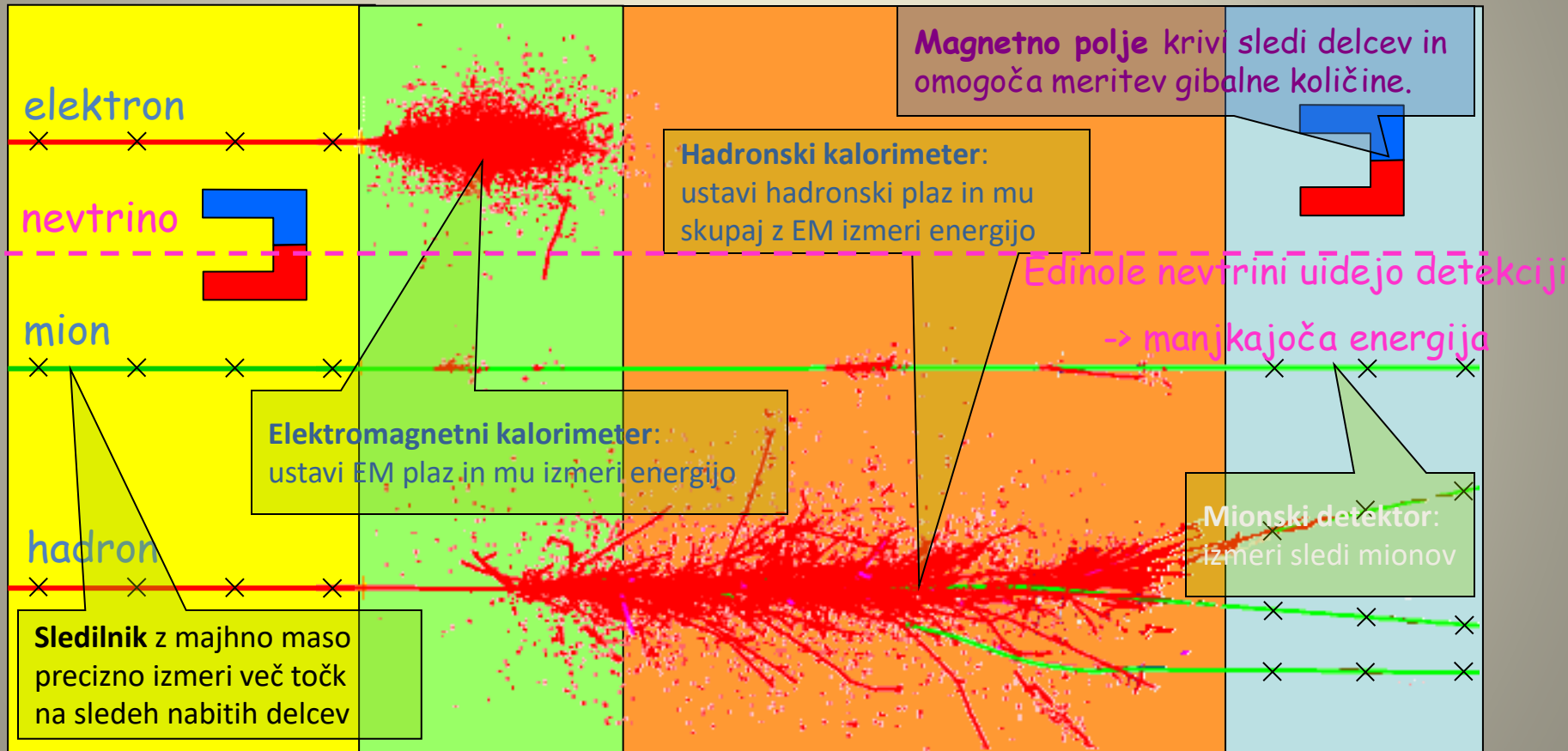
Kalorimeter: hadroni

- Pomnoževanje preko jedrskih reakcij
 - tipično nastane veliko pionov, ki prožijo nove reakcije -> hadronski plaz
 - meja – energija za tvorbo pionov na jedrih
 - signal – ionizacija
- Karakteristična dimenzija – interakcijska dolžina λ_{int}
 - tipično $\lambda_{int} \gg X_0$
- Fluktuacije
 - tretjina nastalih pionov je nevtralnih: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 - EM plaz znotraj hadronskega
 - pioni razpadajo v mione in nevtrine, ki uidejo
 - nevtroni iz razbitih jeder praviloma dajo manj signala
- Odziv hadronskega kalorimetra ni linearen!
 - potrebna pazljiva umeritev odziva
 - ločljivost bistveno slabša kot pri EM kalorimetru
 - tipične vrednosti $\lesssim 100\%$ za $E = 1\text{ GeV}$
 - izključno vzorčevalni, absorber večinoma Fe
 - debelina 6-9 λ_{int}

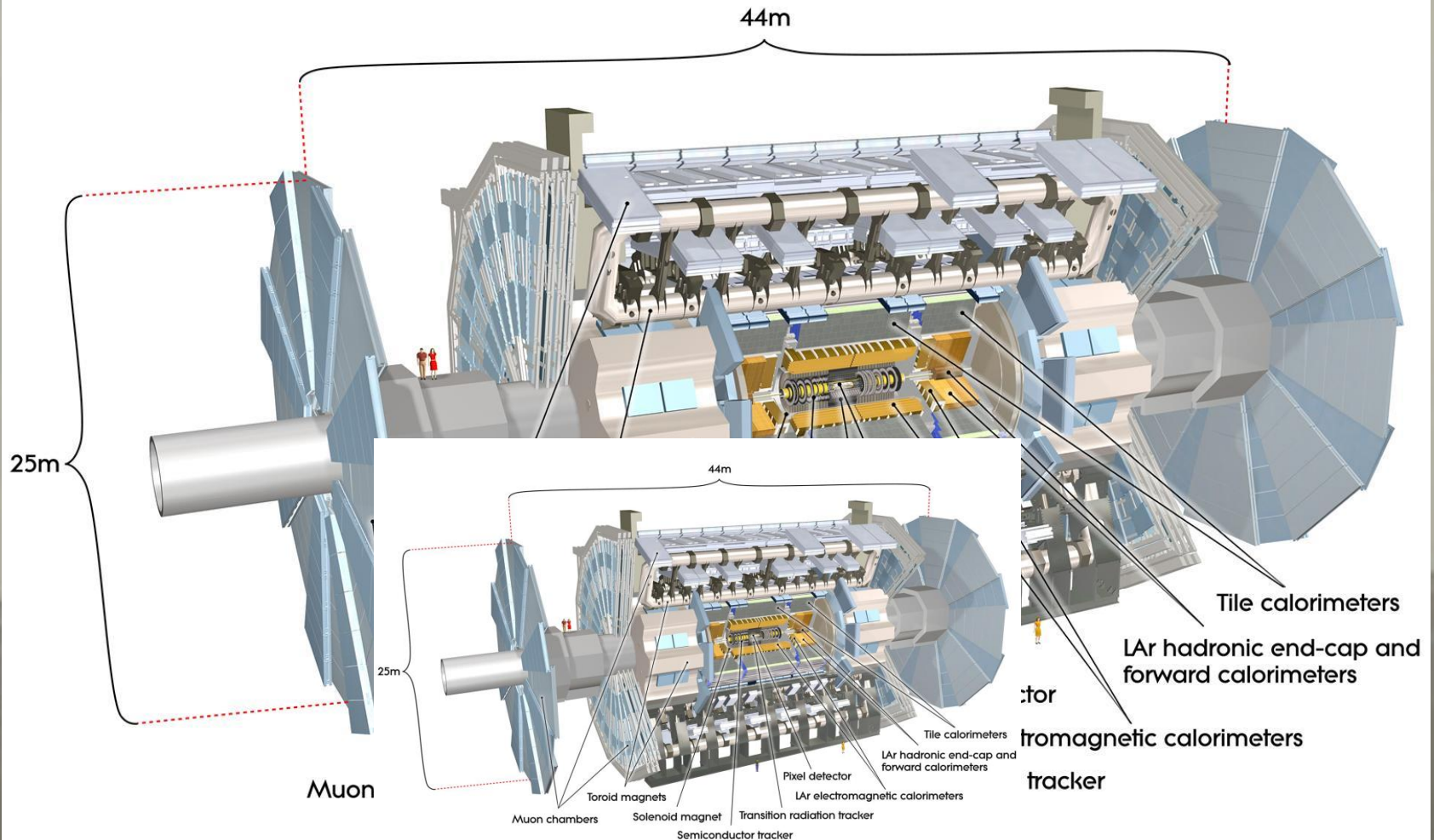


	λ_{int} [cm]	X_0 [cm]
Szint.	79.4	42.2
LAr	83.7	14.0
Fe	16.8	1.76
Pb	17.1	0.56
U	10.5	0.32
C	38.1	18.8

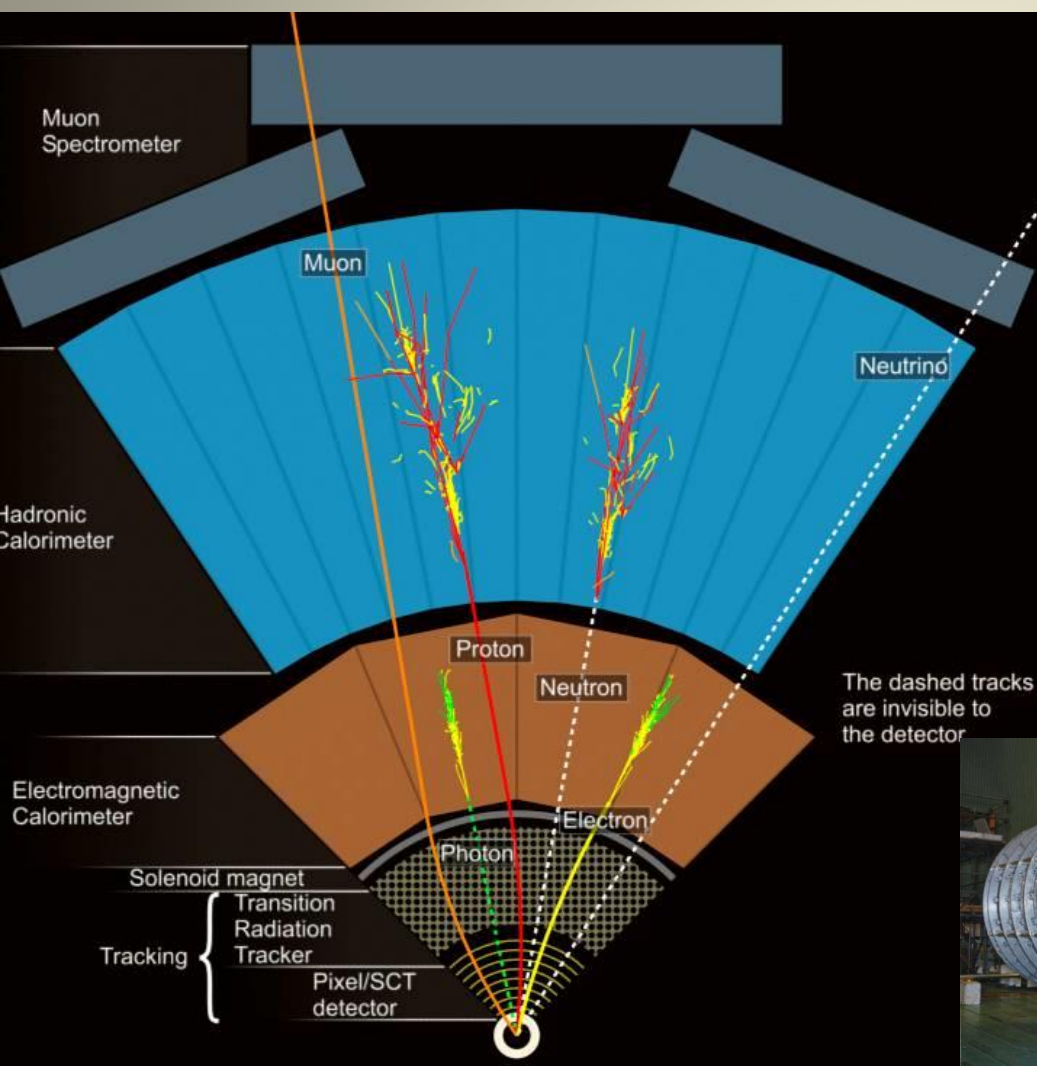
Generičen LHC detektor za (skoraj) vse delce



Detektor ATLAS



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 – notranji detektor

- Blaziničasti (pixel) silicijev detektor

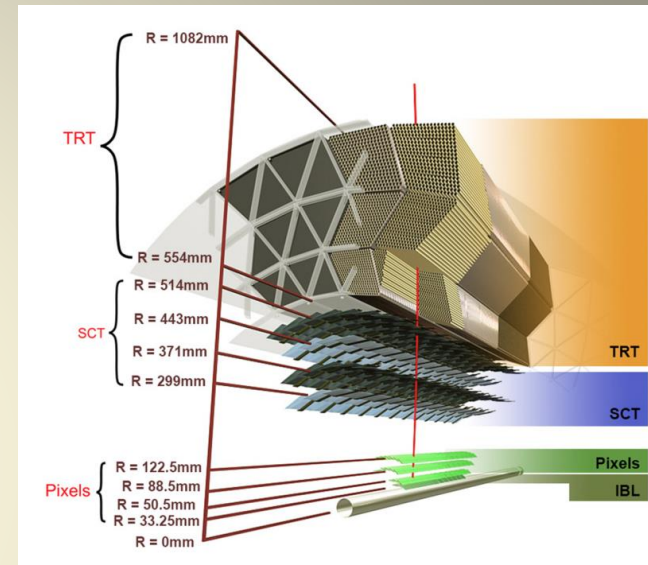
- Detektorji z blazinicami dimenzij $50 \times 400 \mu\text{m}^2$. Trije valji in deset diskov obdajajo žarkovno cev.
 - Bralna elektronika neposredno prispajkana na senzor z In kroglicami, 140 M senzorjev in bralnih kanalov
 - Natančne točke na začetku sledi omogočajo rekonstrukcijo mest razpadov kratkoživih hadronov z natančnostjo pod mm
 - Močno orodje za prepoznavo sledi
 - 2014 – vgradnja dodatne notranje plasti ($r \sim 30 \text{ mm}$) z blazinicami dimenzij $50 \times 250 \mu\text{m}^2$

- Slicijev pasovni (strip) detektor – SCT

- Detektor prehodnega sevanja – TRT

- Kremenove slamice $\Phi=4 \text{ mm}$, poljnejene 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



Vgradnja blaziničastega detektorja



ATLAS – kalorimetra, mioni

• EM kalorimeter

– Vzorčevalni kalorimeter

- Aktivni del tekoči argon, v katerem nabiti delci EM plazmu ionizirajo kapljevino
- Absorber svinčne 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

– Vzorčevalni kalorimeter

- Aktivni del plošče iz plastičnega stintilatorja, v katerem nabiti delci hadronskega plazmu scintilirajo; nastalo svetlobo vodimo po svetlobnih vodnikih do fotopomnoževalk
- Absorber železo

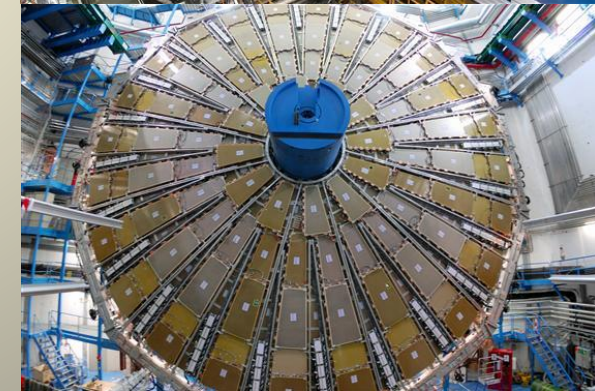
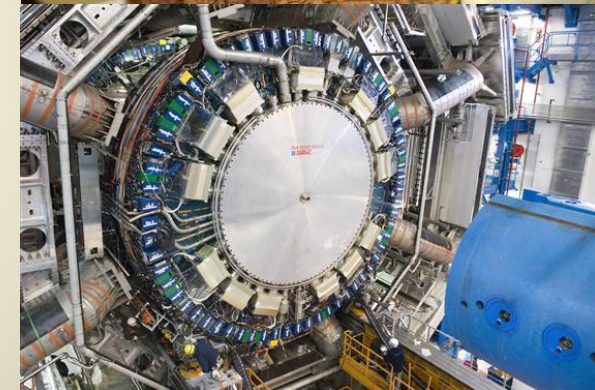
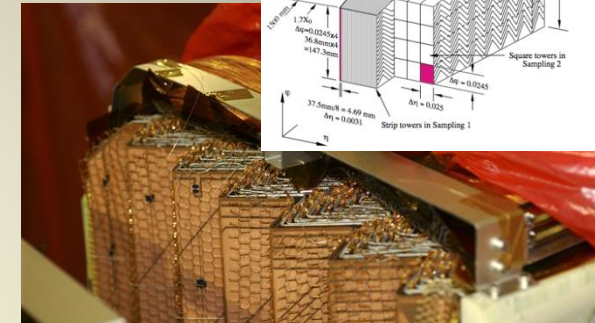
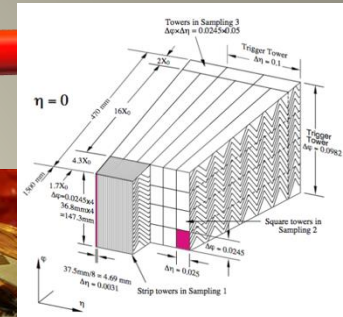
- Moduli v obliki trapezoida se zložijo kot obok v valj
- Kalorimeter predstavlja hkrati povratni jarem tuljave notranjega detektorja

• Mionski detektor

– Dve vrsti plinskih detektorjev

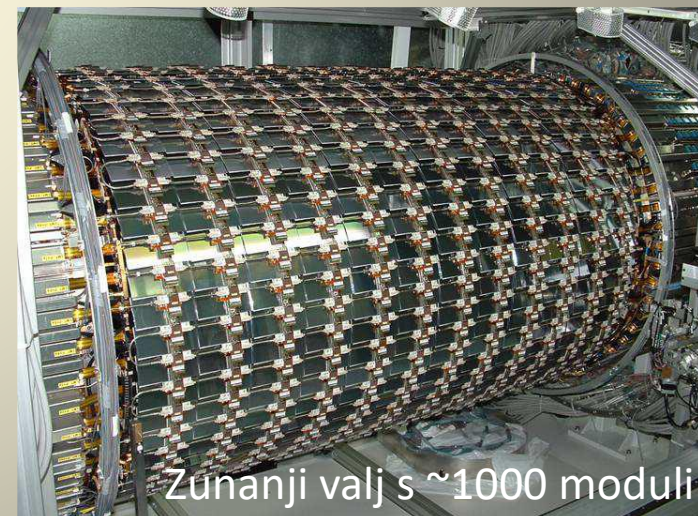
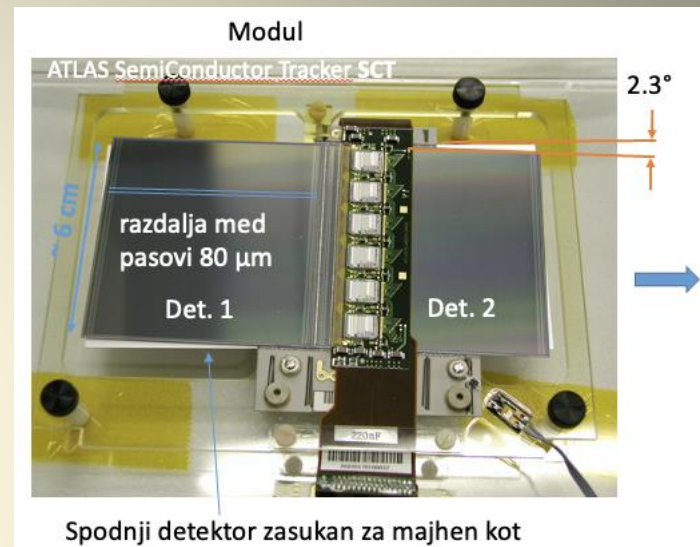
- Hitri detektorji (TGC, CSC) za proženje
- Precizni detektorji (MDT, RPC) za natančno merjenje sledi

- 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



ATLAS - polvodniški sledilnik SCT

- Glavni angažma slovenske skupine pri gradnji ATLAS
- 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 zasukani 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



Velika fleksibilna tiskana vezja

- SCT moduli potrebujejo napajanje za sezorje, čitalno elektroniko in optični prenos
 - Skupaj 16 linij z do 1 A toka in 500 V napetosti
 - Klasični kabli zavzamejo preveč prostora
 - Rešitev – napajanje s fleksibilnimi tiskanimi vezji
- Dodatne zahteve
 - Sevalne doze do 100 kGy – sevalna odpornost materialov: Kapton®
 - Minimizacija materiala v sledilniku – prevodnik aluminij (štirikrat boljši od bakra), v pokrovih zaradi mehanskih lastnosti baker
 - Dolžina do štiri metre
- Težava
 - Vezja na laminatih aluminij-Kapton® izdelujejo le redki proizvajalci
 - Nihče pa ne nudi tehnologije za izdelavo dimenzij preko 1,8 metra
- Rešitev
 - Namenski razvoj tehnologije za izdelavo fleksibilnih vezij na laminatih aluminij/baker-Kapton®
 - Razvoj Odsek F-9 IJS in ELGO-LINE, Cerknica v sodelovanju z:
 - NTC IJS
 - Balder d.o.o., Ljubljana
 - FDS Research d.o.o., Trzin
 - Apel d.o.o., Ljubljana



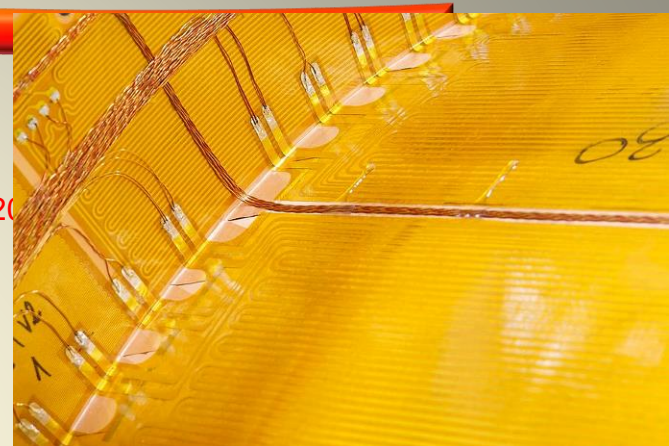
Razr
Apel



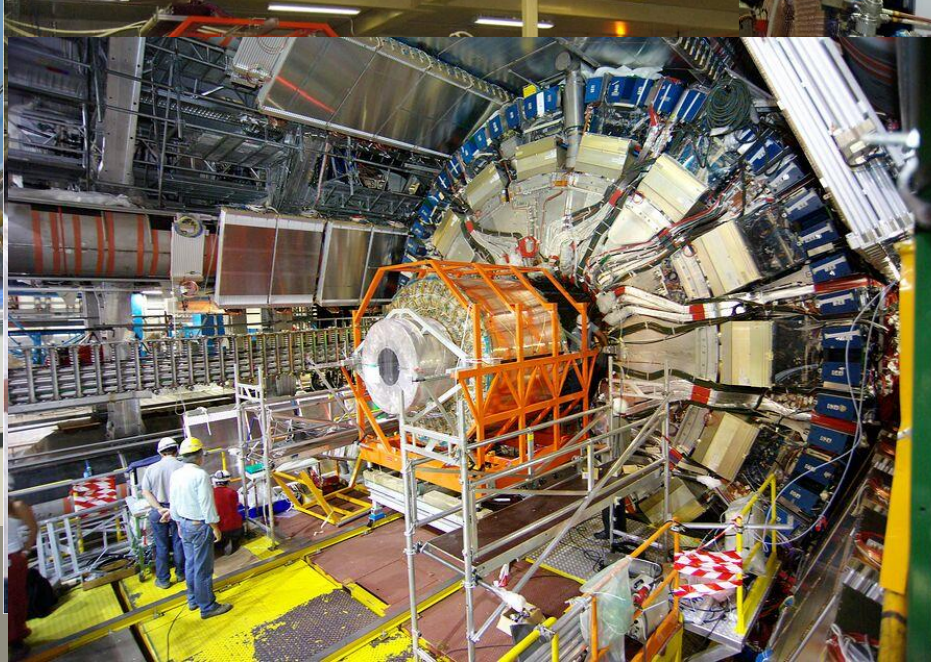
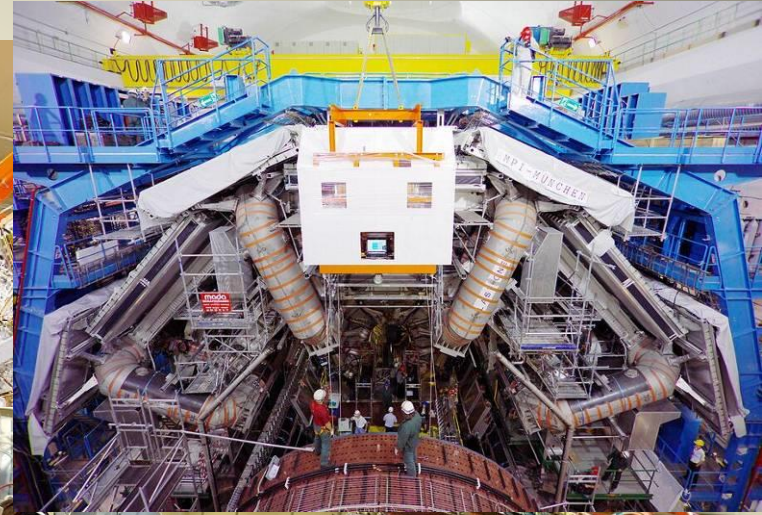
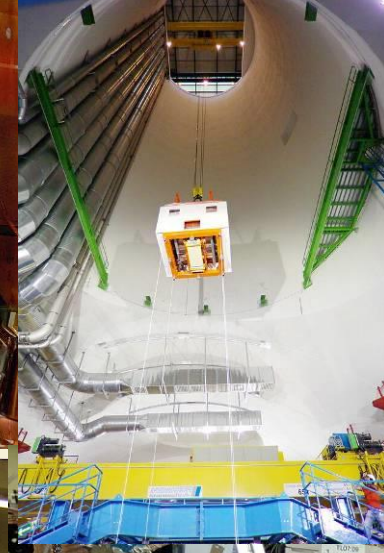
Kabli SCT pokrova

Ploskovni grelci velikih dimenzij

- SCT deluje pri -7°C , TRT pri 20°C
 - Med njima toplotna pregrada
 - Zahteva po toplotni nevtralnosti detektorjev
 - Pregrada na strani SCT hlajena na -7°C , na strani TRT ogrevana na 20°C
 - Potrebni ploskovni grelci velikih dimenzij z $\sim 200\text{ W/m}^2$
 - Tehnologija fleksibilnih tiskanih vezij primerna za izdelavo grelcev



TRT in ATLAS



Kolaboracija ATLAS

- Pri detektorju ATLAS sodeluje
 - ~3000 znanstvenikov
 - 1800 z doktoratom
 - 1200 doktorskih študentov
 - 182 institucij
 - 42 držav
- Od zasnove traja projekt že preko 30 let
- Investicija ~700 MCHF
- Slovenska skupina sodeluje pri projektu od junija 1996



~ $\frac{1}{4}$ kolaboracije!

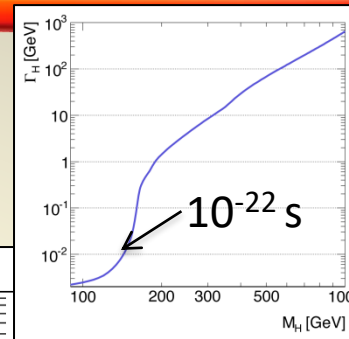
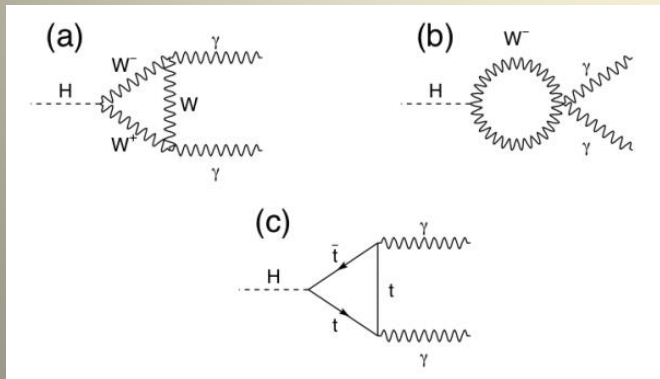
Tvorba Higgsovega delca na LHC



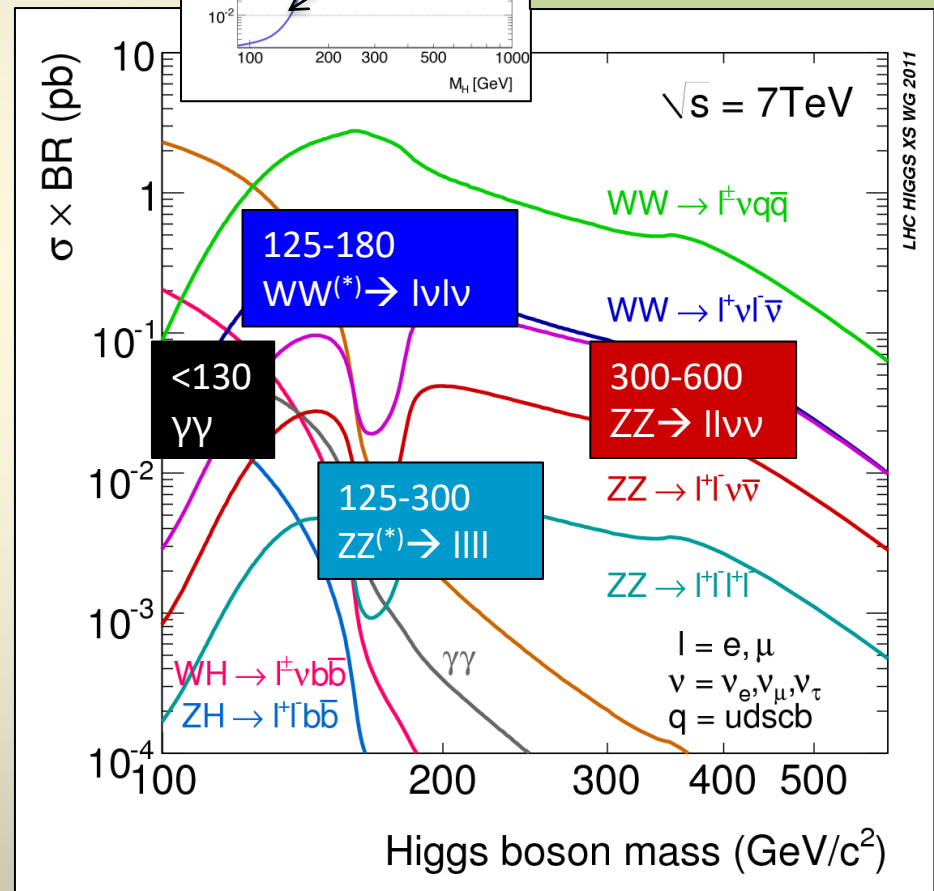
V kateri kopicici je igla ?

Razpadi Higgosa

- 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

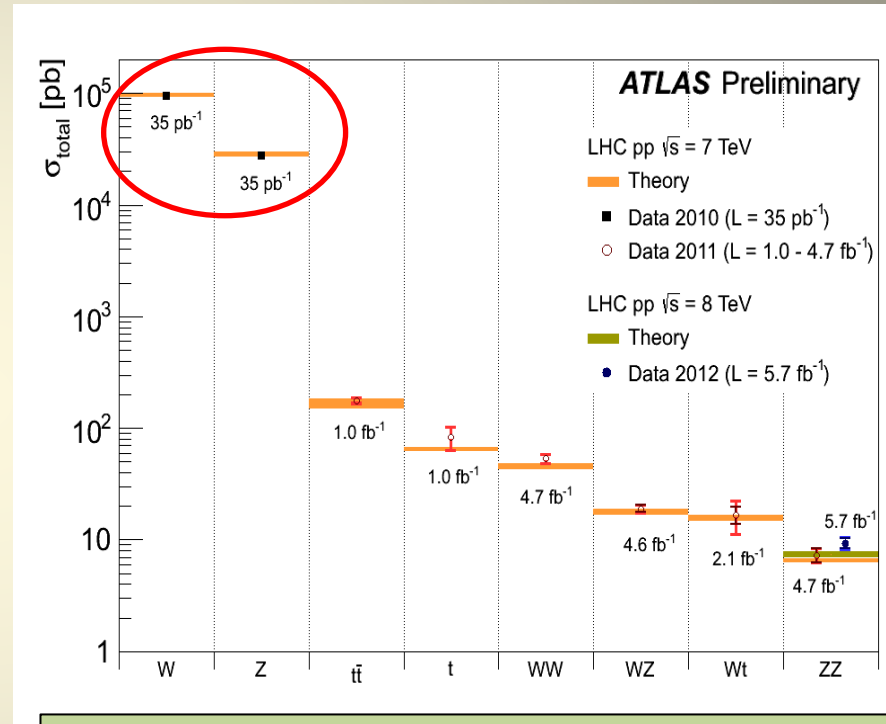


Hitreje kot razpade, manj natančno maso ima - Heisenberg



Zaznava Higgsa na LHC

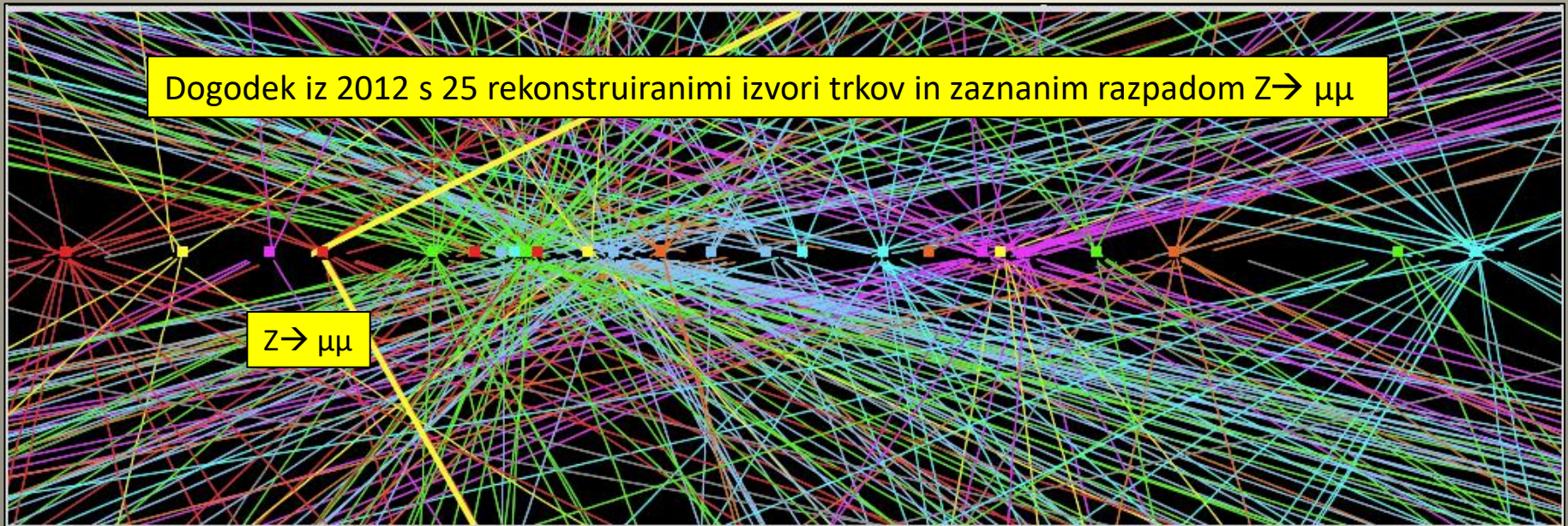
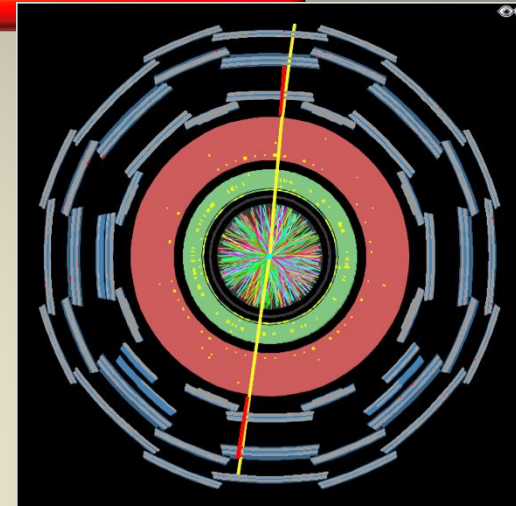
- Redek proces
 - Tvorba le $\mathcal{O}(10^{-10})$ od celotne
 - Nadaljnje zmanjšanje zaradi izbire razpadnega načina
- Ogromno ozadje
 - Zahtevamo značilne lastnosti dogodkov
 - Leptoni (e, μ) iz W, Z
 - Fotoni z veliko energijo
 - “Zlati” razpad: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 - $H \rightarrow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

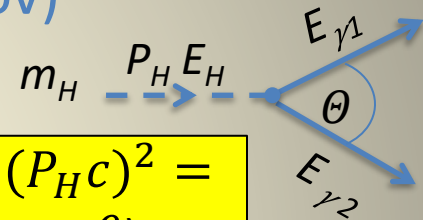
- Do ~ 60 trkov, naloženih drug na drugega
- Zahtevno okolje
 - $\mathcal{O}(1000)$ sledi,
 - več 10 izvorov trkov
 - izkaz perfektne zmogljivosti detektorja sledi
- Izgubimo npr. informacijo, od kod izhaja $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Še težje nadzorovati ozadje



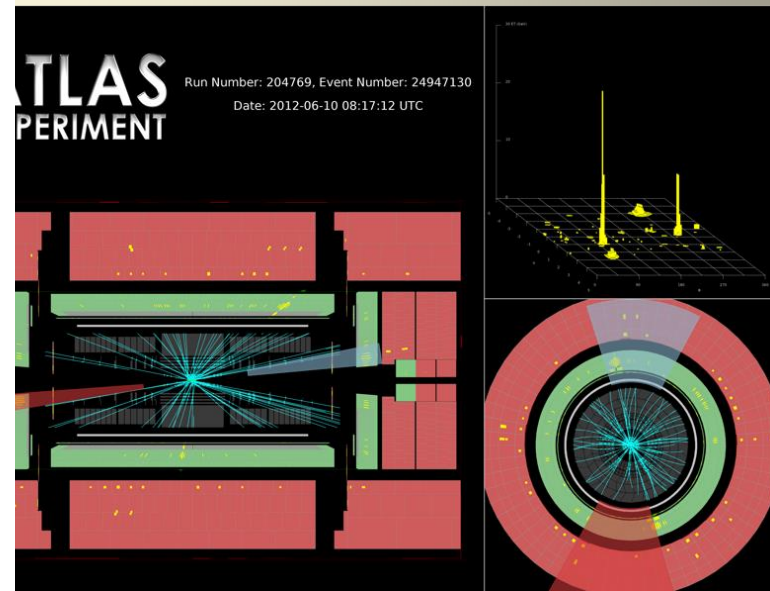
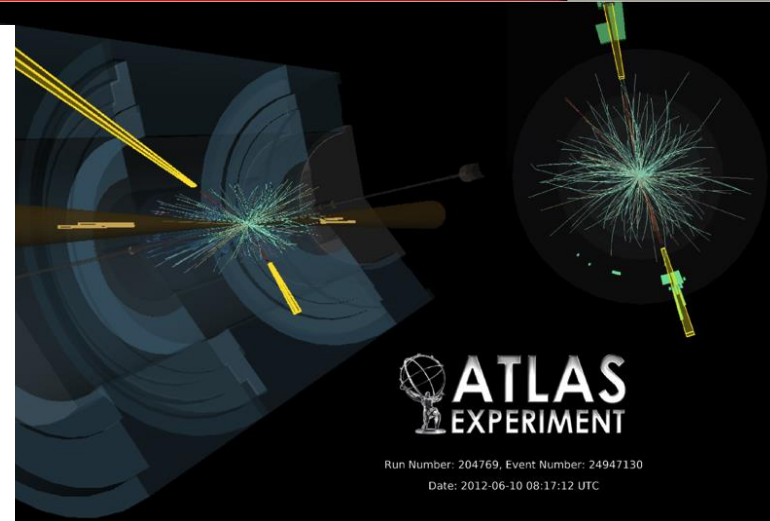
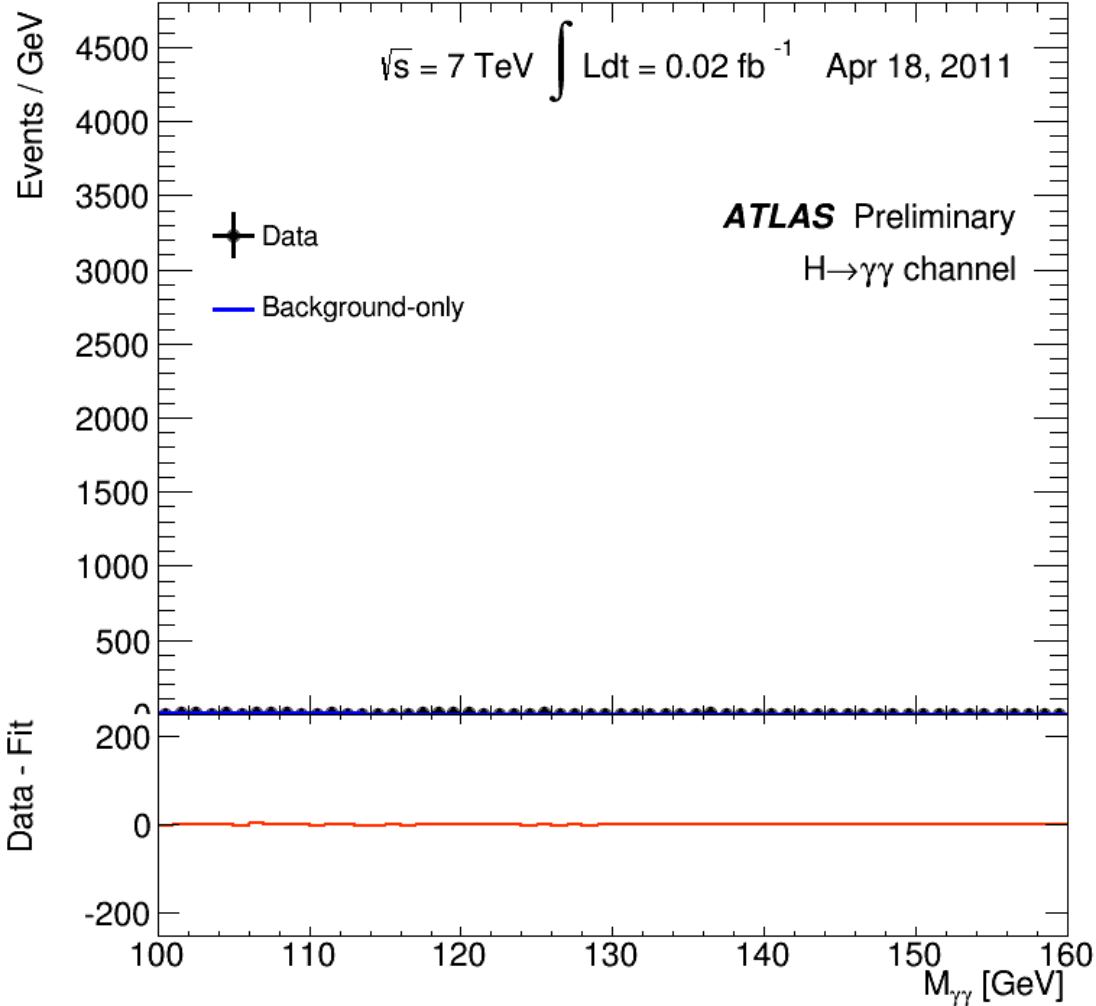
Signal v prisotnosti ozadja

- 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 !

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

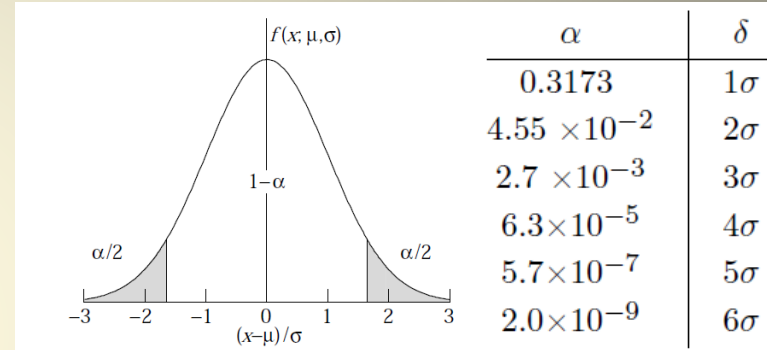


Vzorec $H \rightarrow \gamma\gamma$



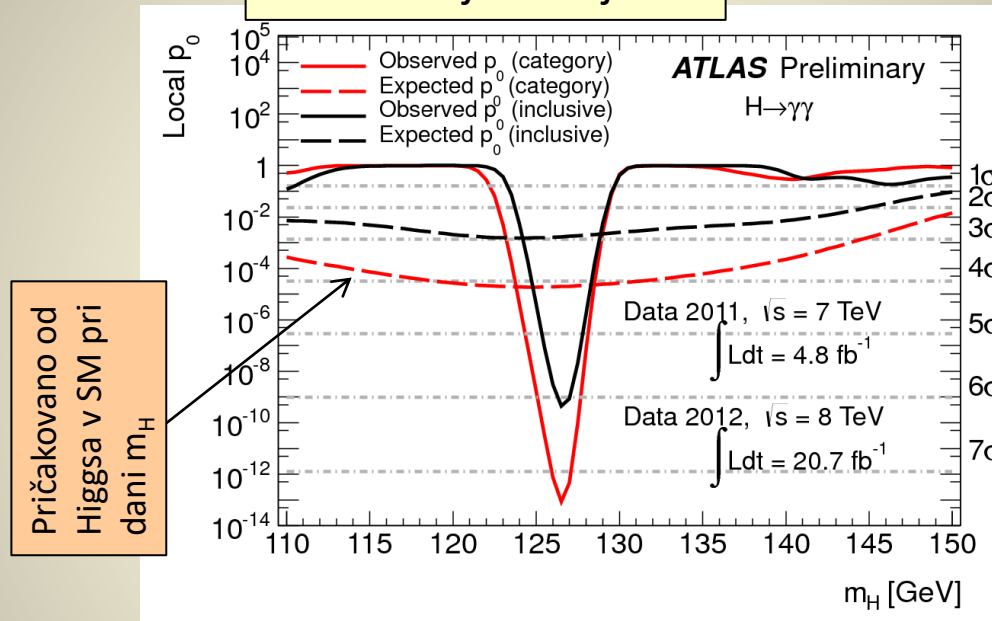
Fluktuacije ozadja

- 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 $H \rightarrow \gamma\gamma$

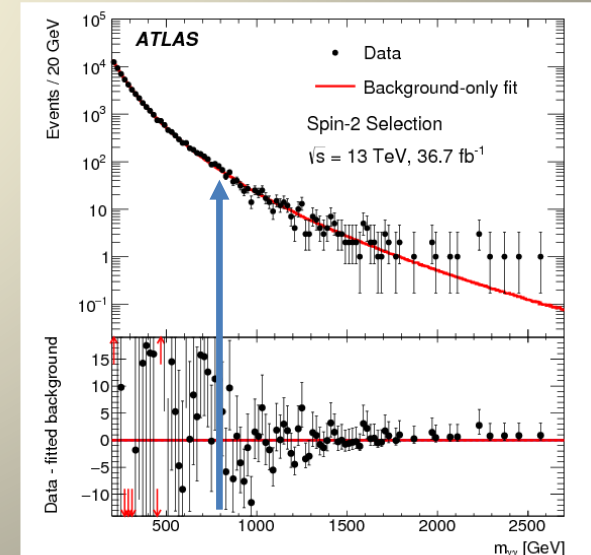
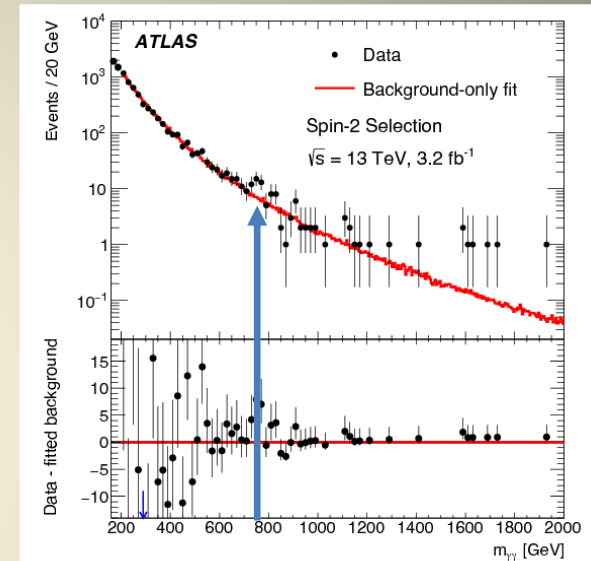
p_0 – skladnost izmerka s fluktuacijo ozadja



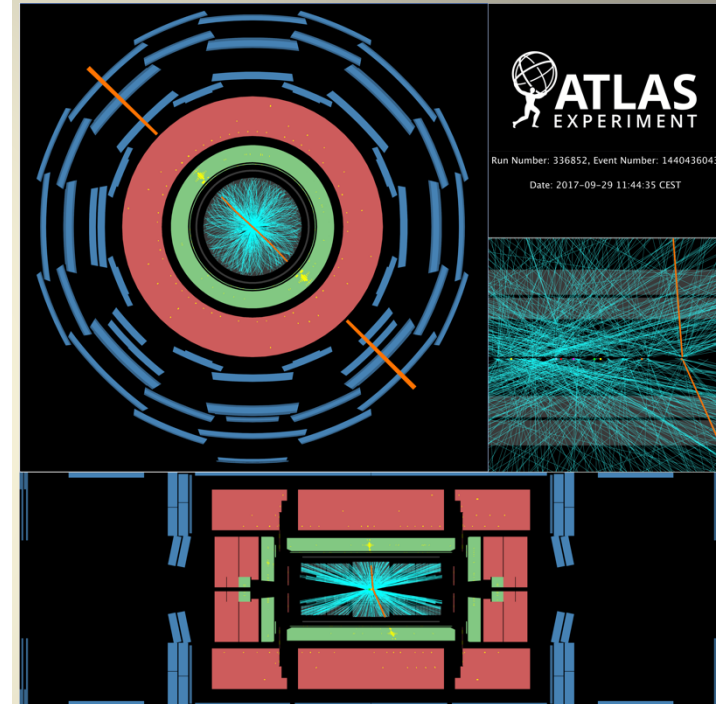
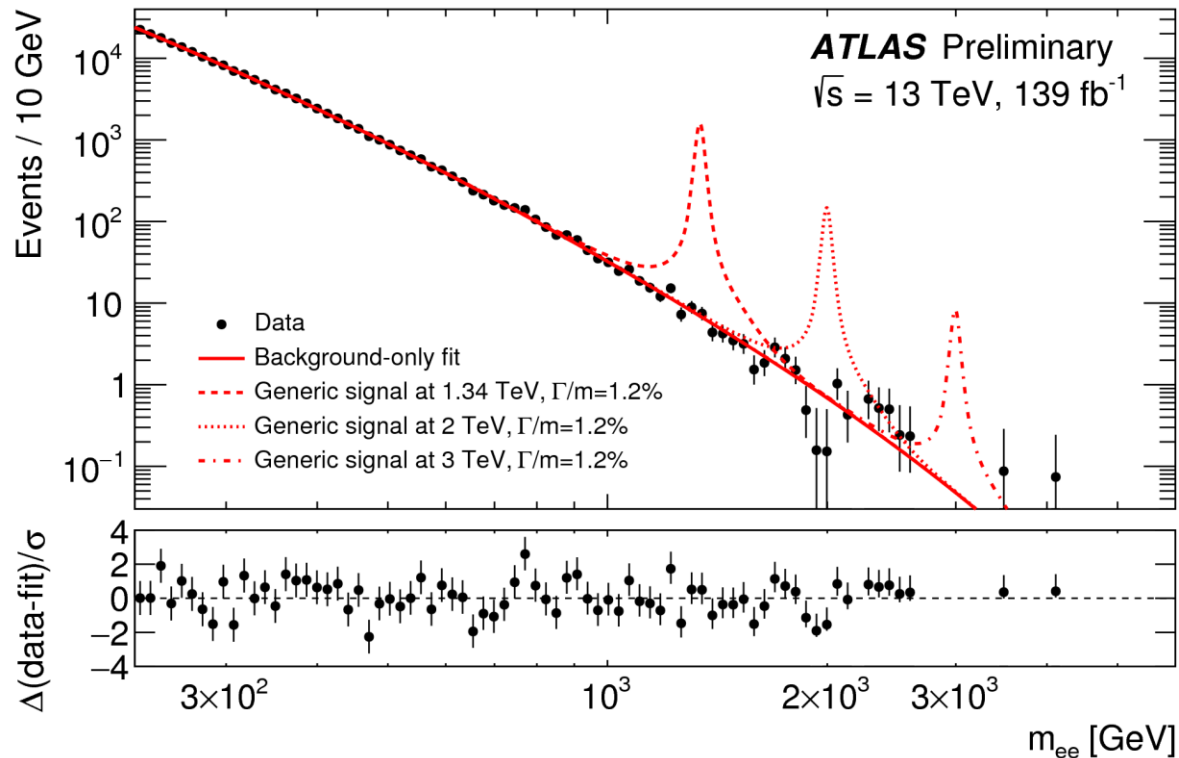
- Maksimalno neujemanje s predpostavko o ozadju pri $m_H = 126.5$ GeV:
 - Vrednost p_0 : $\sim 10^{-13}$ ali **7.4 σ** pri **126.5 GeV**
 - Pričakovano od Higgasa v SM : $\sim 4.1 \sigma$
- Opažamo več signala, kot ga napove SM... fluktuacija signala navzgor?
- **Odkritje** v tem razpadnem načinu, ni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

(Lažni) žarek upanja...

- Leta 2015 sta ATLAS in CMS opazila vrh v spektru dvofotonske mase pri 750 GeV
- Podobna signifikanca (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...



Rezultati celotnega Run2



- Nikakršnega presežka nad napovedanim ozadjem po SM
- Meje na Z' okoli 5 TeV

Zaključek



- Spoznali smo osnove delovanja detektorjev v fiziki delcev
- Ogledali smo si njihovo udejanjenje v eksperimentu ATLAS
- Na primeru Higgsovega bozona smo se dotaknili njihove uporabe za odkritje novih delcev
 - Zaokrožitev Standardnega modela
- Žal (še) nismo opazili pojavov izven Standardnega modela
 - Postavljene meje preko 1 TeV na večino modelskih napovedi
 - Razburjenje ob odstopanjih ni vedno upravičeno...
- Na LHC nas čakata še dve leti Run3 (2024/25)
 - trki pri 13,6 TeV, upamo na dvakrat več trkov kot doslej
- Potem pa še HL-LHC od leta 2028
 - Še 10x več trkov v 10 letih z nadgrajenim detektorjem ATLAS