

Znanost
na cesti

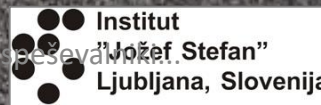
In ZRC SAZU



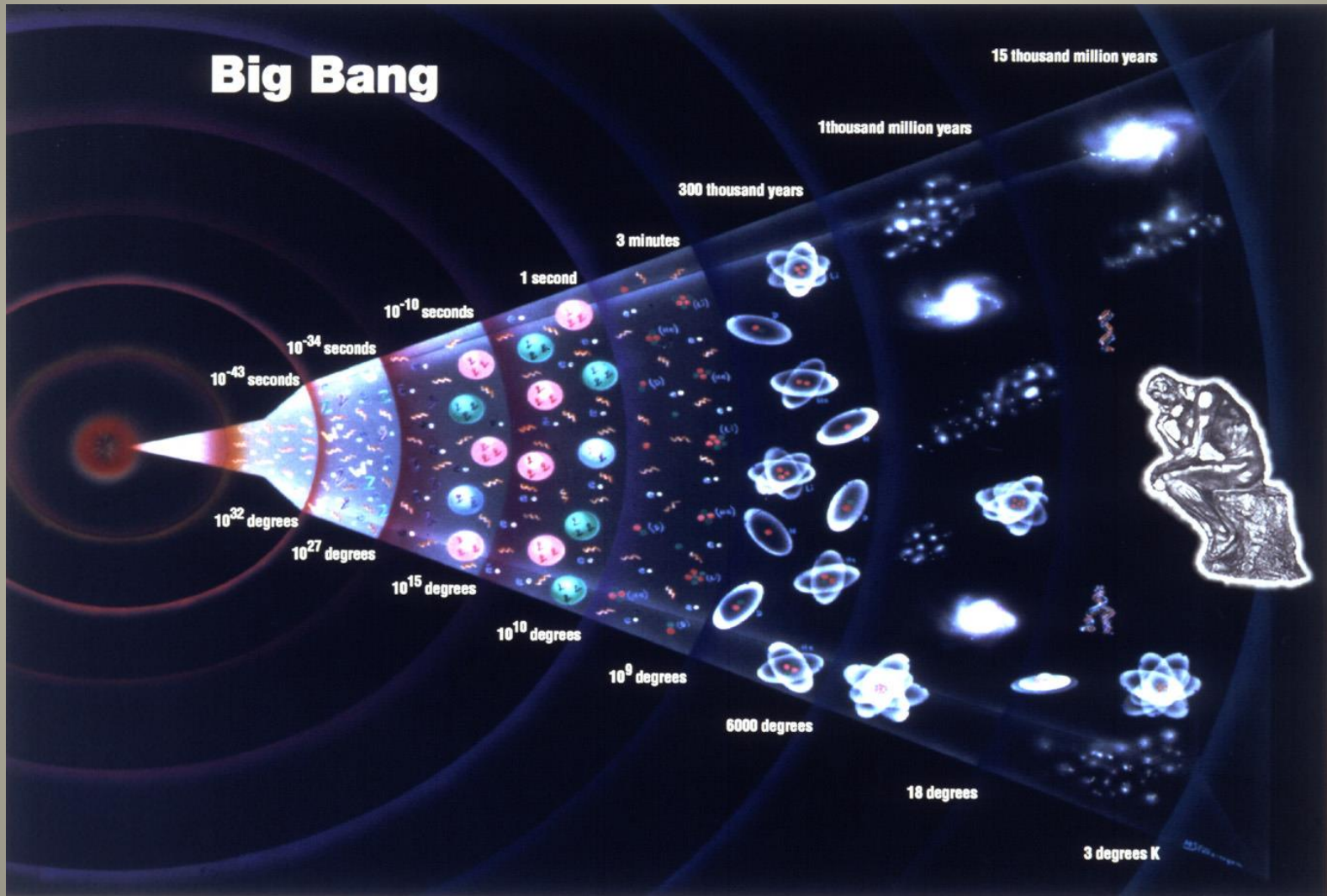
9. april 2019

Pospeševalniki: danes, jutri...in nikoli več?

prof. dr. Marko Mikuž, UL FMF in IJS
Igor E. Bergant, TV Slovenija

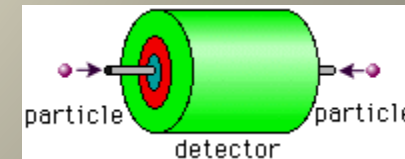
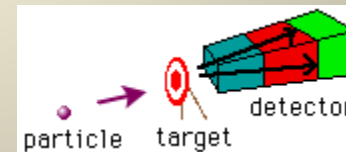
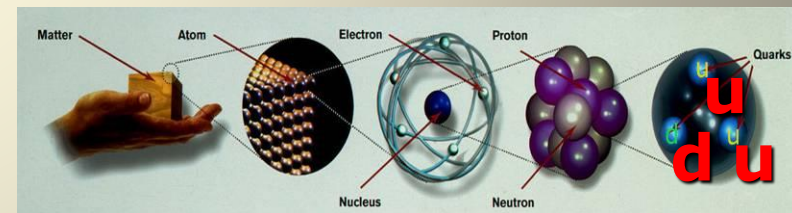
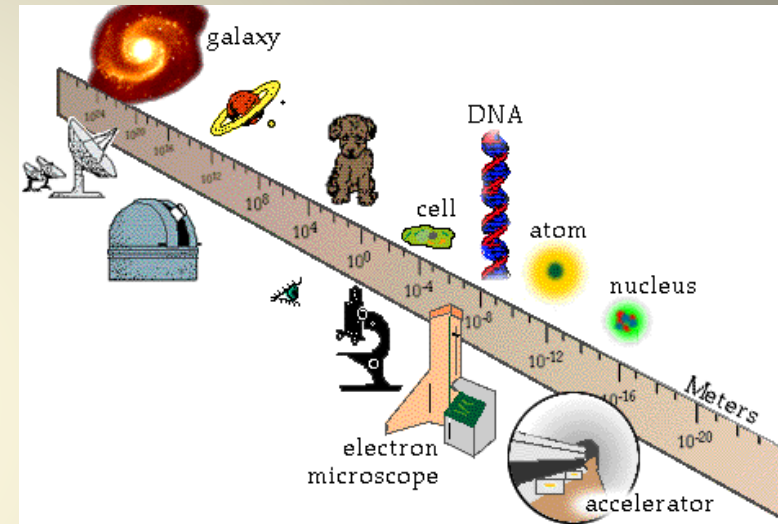


Večno vprašanje: Od kod prihajamo ?



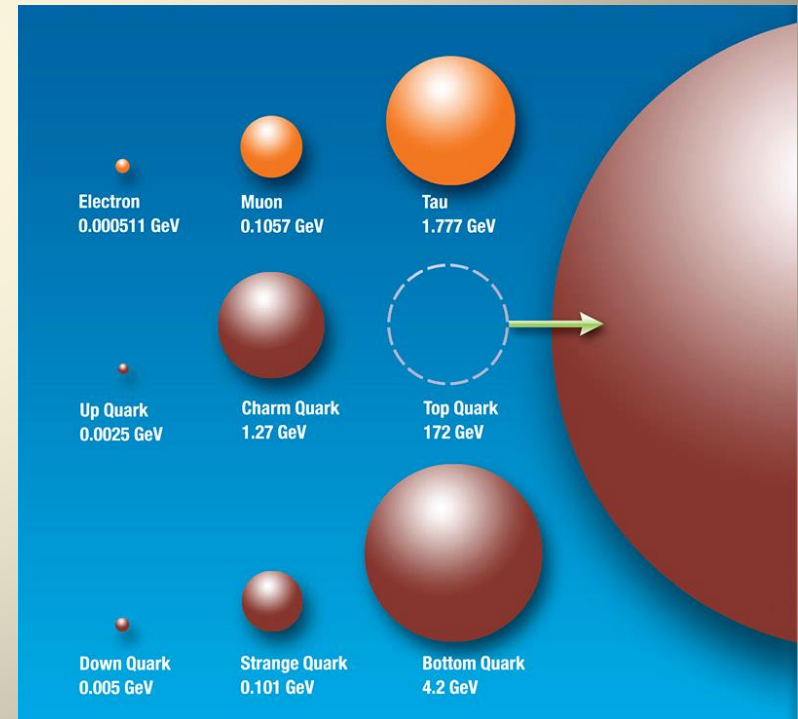
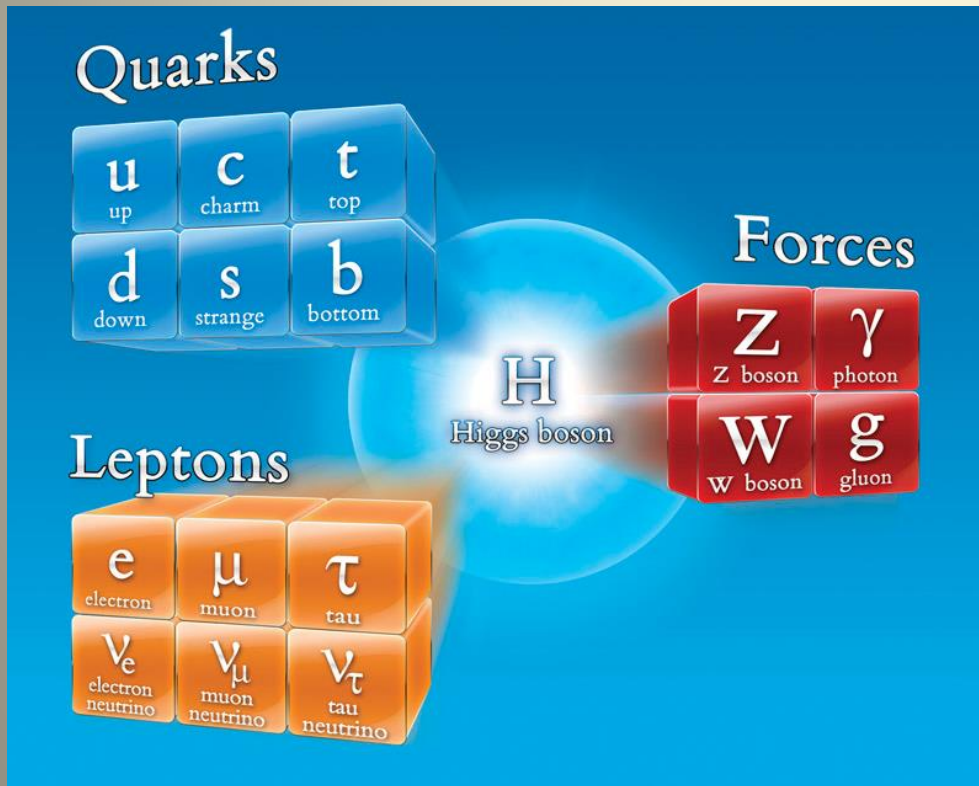
Zakaj pospeševalniki ?

- 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: $E \sim 2E_p$
- Velika energija
 - Majhne dimenzije
 - Visoke temperature
- Bliže nastanku Vesolja



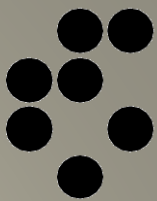
Standardni model - Higgsov bozon

- 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



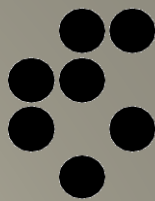


Higgs – zmuzljiv plen



- 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, $T = 1,9 K$
 - $B_{max} = 8,3 T \rightarrow E_{max} = 7 TeV$
- 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 $E = 7/8/13 TeV$ (2011/12/15-18)
- Fizikalni proces – tarča za proton: presek σ
 - Jedra, proton majhne tarče – enota barn: $b = 10^{-28} m^2$
 - 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

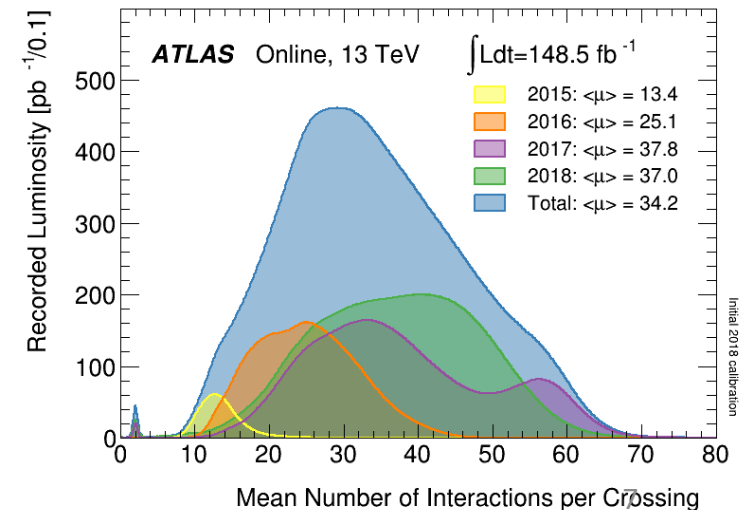
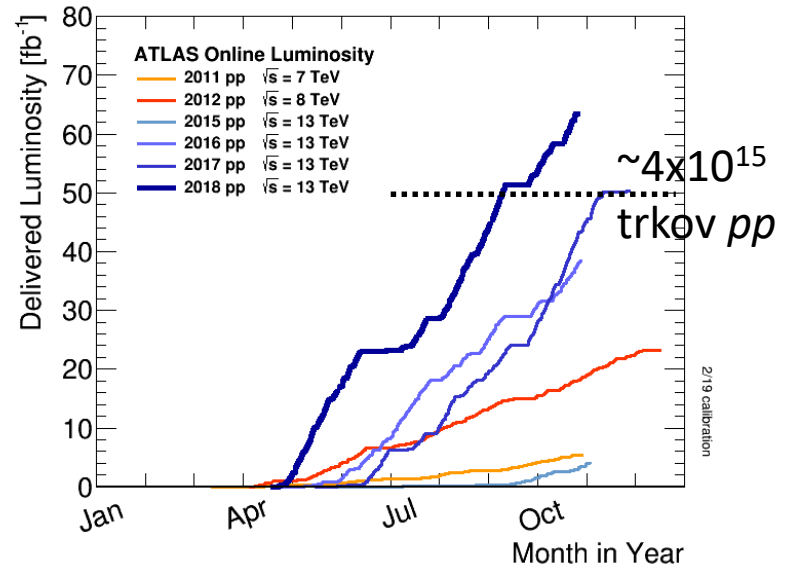
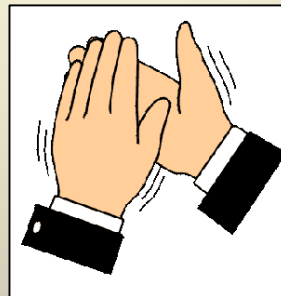
- $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$ pri 13 TeV
- max. $\sim 20 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$
 - $\sim 1.6 \times 10^9$ trkov/s
 - ~ 50 trkov/gručo

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

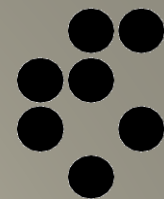
- Skupaj $\sim 1.6 \times 10^{16}$ trkov

- 16 milijonov milijard

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



Tvorba Higgsovega delca na LHC



- Higgs se skluplja na delce z maso
 - Linearna sklopitev na fermione (Yukawa)
 - Kvadratična na šibke bozone W in Z
- Tvorba v trkih p-p pri energiji 7-8-13 TeV
 - Pretežno preko zlitja gluonov
 - Gluoni brez mase – rabimo (težkega) posrednika
 - Zanka s top kvarkom
 - Sposoditi si je treba veliko maso
 - Verjetnost zato majhna
 - Presek $\mathcal{O}(n \times 10 \text{ pb})$
 - Celotni za trke pp $\mathcal{O}(100 \text{ mb})$

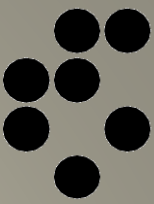
$$g_{Hf\bar{f}} = \frac{m_f}{v}, \quad g_{HVV} = \frac{2m_V^2}{v}, \quad g_{HHVV} = \frac{2m_V^2}{v^2}$$



Nekaj Higgsovih bozonov nastane na vsakih 10 milijard protonskih trkov !



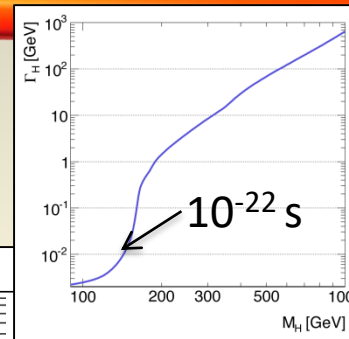
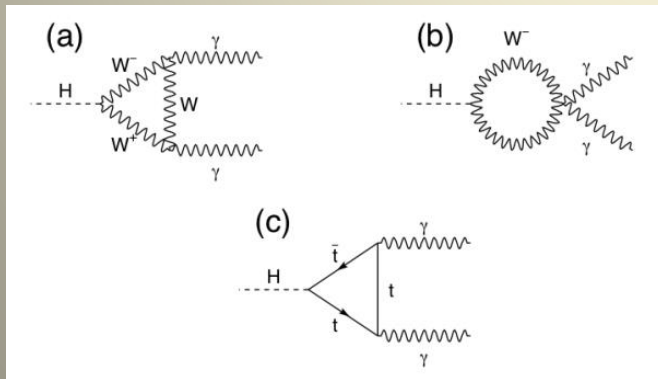
Tvorba Higgsovega delca na LHC



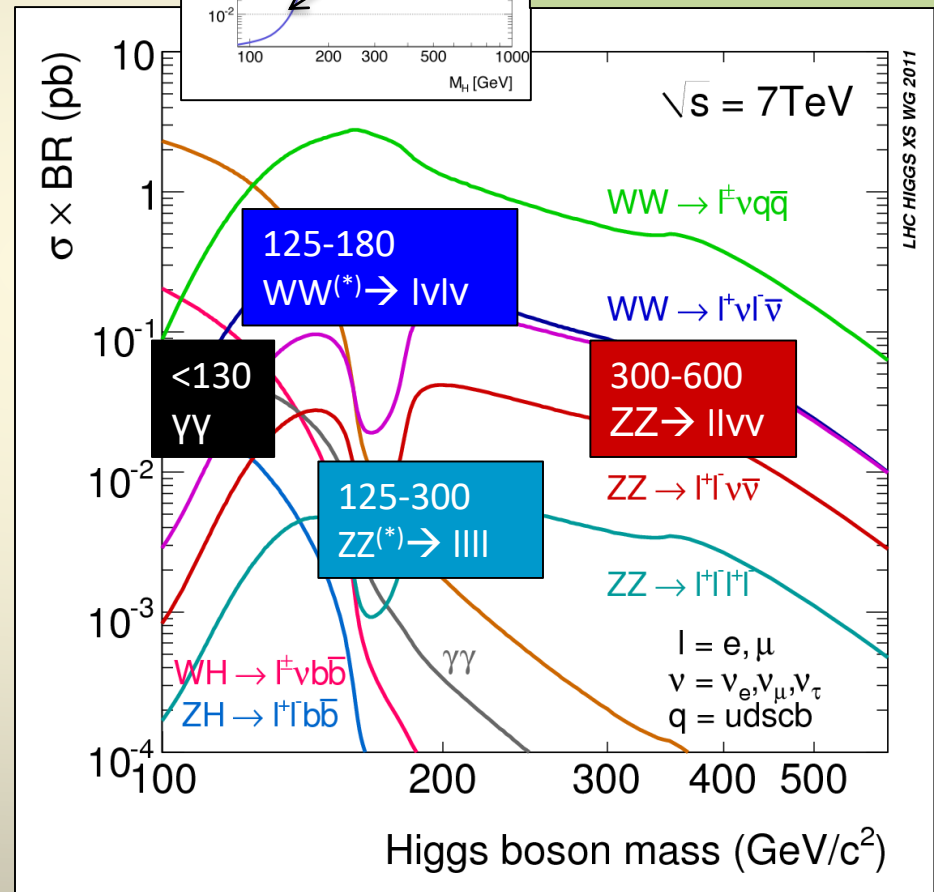
V kateri kopicici je šivanka ?

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

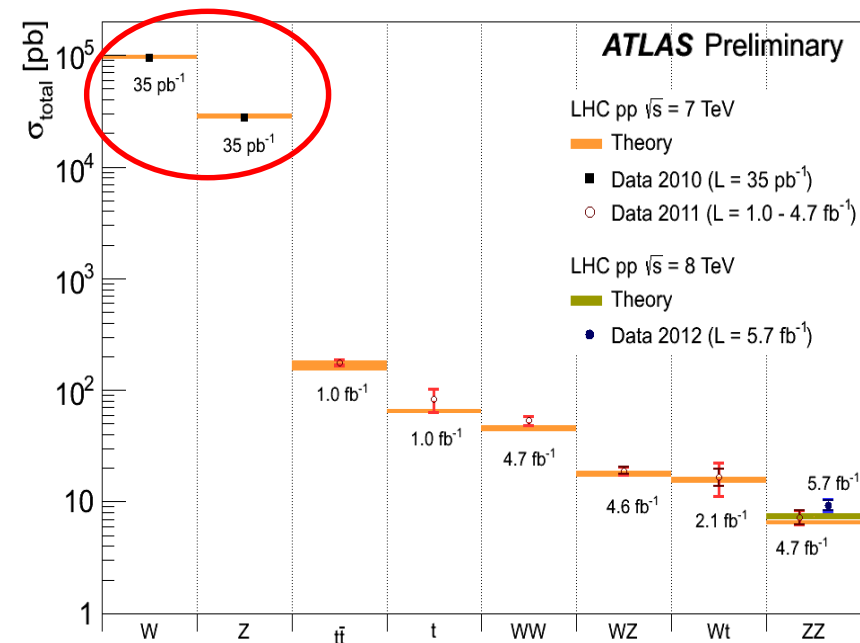


Hitreje kot razpade, manj natančno maso ima - Heisenberg



Zaznava Higgsa na LHC

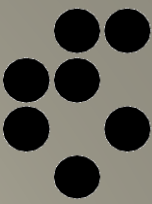
- Redek proces
 - Tvorba le $\mathcal{O}(10^{-10})$ od celotne
 - Nadaljnje zmanjšanje zaradi izbire razpadnega načina
- Ogromno ozadje
 - Zahtevamo značilne lastnosti dogodkov
 - Leptoni (e, μ) iz W, Z
 - Fotoni z veliko energijo
 - “Zlati” razpad: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 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



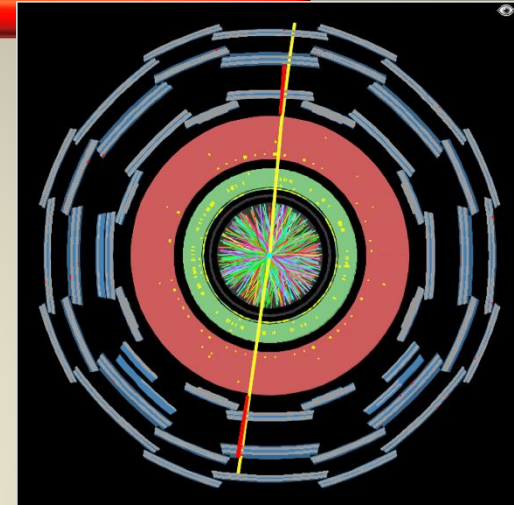
Včerajšnji signal je
današnje ozadje!
(1G W, 100M Z, 1G t)

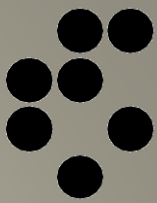


Dodatna ovira – več trkov



- 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

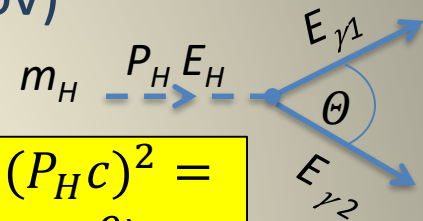




Signal v prisotnosti ozadja

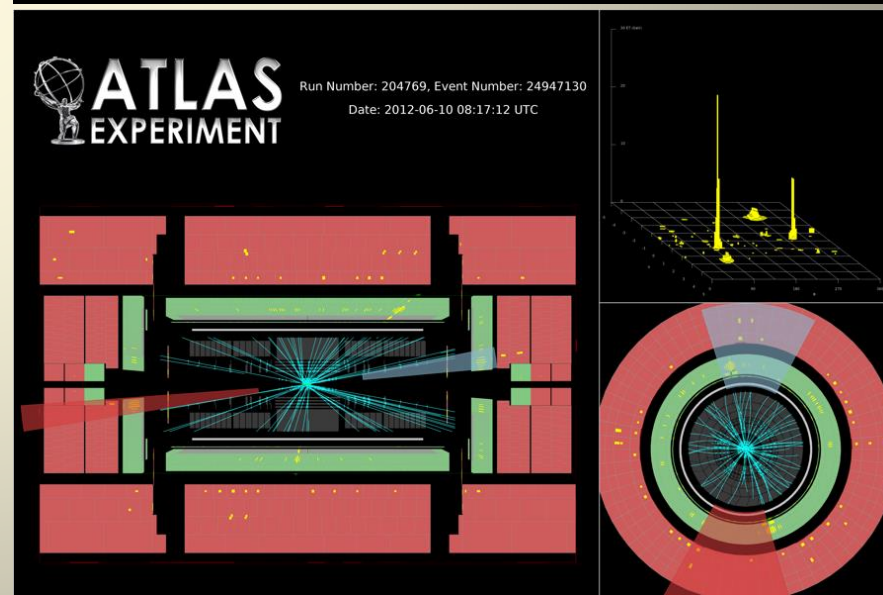
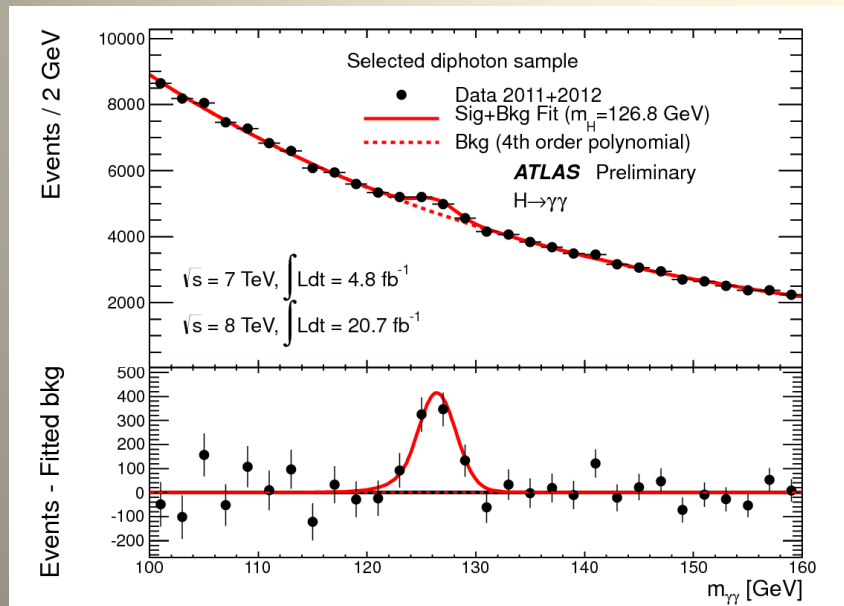
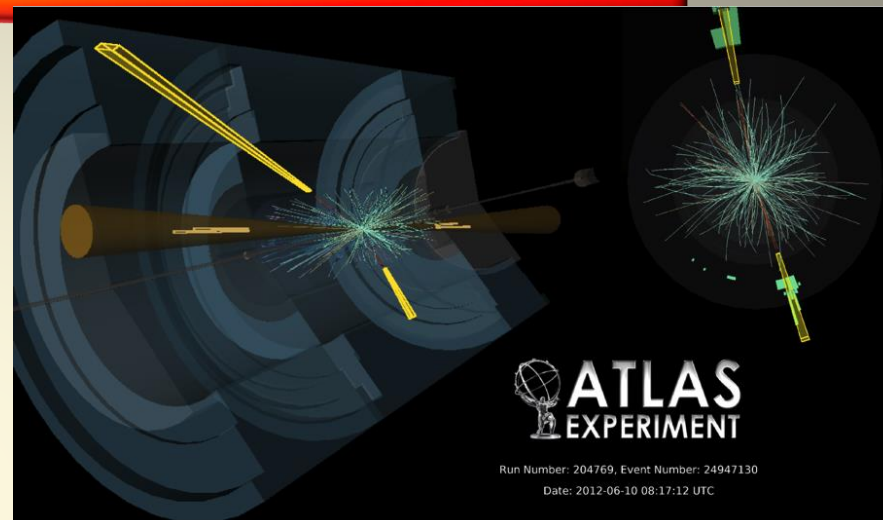
- Najmočnejši razpadi za detekcijo pri majhnih masah H
 - $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ (štetje presežka dogodkov)
 - $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ (masa H)
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$ (masa H)
- Pri vseh prisotno ozadje
 - Leptoni iz razpadov W in Z , ozadje QCD
- Mahjen 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 !

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

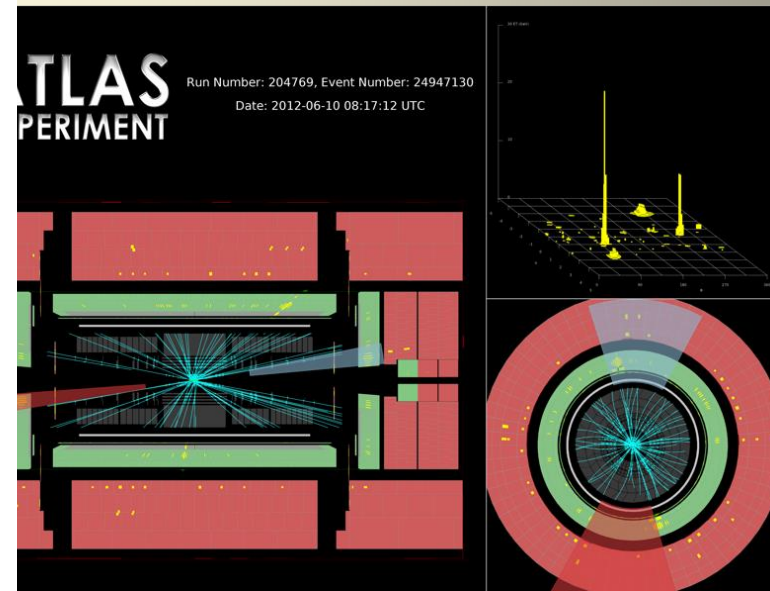
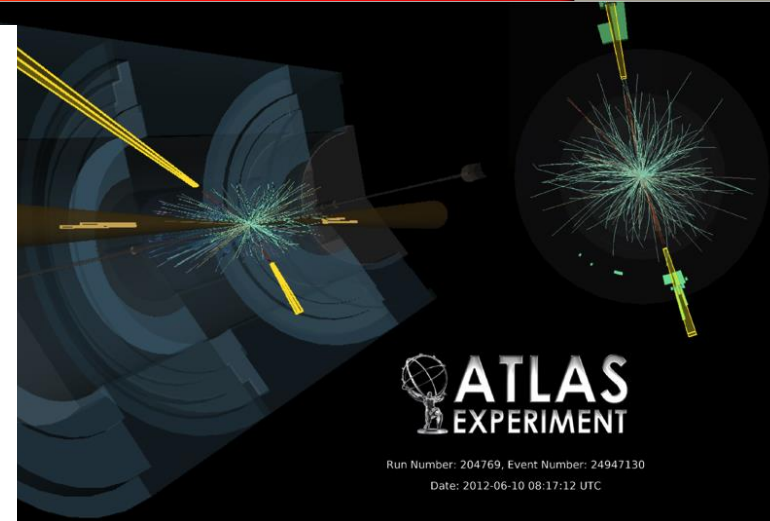
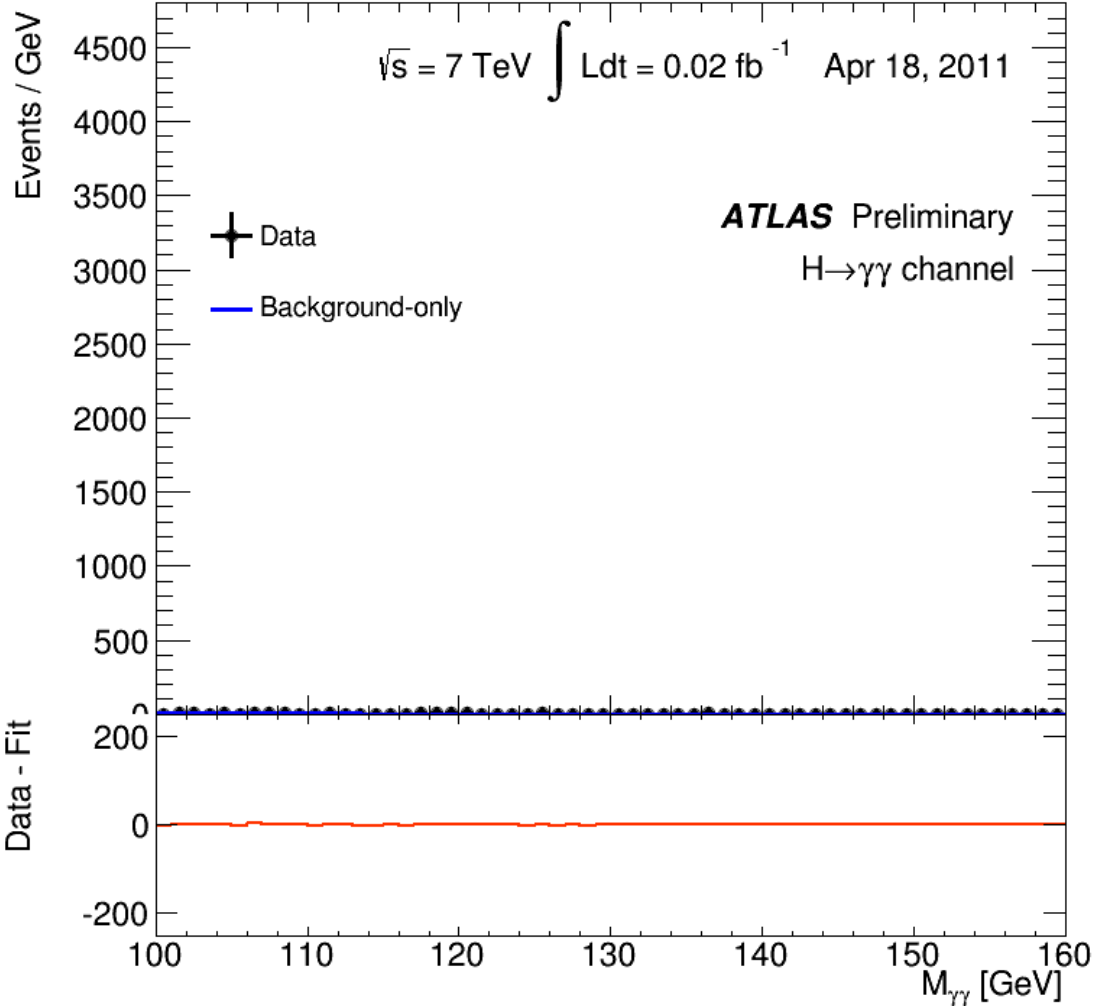


Vzorec $H \rightarrow \gamma\gamma$

- Vsi podatki iz 2011 (4.8 fb^{-1}) in 2012 (20.7 fb^{-1})
 - Zaznanih $\sim 145\text{k}$ dogodkov z $100 < m_{\gamma\gamma} < 160 \text{ GeV}$ v naboru podatkov iz 2011+2012
 - Pričakovan izkoristek za signal: $\sim 40\%$ za $m_H=125 \text{ GeV}$
- Prilagajanje spektru $m_{\gamma\gamma}$
 - Polinomom četrte stopnje za ozadje
 - Odzivno funkcijo kalorimetra za signal
 - Ozadje določeno neposredno iz podatkov
- Vrh s 1000 dogodki na 18000 dogodkih ozadja

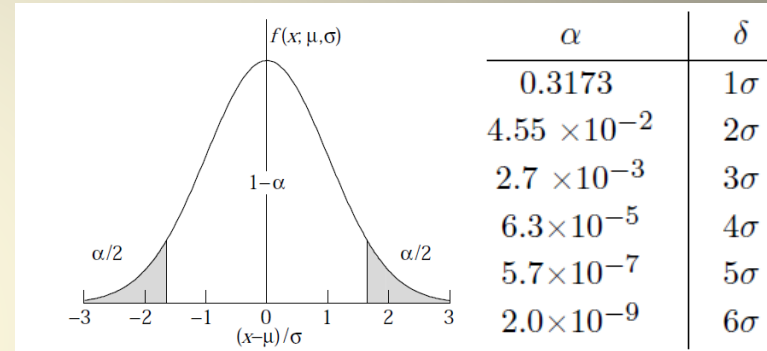


Vzorec $H \rightarrow \gamma\gamma$



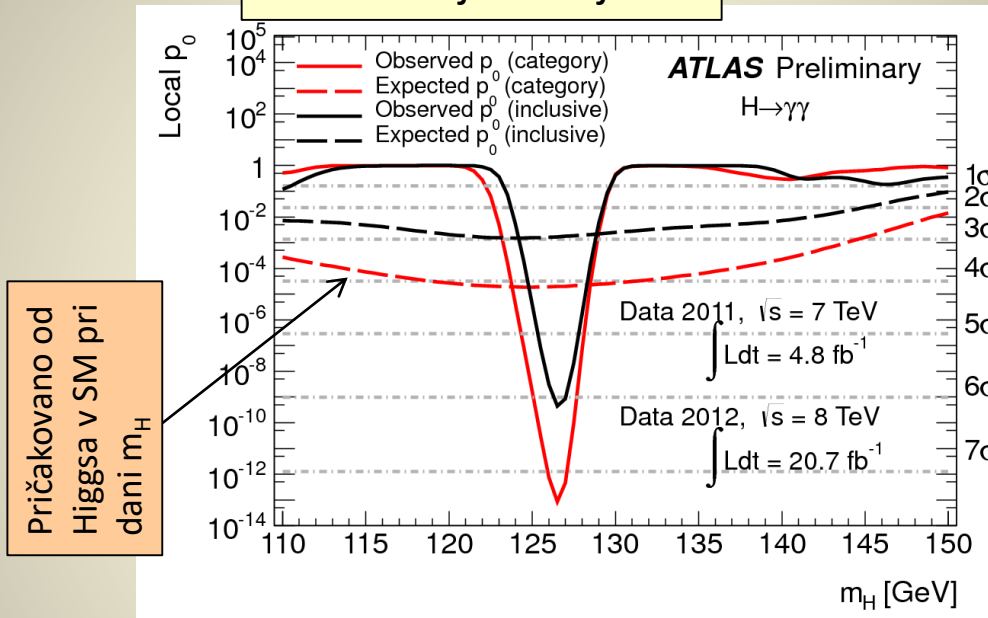
Fluktacije ozadja

- Ozadje je naključen proces, N_{oz} 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 $\sim 2 \sigma$ fluktacijo $S+B$ 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 – kdaj kockar goljufa ?
 - Za pošteno kocko, ki ustreza ozadju brez signala
 - 1 σ fluktacija: \sim šestica v prvem poskusu
 - 2 σ fluktacija: \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 : $\sim 4.1 \sigma$
- Opazili več signala, kot ga napove SM... fluktuacija signala navzgor
- **Odkritje** v tem razpadnem načinu, ni več smiselno postavljati izključitve...

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
 - $>10^4$ več trkov pri višjih energijah kot ob odkritju Higgsovega bozona 4.julija 2012
 - Optimalni 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

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits
July 2018

ATLAS Preliminary $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ TeV

Model	$\tilde{g}, \tilde{u}, \tilde{t}, \tilde{b}$ Jets	E_{T}^{miss} [$\sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta p_T)^2}$]	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8$ TeV	$\sqrt{s} = 13$ TeV	Reference
Production Decays	$\tilde{g} \rightarrow g\tilde{g}$	0 2.0 jets Yes 36.1	0.46 0.71 1.50	0.46 0.71 1.50	0.46 0.71 1.50	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.95-1.0	2.0	1711.0201
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	1.85	1712.0302	
	$\tilde{g} \rightarrow \tau\tilde{\tau}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	1.2	1712.0302	
2-jet, 1-lepton, 1- E_{T}^{miss} decays	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.67	0.67	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \tau\tilde{\tau}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.60-0.64	0.60	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.46	0.46	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.42	0.42	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302
	$\tilde{g} \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	Forbidden	0.30-0.36	0.30	1712.0302

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

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits
Status: July 2018

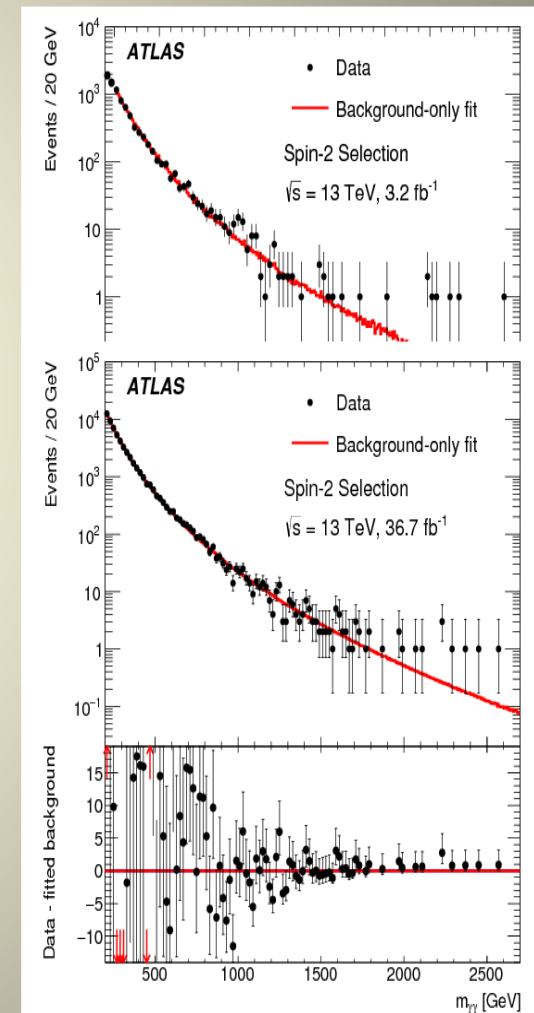
ATLAS Preliminary $\sqrt{s} = 8, 13$ TeV

Model	$\tilde{g}, \tilde{u}, \tilde{t}, \tilde{b}$ Jets	E_{T}^{miss} [$\sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta p_T)^2}$]	Limit	$\sqrt{s} = 8, 13$ TeV	Reference
Extra dimensions	ADD $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.73 TeV	2.73 TeV	1711.0201
	ADD $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} + \tilde{g}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	ADD $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} + \tilde{u}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	ADD $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} + \tilde{t}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
Gauge bosons	$S_{SM} Z \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow \tau\tilde{\tau}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow b\tilde{b}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow t\tilde{t}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow \tau\tilde{\tau}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow b\tilde{b}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow t\tilde{t}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow \nu\tilde{\nu}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302
	$S_{SM} Z \rightarrow \tau\tilde{\tau}$	0 2.0 jets Yes 36.1	2.83 TeV	2.83 TeV	1712.0302

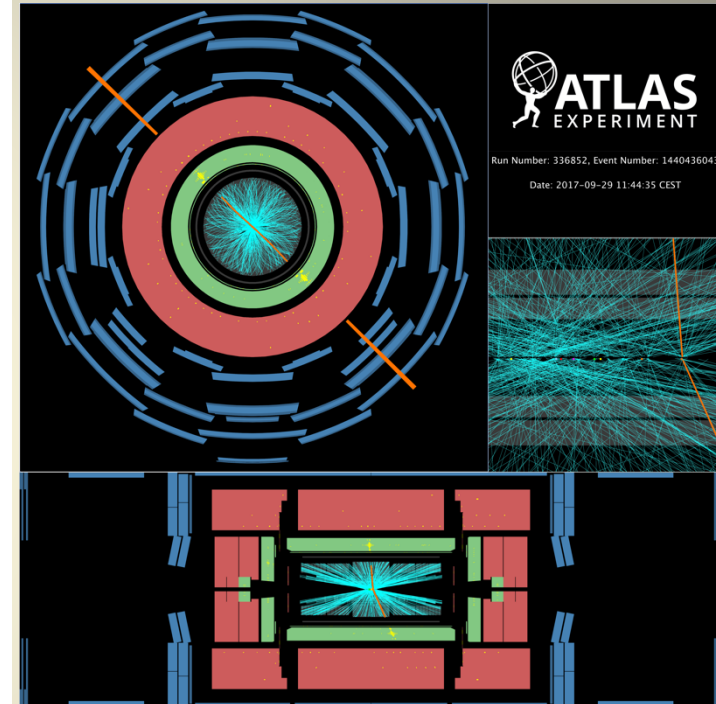
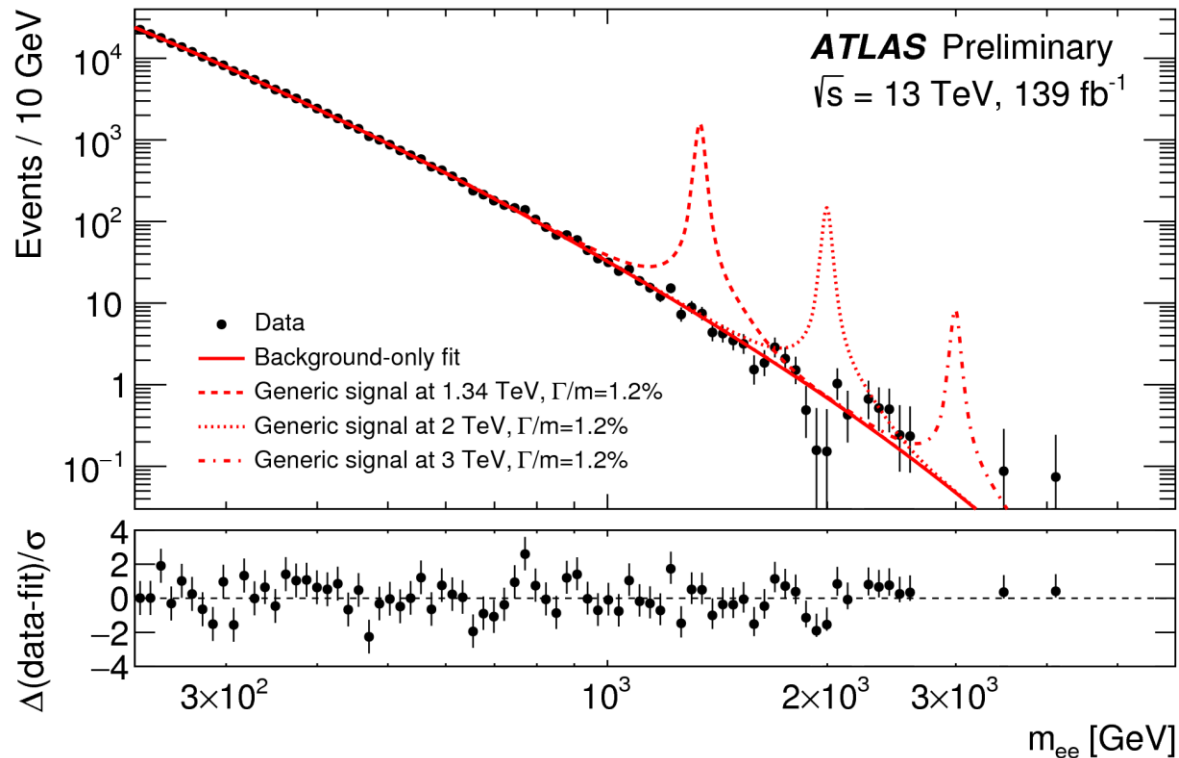
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. (Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter [L].)

(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...

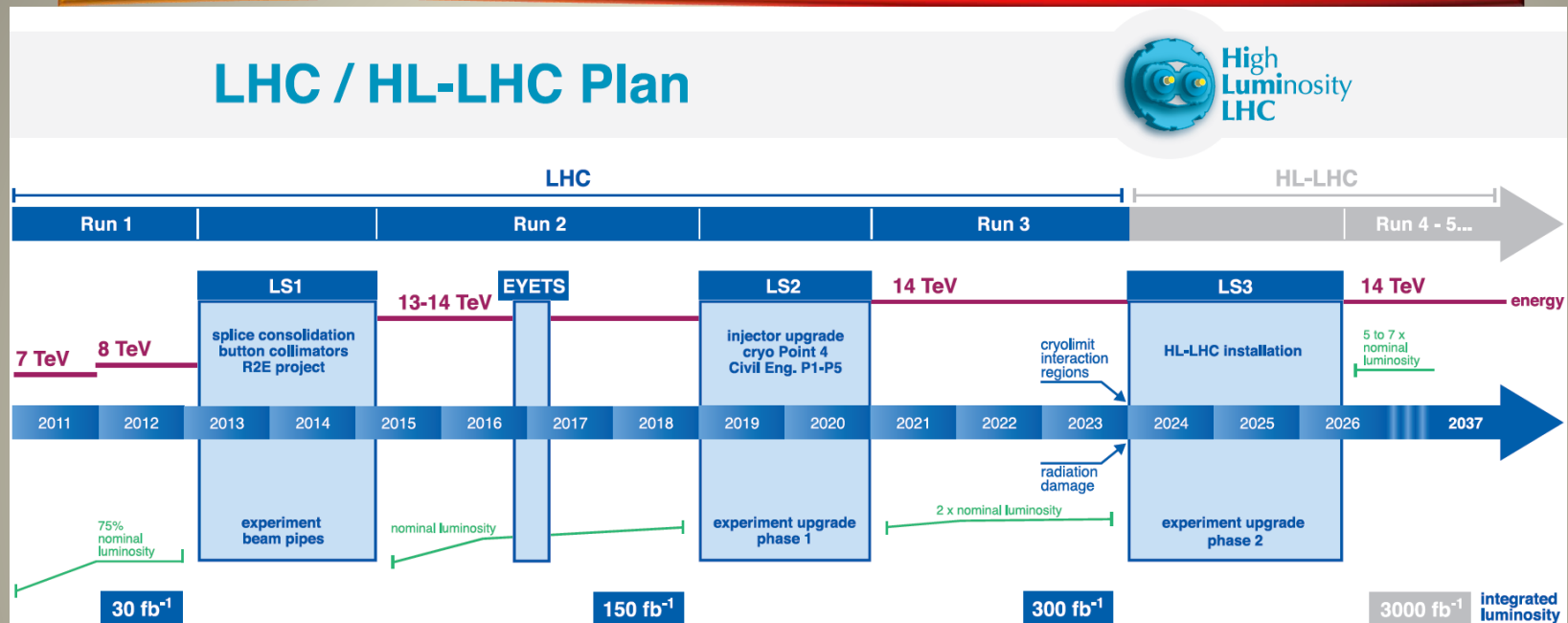


Zadnji rezultati

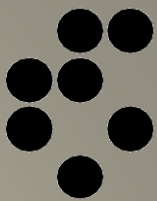


- Nikakršnega presežka nad napovedanim ozadjem po SM
- Meje na Z' okoli 5 TeV

Kako naprej ?

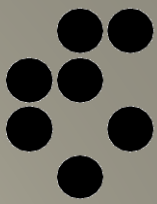


- Prva prioriteta: izkoristiti zmogljivosti LHC
 - Run3 (2021-23): še 2x več trkov pri energiji 14 TeV
 - HL-LHC (2026-): še 10x več trkov kot v Run3
 - Nadgradnja LHC na $\geq 3x$ večjo pogostost trkov
 - Nadgradnja detektorjev (zamenjava sledilnikov, ...)



Bo to zadosti ?

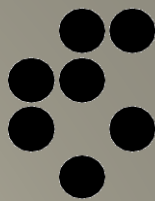
- Najverjetneje ne ☹
 - Signifikanca narašča kot \sqrt{N}
 - Za nova odkritja ($>5\sigma$) bi morali že danes imeti nekaj vročih odstopanj ($>2\sigma$)
 - Vendar statistika vedno lahko skriva presenečenja (sreča)
 - obeh vrst seveda...
 - Razen tega bo potrbeno odkritja *razumeti*
 - Spekter novih delcev, meritve njihovih lastnosti



Kaj bi radi imeli ?

- Posredne meritve
 - Precizne meritve delcev Standardnega modela
 - Predvsem Higgsov delec občutljiv na procese NP
 - Déjà vu:
 - Meritve na LEP dale dobro informacijo o masi top kvarka in Higgsovega bozona pred njunim odkritjem
 - **Tovarna Higgsovih bozonov**
 - Najbolje s trki $e^+e^- \rightarrow ZH$
- Neposredne meritve
 - Največje energije najlažje doseči s trki protonov
 - Smislen preboj z novo dekada v energiji
 - **Trkalnik protonov energije 100 TeV** bi raziskal energijsko območje do ~ 10 TeV

70-letni "program" CERNa



Future Circular Collider (FCC)

	\sqrt{s}	L/IP (cm ⁻² s ⁻¹)	Int. L/IP(ab ⁻¹)	Comments	
e ⁺ e ⁻ FCC-ee	~90 GeV	Z	230 x 10 ³⁴	75 ab ⁻¹	2 experiments
	160	WW	28	5	Total ~ 15 years of operation
	240	H	8.5	2.5	
	~365	top	1.5	0.8	
pp FCC-hh	100 TeV	5 x 10 ³⁴ 30	2.5 ab ⁻¹ 15	2+2 experiments Total ~ 25 years of operation	
PbPb FCC-hh	$\sqrt{s_{NN}} = 39\text{TeV}$	3 x 10 ²⁹	100 nb ⁻¹ /run	1 run = 1 month operation	
ep Fcc-eh	3.5 TeV	1.5 10 ³⁴	2 ab ⁻¹	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with pp for ~ 20 years	
e-Pb Fcc-eh	$\sqrt{s_{eN}} = 2.2\text{ TeV}$	0.5 10 ³⁴	1 fb ⁻¹	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with PbPb	

- Sequential implementation, FCC-ee followed by FCC-hh, with
- variety of collisions (ee, pp, PbPb, eh) → impressive breadth
 - exploiting synergies by combining complementary physics → maximise indirect and direct discovery potential for new physics
 - starting with technologically ready machine (FCC-ee); design of FCC-hh (e.g. HTS magnets) for highest pp energy (100++ TeV!)
 - building stepwise at each stage on existing accelerator complex

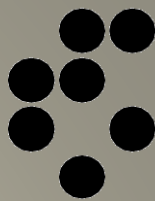
Purely technical schedule, assuming green light to preparation work in 2020.
A 70 years programme

8 years preparation

2020-2028



70-letni "program" CERNa



Future Circular Collider (FCC)

	\sqrt{s}	L/IP (cm ⁻² s ⁻¹)	Int. L/IP(ab ⁻¹)	Comments	
e ⁺ e ⁻ FCC-ee	~90 GeV	Z	230 x 10 ³⁴	75 ab ⁻¹	2 experiments
	160	WW	28	5	Total ~ 15 years of operation
	240	H	8.5	2.5	
	~365	top	1.5	0.8	
pp FCC-hh	100 TeV	5 x 10 ³⁴ 30	2.5 ab ⁻¹ 15	2+2 experiments Total ~ 25 years of operation	
PbPb FCC-hh	$\sqrt{s_{NN}} = 39\text{TeV}$	3 x 10 ²⁹	100 nb ⁻¹ /run	1 run = 1 month operation	
ep Fcc-eh	3.5 TeV	1.5 10 ³⁴	2 ab ⁻¹	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with pp for ~ 20 years	
e-Pb Fcc-eh	$\sqrt{s_{eN}} = 2.2\text{ TeV}$	0.5 10 ³⁴	1 fb ⁻¹	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with PbPb	

- Sequential implementation, FCC-ee followed by FCC-hh, with
- variety of collisions (ee, pp, PbPb, eh) → impressive breadth
 - exploiting synergies by combining complementary physics → maximise indirect and direct discovery potential for new physics
 - starting with technologically ready machine (FCC-ee); developing new technologies (e.g. HTS magnets) for highest pp energy (100++ TeV!)
 - building stepwise at each stage on existing accelerator complex

Purely technical schedule, assuming green light to preparation work in 2020.
A 70 years programme

8 years preparation
2020-2028

The collage features several elements:

- The Economist Magazine (2019):**
 - Top left: "The World in 2019" cover with pills labeled "UNICEF" and "UNICEF".
 - Top right: "The World in 2019" cover with a bottle and pills.
 - Bottom right: "The World in 2019" cover with a yin-yang symbol and the text "Pony Ma: How tech can do a power of good."
- Central Figures:**
 - Angelina Jolie: "A measure of humanity."
 - Leonardo da Vinci: "The Renaissance treatment."
 - Christine Lagarde: "A boost for inclusive growth."
 - Fabiola Gianotti: "A scientifically proven formula." (highlighted with a green circle and red arrow)
- Group Photo:** A group of approximately 15 people standing on a set of stairs in front of a building.
- Other Elements:** A red arrow points from the pills in the top left towards the central figures.

Prvih 33 let...



FCC-ee

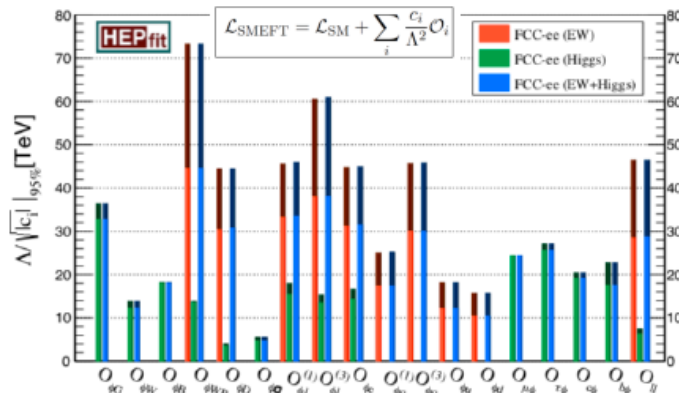
5×10^{12} Z ($10^5 \times$ LEP), 10^8 WW ($10^3 \times$ LEP), 10^6 H (not yet in e^+e^-), 10^6 tt (not yet in e^+e^-)

Unprecedentedly precise measurements of Higgs couplings (model-independent) and EW parameters with x10-50 improvement on current precision → indirect sensitivity to new physics up to $\Lambda \sim 100$ TeV → pattern of deviations may indicate specific scenarios for new physics

Searches for ultra-rare/forbidden decays (e.g. $Z \rightarrow \tau\mu$) and new particles with very small couplings

Note: need improved theoretical calculations to match experimental precision → strategic investment

Sensitivity to "interaction scales" of new physics from EW and Higgs measurements (dark shades: no theory uncertainty)



Machine: lot of experience from previous e^+e^- circular colliders, in particular past and current B-factories (Super-KEKB!)

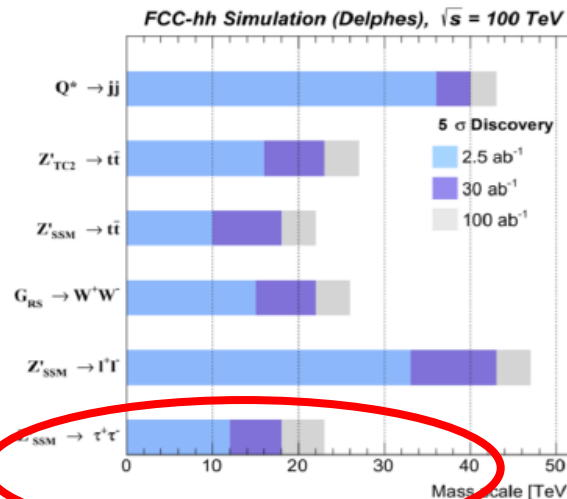
Estimated cost: ~ **11.6 BCHF**: 5.4 B (tunnel), 5.1 B (injectors + collider up to $\sqrt{s}=240$ GeV), 1.1 B (additional RF for operation at $\sqrt{s} \sim 365$ GeV)

... in nadaljnjih 36 let



FCC-hh

- ❑ Direct exploration of the 10-50 TeV E-scale
- ❑ Searches for (higgsino- and wino-like) WIMP dark matter up to mass upper limits of 1-3 TeV
- ❑ Measurements of Higgs self-coupling to $\sim 5\%$; unprecedented sensitivity to rare decays
- ❑ Detailed study of the EWSB dynamics and EW phase transition



Formidable technical challenges !! Examples:

- ❑ high-field superconducting magnets (≥ 16 T)
- ❑ 5 MW (cfr. LHC: 15 kW) power load in arcs from synchrotron radiation \rightarrow cryogenics, vacuum
- ❑ stored beam energy (8 GJ, 12 x HL-LHC)
- ❑ pile-up in the detectors (~ 1000 events/xing)
- ❑ annual energy consumption: 4 TWh/year (~ 3 x HL-LHC)

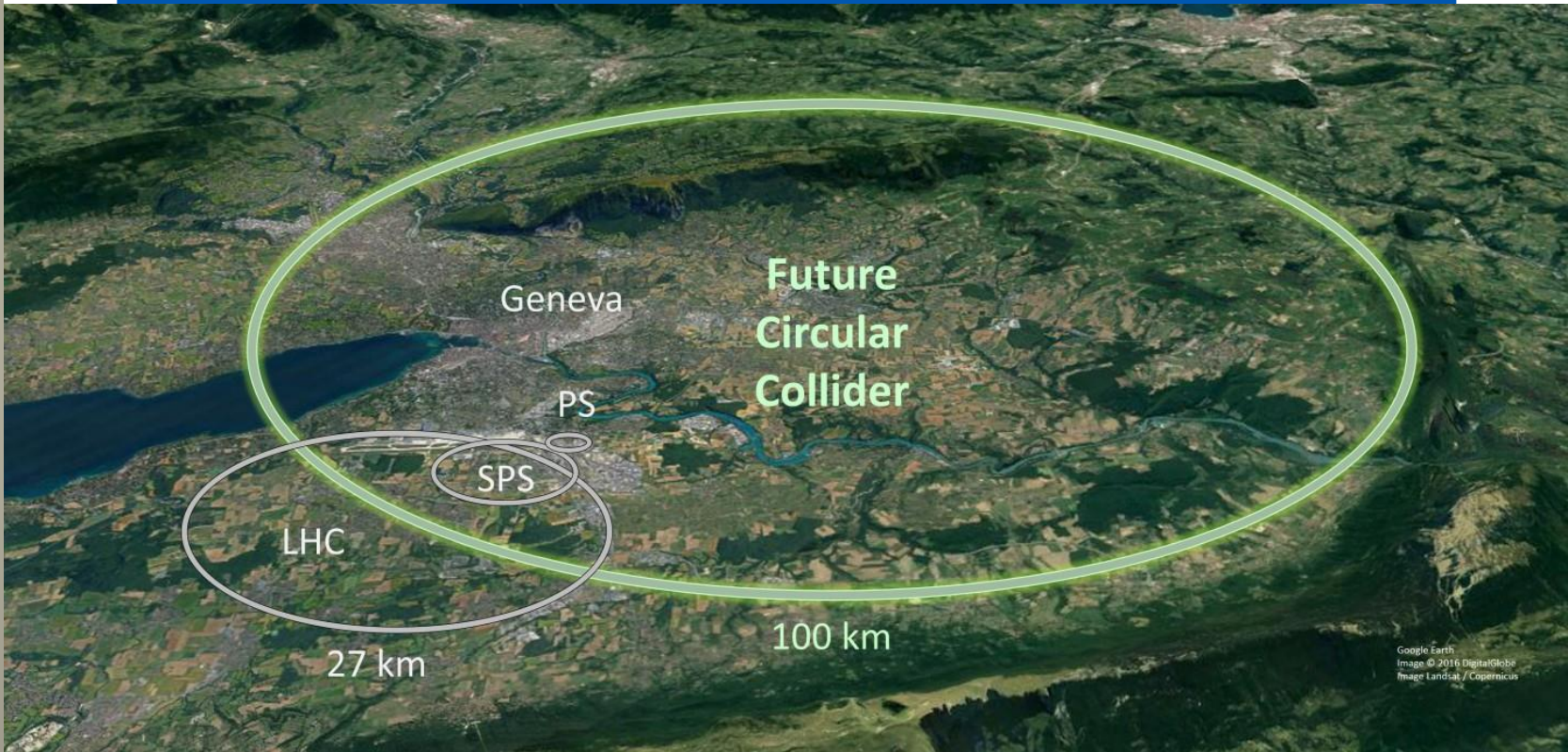
Doseg: n x 10 TeV

Estimated cost: ~ 17 BCHF (13.6 B collider [magnets!] + injectors) if built after FCC-ee (tunnel and part of infrastructure exists); 24 BCHF if standalone.

... in nadaljnjih 36 let

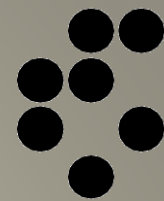


FCC-hh



Estimated cost: ~ **17 BCHF** (13.6 B collider [magnets!] + injectors) if built after FCC-ee (tunnel and part of infrastructure exists); 24 BCHF if standalone.

In to še ni vse...



ECFA
European Committee for Future Accelerators

103rd Plenary ECFA meeting - CERN

15/16 nov. 2018

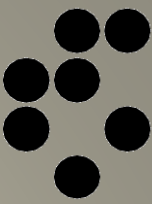
Tehnologija

16:00	RF acceleration 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	Olivier Napoly	16:00 - 16:30
	High Field Magnets 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	Fernando Toral	16:30 - 17:00
17:00	Plasma acceleration 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	Allen Christopher Caldwell	17:00 - 17:30
	Accelerator science education and schools 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	Elias Metral	17:30 - 17:50
18:00	Accelerators for Society 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	Lenny Rivkin	17:50 - 18:10

in projekti

09:00	HL-LHC/HE-LHC 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	pp	Patrizia Azzi	09:00 - 09:40
	FCC-hh 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	pp	Martin Aleksa	09:40 - 10:15
	Coffee/Tea break			10:15 - 10:35
	Ion and Ion-electron colliders 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	$Ion-ion, e-ion$	Abhay Deshpande	10:35 - 11:05
11:00	LHeC/FCC-eh (incl PERLE) 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	ep	Uta Klein	11:05 - 11:35
	Colliders for b/c/tau production 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	$b/\tau/c$	Alexander Bondar	11:35 - 12:05
13:00	Muon colliders (incl MICE) 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	$\mu^+\mu^-$	Nadia Pastrone	13:00 - 13:30
	CEPC and SppC 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	e^+e^- in pp	Prof. Qin Qing	13:30 - 14:05
14:00	FCC-ee 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	e^+e^-	Patrick Janot	14:05 - 14:40
	Coffee/tea break 500-1-001 - Main Auditorium, CERN			14:40 - 15:00
15:00	ILC 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	e^+e^-	Marcel Stanitzki	15:00 - 15:40
	CLIC 500-1-001 - Main Auditorium, CERN	e^+e^-	Aidan Robson	15:40 - 16:20

- Proces Evropske strategije za fiziko delcev v teku
 - Sprejetje 2020 \Rightarrow cilj: evropske prioritete med projekti



Tehnološki preboji

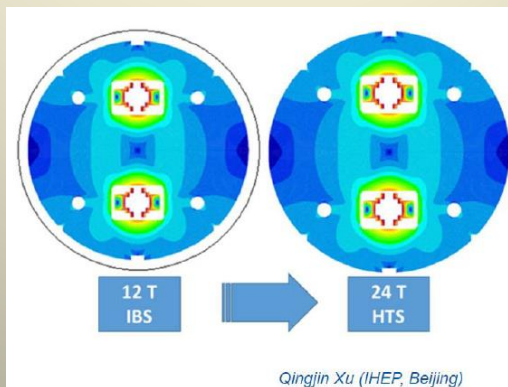
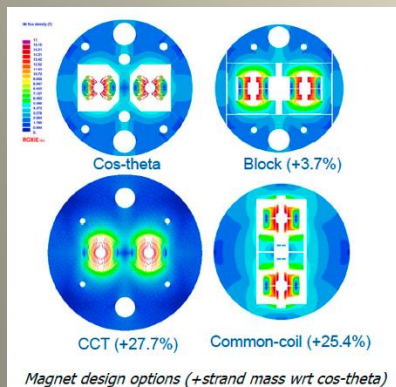
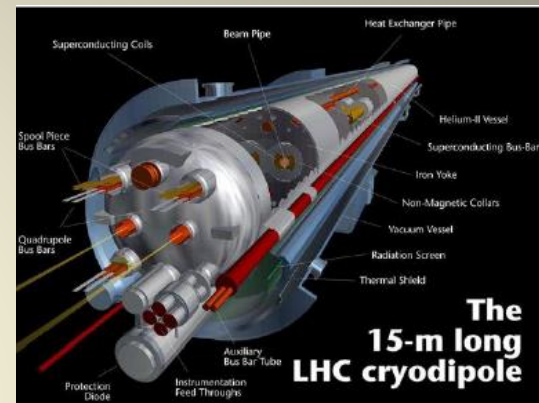
- Pospeševalniki za telebane: *električno* in *magnetno* polje
 - Električno pospešuje: energija \propto polje x dolžina
 - Magnetno krivi tir: energija \propto polje x radij

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Krožni pospeševalniki: isto električno polje izkoristimo večkrat
 - In tudi veliko večino delcev, ki niso trčili
 - npr. 50 TeV \Rightarrow $B = 10$ T in $R = 17$ km (o ≈ 100 km), oboje *ni trivialno*
- Rešitev za protone: krožni pospeševalniki
- Elektroni na urivljenem tiru sevajo sinhrotronsko svetlobo
 - Izgube $\propto E^4/R$, na LEP >30 MW sevanja pri 100 GeV, 1 TeV \Rightarrow 300 GW
- Linearni pospeševalniki konkurenčni za elektrone
 - Velika električna polja, dolžina
 - npr. 1 TeV = 100 MV/m x 10 km, oboje *ni trivialno*

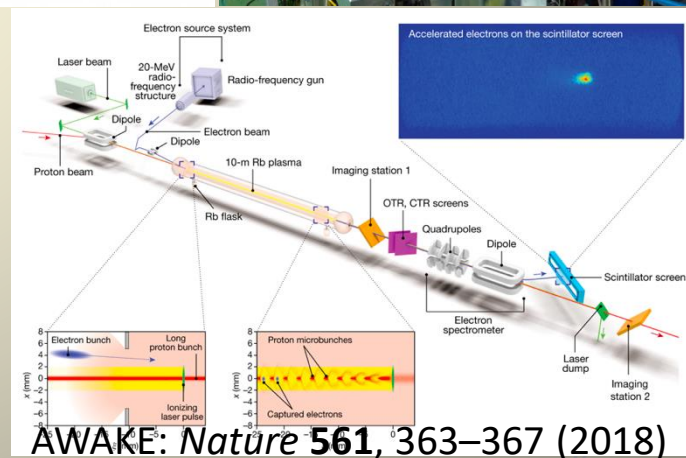
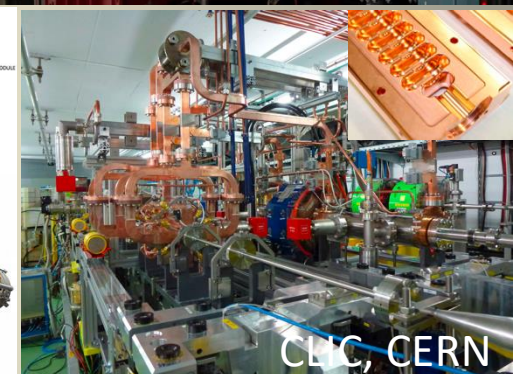
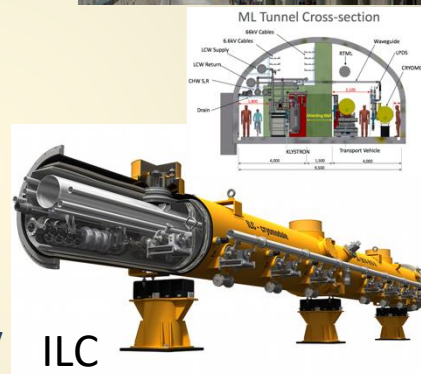
Tehnološki preboji: magneti

- Magneti omejujoči za energijo protonskih trkalnikov
- Trkalnik Tevatron razvil supraprevodno tehnologijo NbTi
 - Iz laboratorja do obroča dolžine 6 km (17 ton NbTi)
 - Standardna oprema MRI magnetov danes: 5 GEUR/y
 - V načelu do 15 T, težave pri velikih magnetih nad 10 T
 - V LHC prvotni načrt 10 T, med RR znižan na 8,3 T
- Za FCC: večja polja (cilj 16 T) \Rightarrow novi materiali
 - Nb₃Sn zdrži do 30 T
 - Krhek, težko izdelati žico za magnet
 - Načrtovani magnet za FCC (in ITER !)
 - Dolge RR, veliki stroški za prototipe na veliki skali
 - Visokotemperaturni superprevodniki
 - Keramika, še težje oblikovati v žice
 - Negotov izid RR, posvojiti za FCC, če bo uspešen



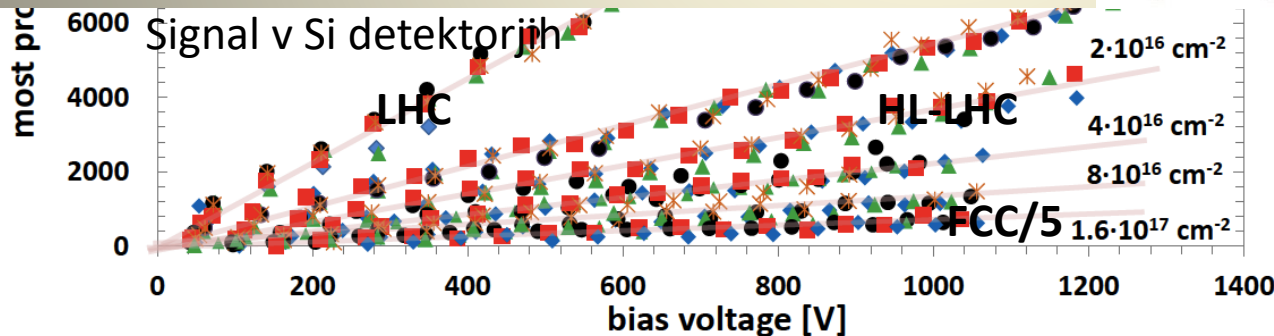
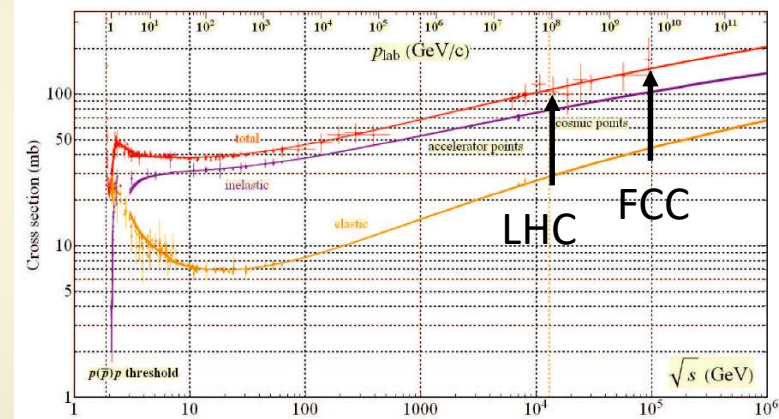
Tehnološki preboji: električno polje

- Električna polja v visokofrekvenčnih resonatorjih
- Omejitev za energijo elektronov
 - Pospeševanje v linearnem pospeševalniku
 - Kritje energijskih izgub v krožnem
- Današnji rekord na veliki skali
 - XFEL - 30 MV/m
- Blizu potreb za ILC 35 MV/m
 - 20 km za 2x125 GeV
- Nadaljnji razvoj
 - 72 MV/m (CLIC) – 11.4 km za 2x190 GeV
 - Val v plazmi (wake field)
 - Doseženih 100 MV/m
 - Cilj 1 GV/m
- Težko bo bistveno preseči 1 TeV
 - Trkalniki za precizne študije npr. Higgsovega bozona

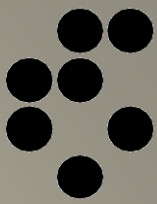


Kaj pa fizika ?

- Osnovna težava: verjetnost za procese pri visokih energijah *pada* z E^2
 - Za isto napovedno moč moramo izmeriti več trkov
 - 100-krat več za 10-krat večjo energijo: cilj FCC - $20 \text{ ab}^{-1} \approx 70 \times \text{LHC}$
 - Več delcev v trkalniku, manjše dimenzije curkov pri trkih
- Dodatna težava: verjetnost za trke protonov *narašča* z energijo
 - Za 30 % med 14 (LHC) in 100 TeV (FCC)
- Produkti trkov poškodujejo detektorje
 - Razmerje sevalnih poškodb
 - LHC:HL-LHC:FCC $\approx 1:20:600$!
 - Izjemni izziv za detektorske tehnologije
 - Pionirske raziskave slovenske skupine



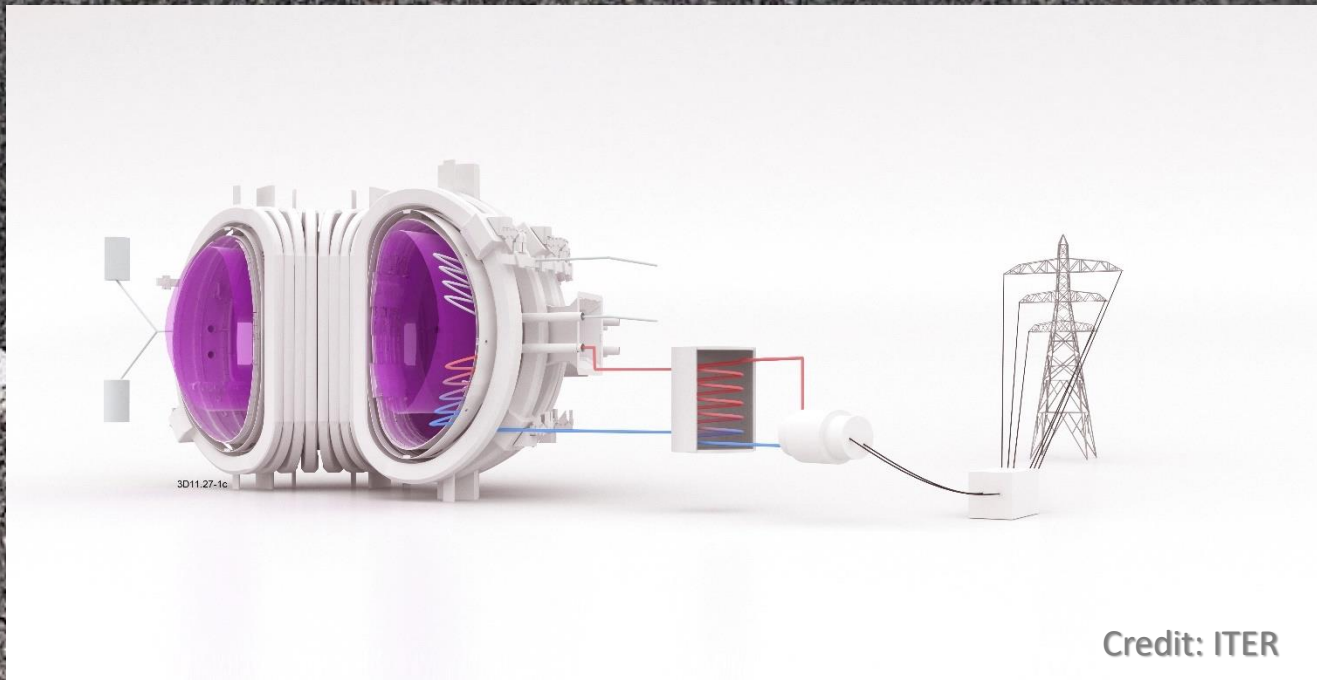
**G. Kramberger et al.,
JINST 8 P08004 (2013).**



Zaključek

- Odpiranje nove dekade v energiji trkalnikov prinaša mnoge resne izzive
 - Tehnologija - preboji na več frontah
 - Magneti
 - Pospeševalne strukture
 - Detektorji
 - Velik uporabni potencial vseh iskanih prebojev !
 - Časovna skala: 30-70 let ?!
 - ...in nenazadnje sredstva: nx10 GEUR
- Za izvedbo bo potrebna globalna sinergija znanstvenikov, inženirjev, javnosti in ...politike !

Znanost
na cesti
In ZRC SAZU



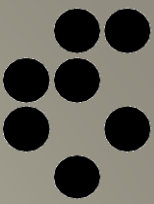
14. maj 2019 ob 19:00

Fuzijska elektrarna - strma pot tehnoloških presežkov

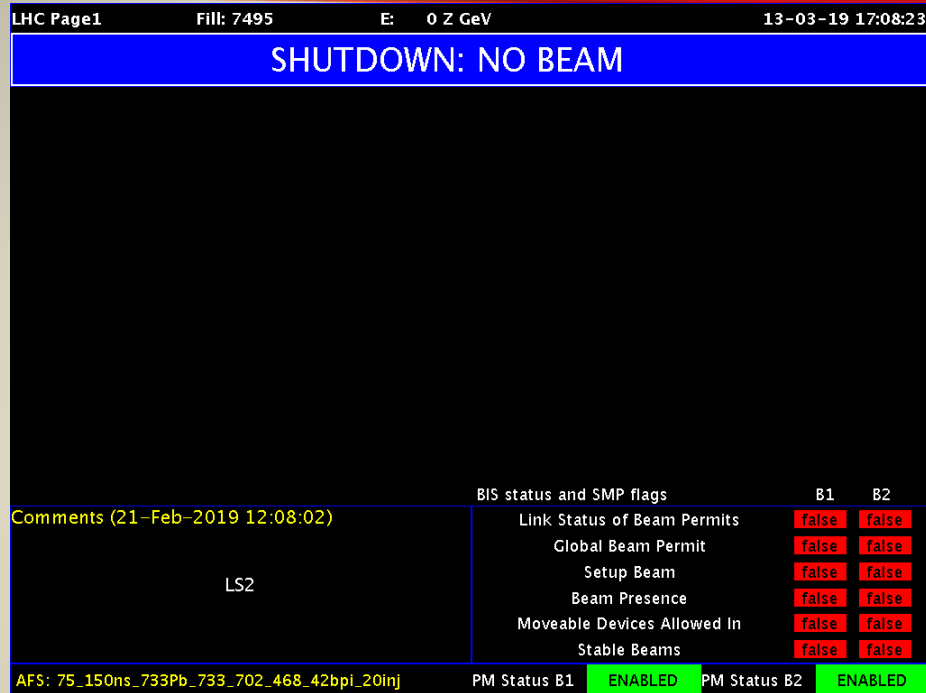
dr. Boštjan Končar, Institut „Jožef Stefan“
Lea Udovč, STA



Dodatne prosojnice



Delovanje LHC v 2019/20

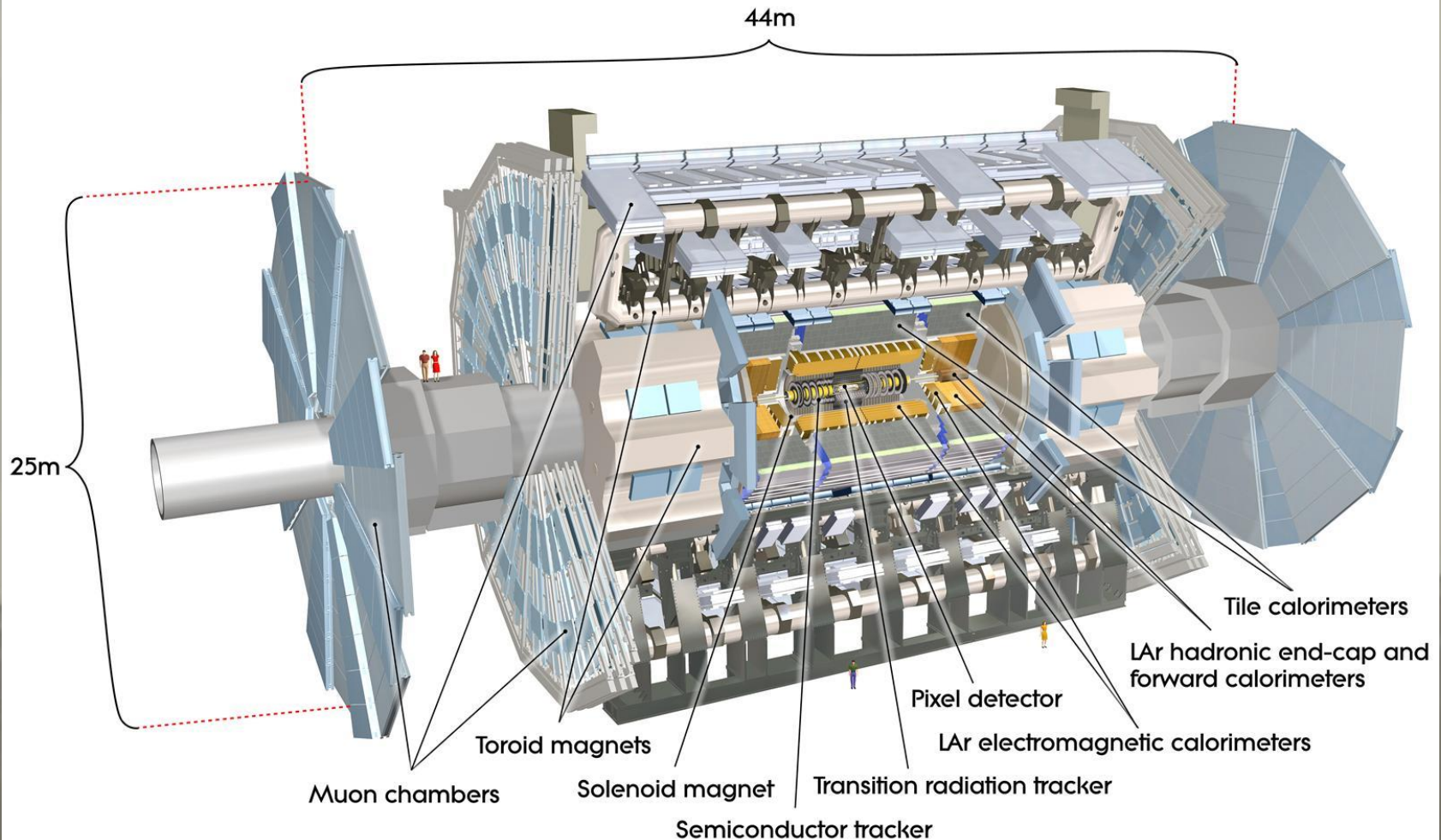


The screenshot shows the LHC control interface. At the top, it displays 'LHC Page1', 'Fill: 7495', 'E: 0 Z GeV', and '13-03-19 17:08:23'. A large blue banner reads 'SHUTDOWN: NO BEAM'. Below this, a large black area is mostly empty. At the bottom, there is a table of status information.

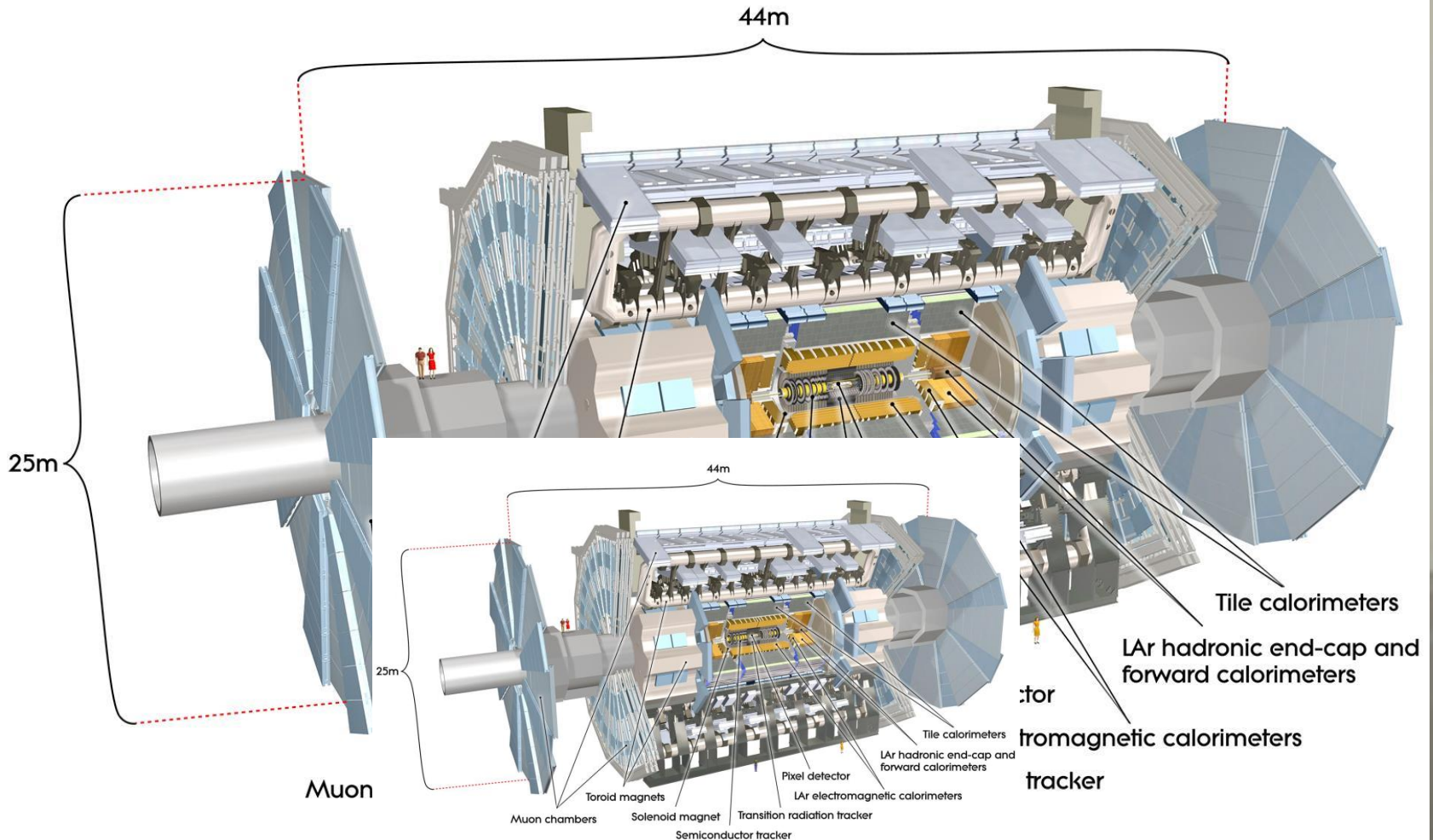
BIS status and SMP flags		B1	B2	
Comments (21-Feb-2019 12:08:02) LS2	Link Status of Beam Permits	false	false	
	Global Beam Permit	false	false	
	Setup Beam	false	false	
	Beam Presence	false	false	
	Moveable Devices Allowed In	false	false	
	Stable Beams	false	false	
AFS: 75_150ns_733Pb_733_702_468_42bpi_20inj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

- Dvoletne priprave na tretje obdobje delovanja LHC – Run3
- Cilja
 - Doseči energijo **14 TeV**
 - Bolj stabilna luminoznost: **300 fb⁻¹** v letih 2021-23 (podvojitve dosedaj zbrane)
- Potem 3-letna prekinitev za nadgradnjo LHC in detektorjev za HL-LHC
 - Cilj: **~3000 fb⁻¹** v **~10** letih

Detektor ATLAS

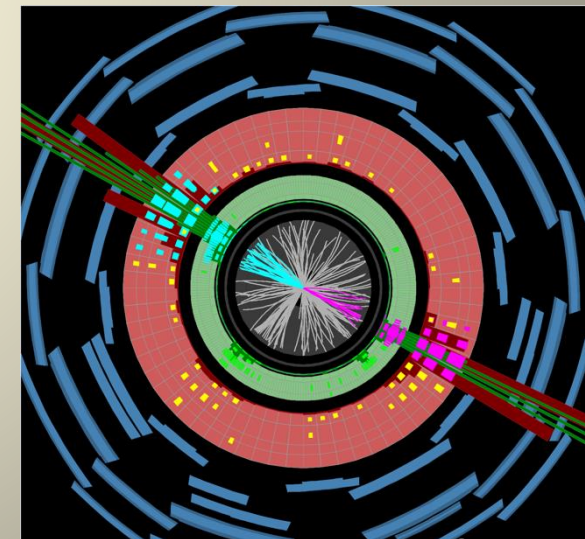
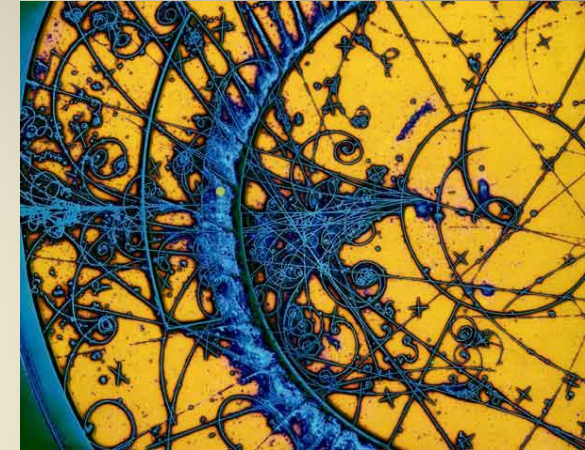


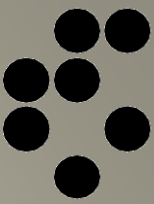
Detektor ATLAS



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 (pionov) znotraj stožca v smeri kvarka

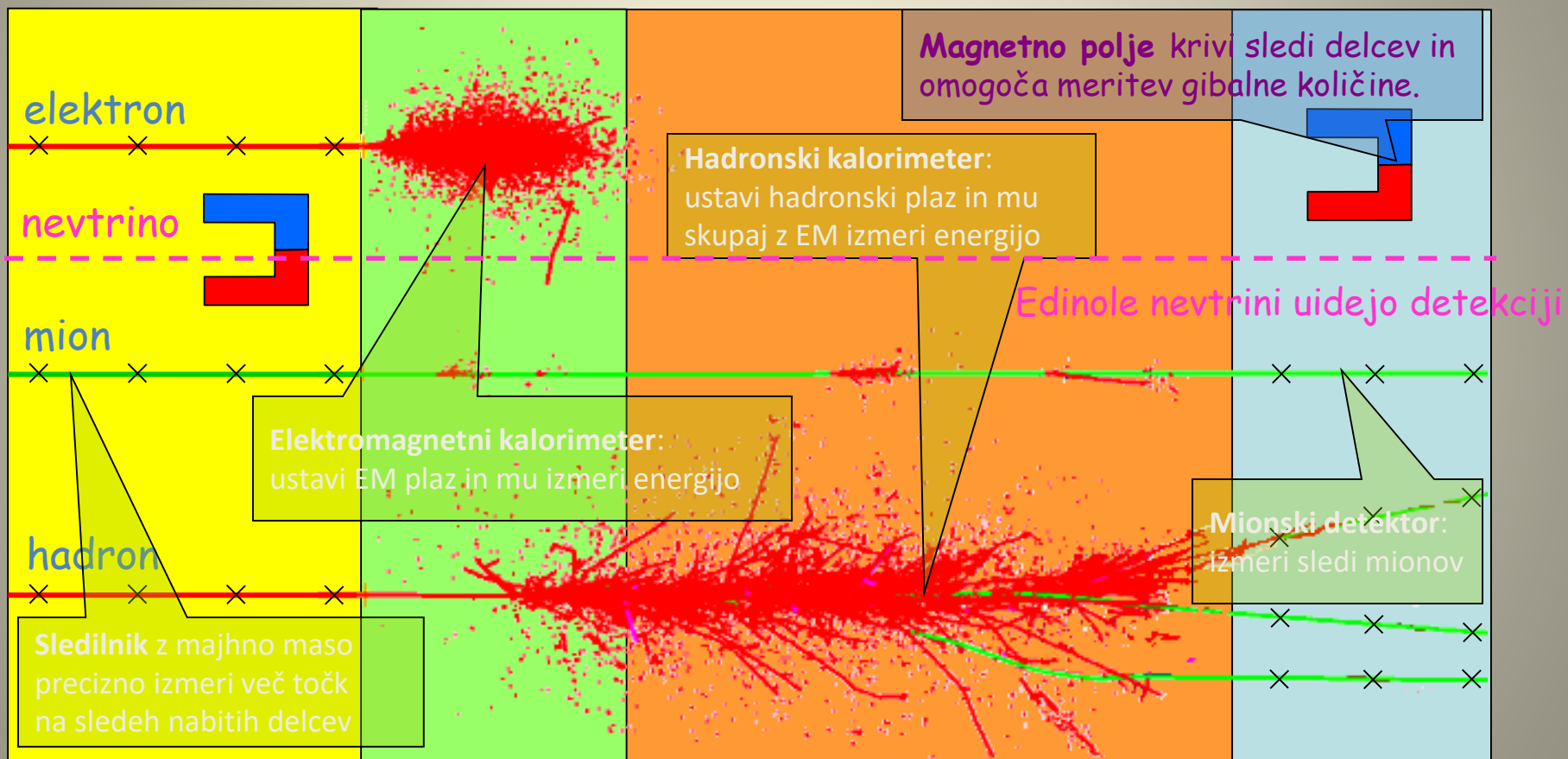




Kaj merimo ?

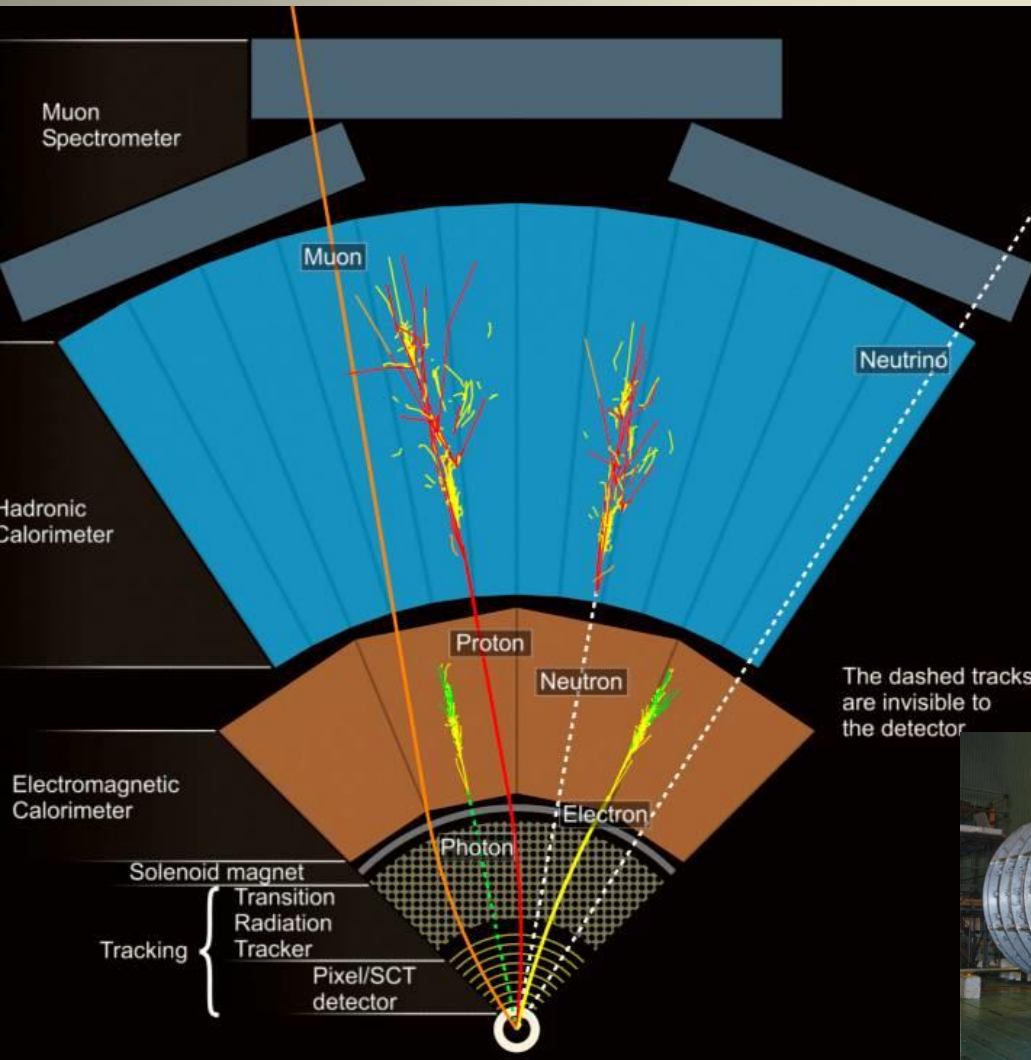
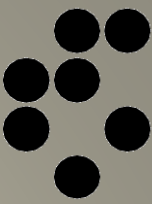
- Osnova zaznave: ionizacija nabitih delcev v snovi
 - Nevtralne (foton) najprej pretvorimo v nabite: $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
- Tipično delcem v detektorju izmerimo
 - Gibalno količino \vec{P} (sledilnik)
 - Ukrivljenost sledi v magnetnem polju: $P_T = eBr$
 - Tir vijačnica: $P = P_T / \cos \theta$
 - 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 LHC detektor za (skoraj) vse delce





Ureditev za trkalnik

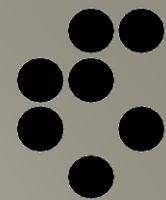


- Detektorji v plasteh obdajajo mesto trkov
- ATLAS uporablja dva sistema magnetov
 - SC tuljavo z 2 Tesla za detektor sledi delcev
 - Gigantski SC toroid s 4 T (max) za meritev mionov

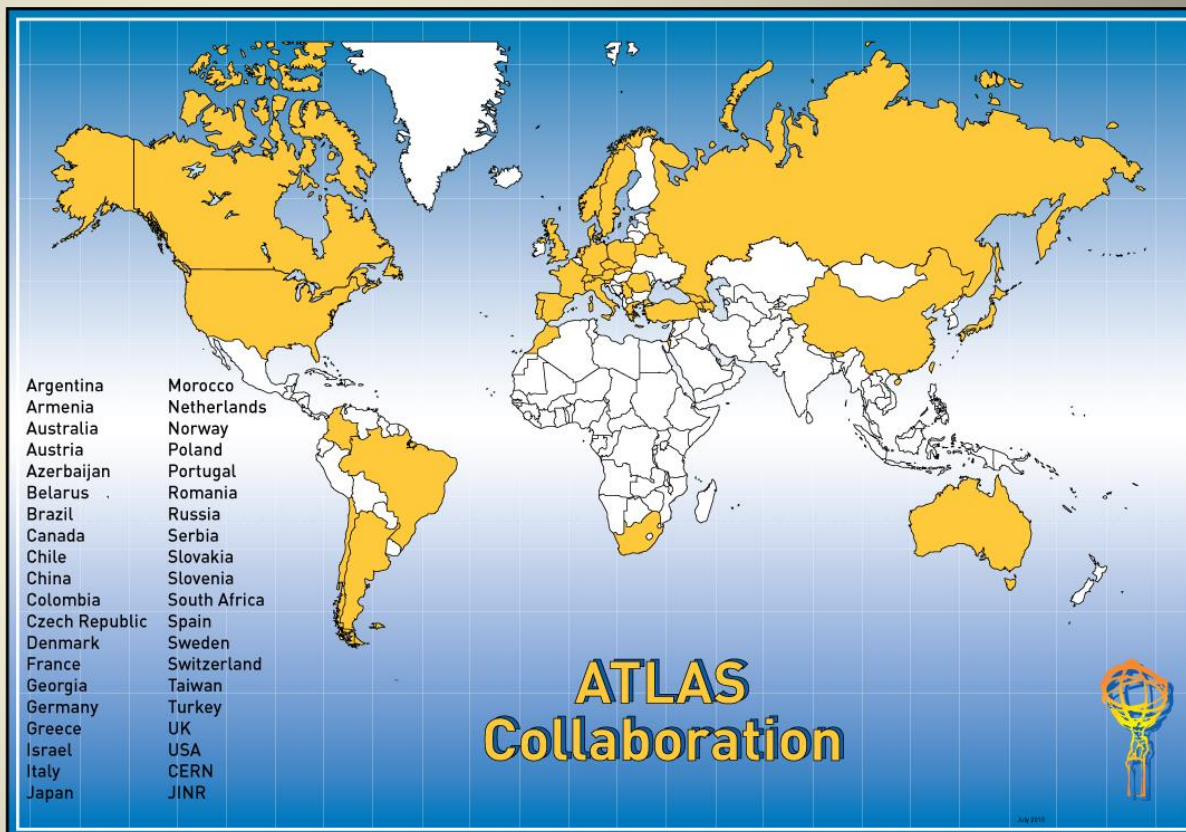




Kolaboracija ATLAS

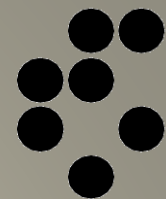


- Pri detektorju ATLAS sodeluje
 - ~3000 znanstvenikov
 - 1800 z doktoratom
 - 1200 doktorskih študentov
 - 178 institucij
 - 38 držav
- Od zasnove traja projekt že preko 25 let
- Investicija ~550 MCHF
- Slovenska skupina sodeluje pri projektu od junija 1996





Kolaboracija ATLAS



- Pri detektorju ATLAS sodeluje
 - ~3000 znanstvenikov
 - 1800 z doktoratom
 - 1200 doktorskih študentov
 - 178 institucij
 - 38 držav
- Od zasnov traja projekt že preko 25 let
- Investicija ~550 MCHF
- Slovenska skupina sodeluje pri projektu od junija 1996

