



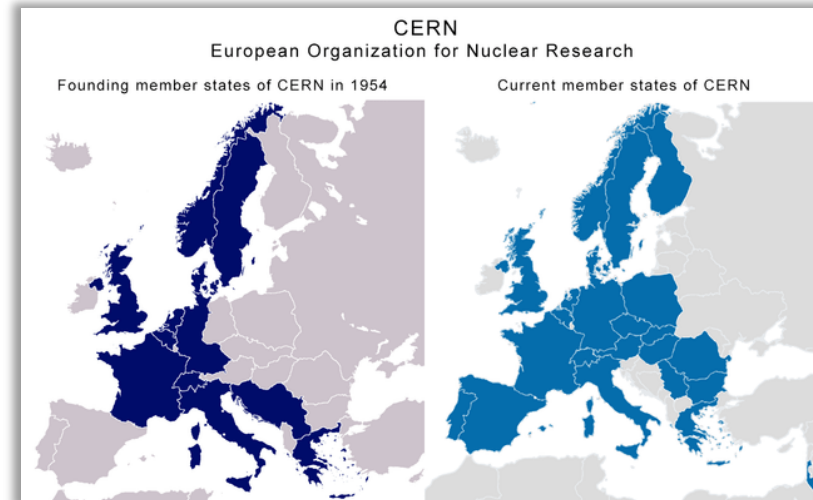
Pripreme za fazu Visoke Luminoznosti Velikog Sudarača Hadrona

Darko Brunet

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire - CERN



25 Zemalja članica i preko
100 associate članica



CERN je osnovan 1954. godine, i od tada postaje evropski centar naučnih i tehnoloških dostignuća.

Pored novih detektorskih tehnologija, otkrića elementarnih i kompozitnih čestica i mnogih drugih dostignuća u fizici, u CERN-u su nastali i :



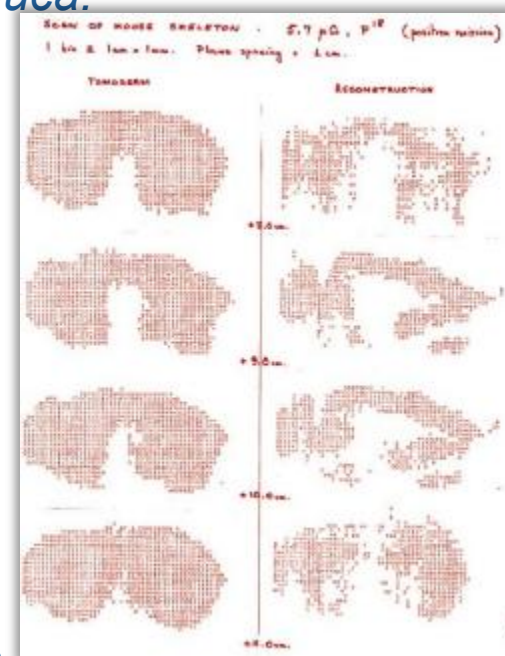
World Wide Web - Tim Bernes Lee



Prvi kapacitivni touch screen

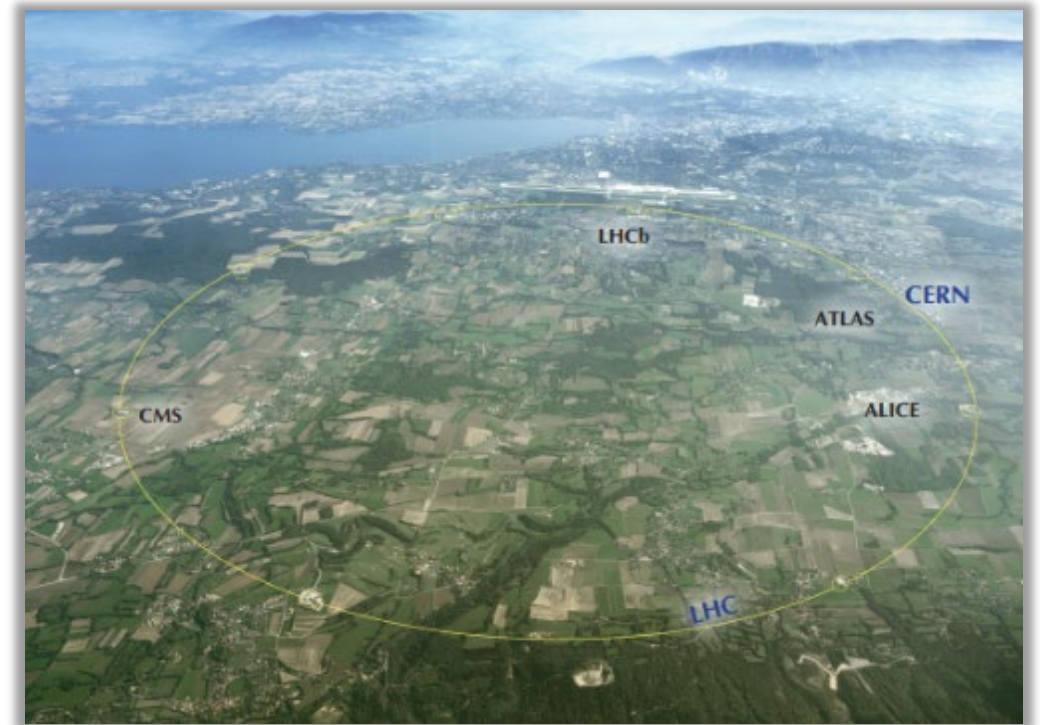


Prva PET scan slika



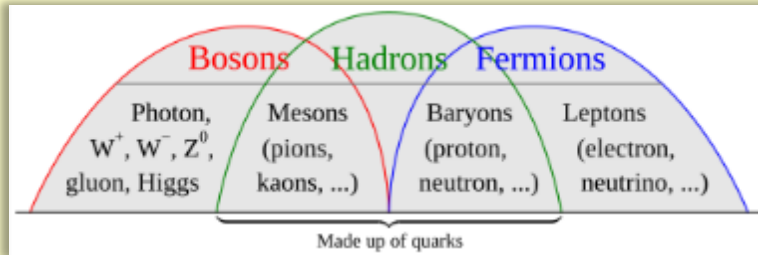
LHC (*Large Hadron Collider*)

- Trenutno najveći akceleratorski kompleks na svetu i najveći eksperiment u fizici visokih energija.
- To je kružni akcelerator obima od približno 27 km.



LHC (*Large Hadron Collider*)

- Trenutno najveći akceleratori kompleks na svetu i



- LHC ima dva režima operacije:
 - pp** sudari (uglavnom).
 - Pb Pb** sudari (1 godišnje).
- Jul 2025. Kratak eksperiment sa **pO**, **OO** i **NeNe** sudarima na 5.34 TeV-a po paru nukleona.

Standard Model of Elementary Particles					
three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
I			II		
mass charge spin	$\approx 2.19 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 172.17 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	0 0 1	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
II			III		
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	0 0 1
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
III			IV		
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau		
IV			V		
	$< 0.0 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ 1 1	W W boson
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		

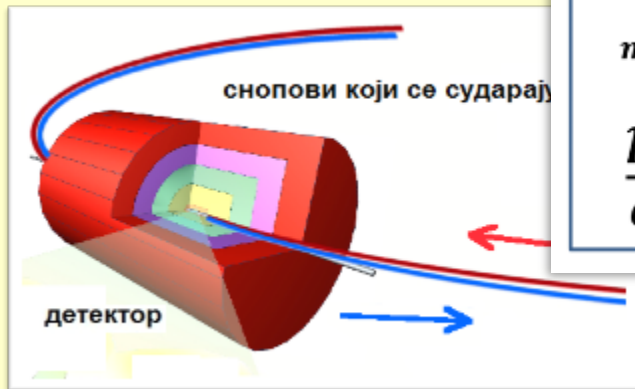


LHC (*Large Hadron Collider*)

- Trenutno najveći akceleratorski kompleks na svetu i

Prisetimo se da postoje dva tipa akceleratora:

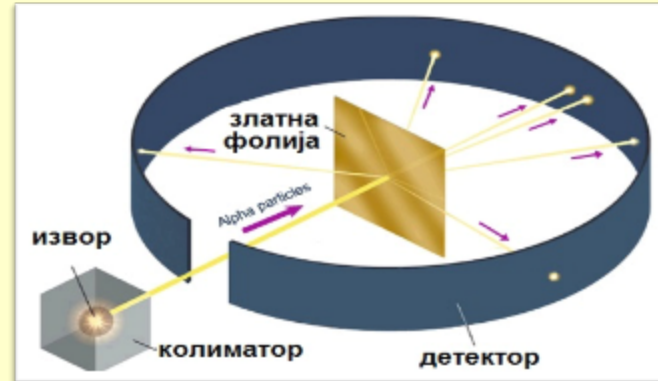
Sudarači:



$$m \frac{v^2}{r} = evB$$

$$\frac{p}{e} = Br$$

Target eksperimenti:



$$\begin{aligned} E_{CM} &= 2E = \\ &= 7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = \\ &= 14 \text{ TeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{CM} &= \sqrt{2m^2 + 2mE} = \\ &= \sqrt{2(0.938 \text{ GeV})^2 + 2(0.938 \text{ GeV})7000 \text{ GeV}} = \\ &= 114.6 \text{ GeV} \end{aligned}$$



Snop protona koji udara u protonsku metu.

LHC (*Large Hadron Collider*)

- Trenutno najveći akceleratorski kompleks na svetu i

Pored energije, glavni parametar svakog akceleratora je **luminoznost**.

$$L = \frac{N_1 N_2 f n_b}{A} \quad [1/cm^2 s]$$

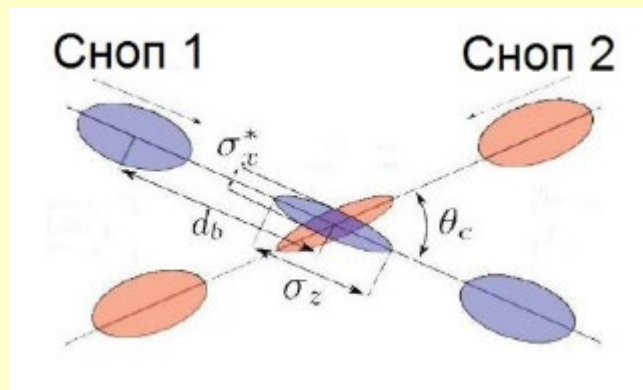
N_1, N_2 - број протона у банчу

f - фреквенција судара

n_b - број банчева

A - попречни пресек снопова

Za bilo koju interakciju, broj očekivanih događaja pri datoj luminoznosti je: $N = \sigma \cdot L$



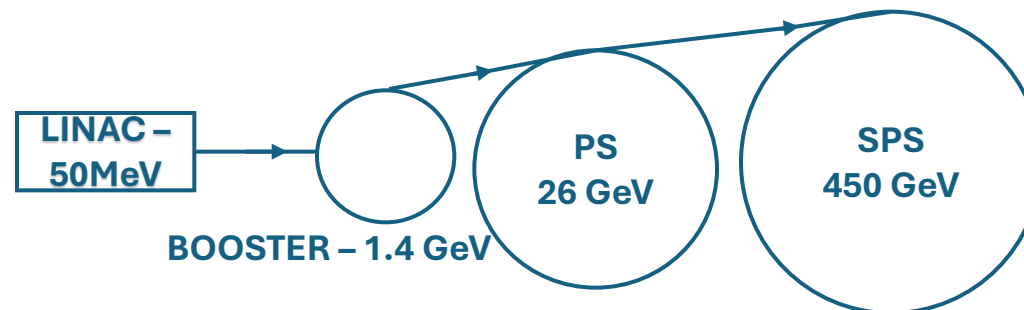
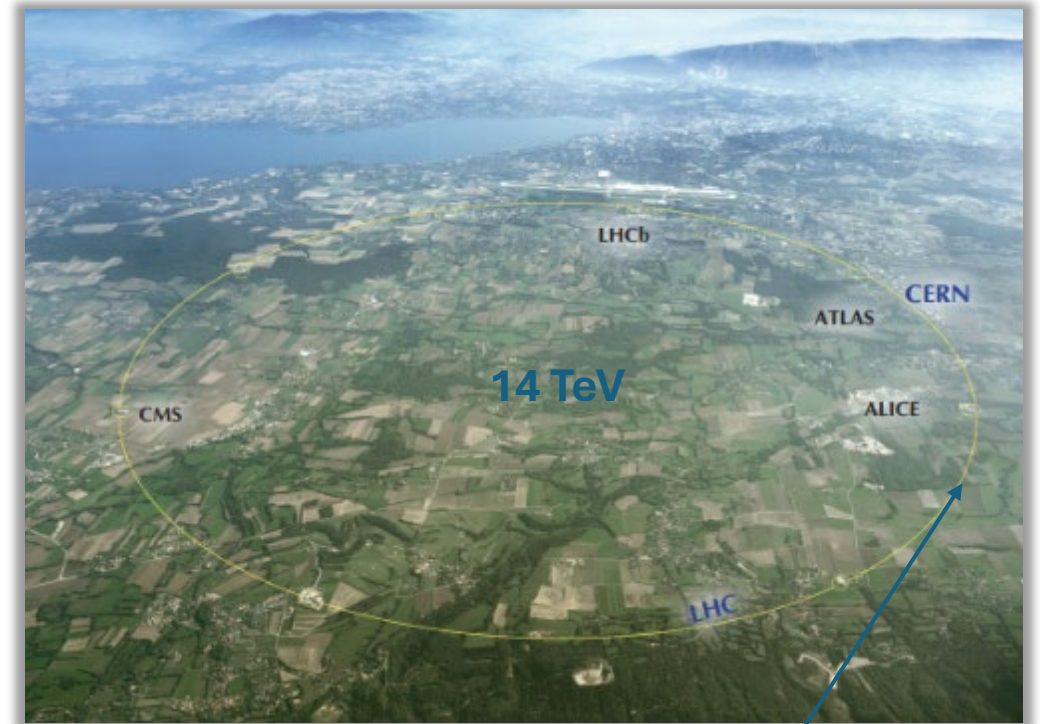
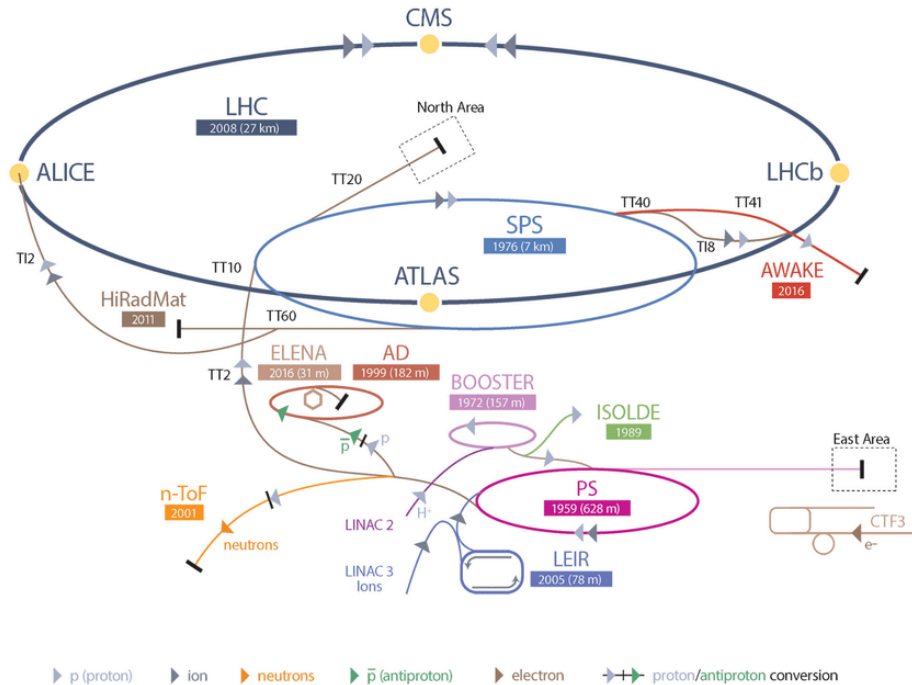
Za efikasnu detekciju retkih događaja potrebna je što veća luminoznost!

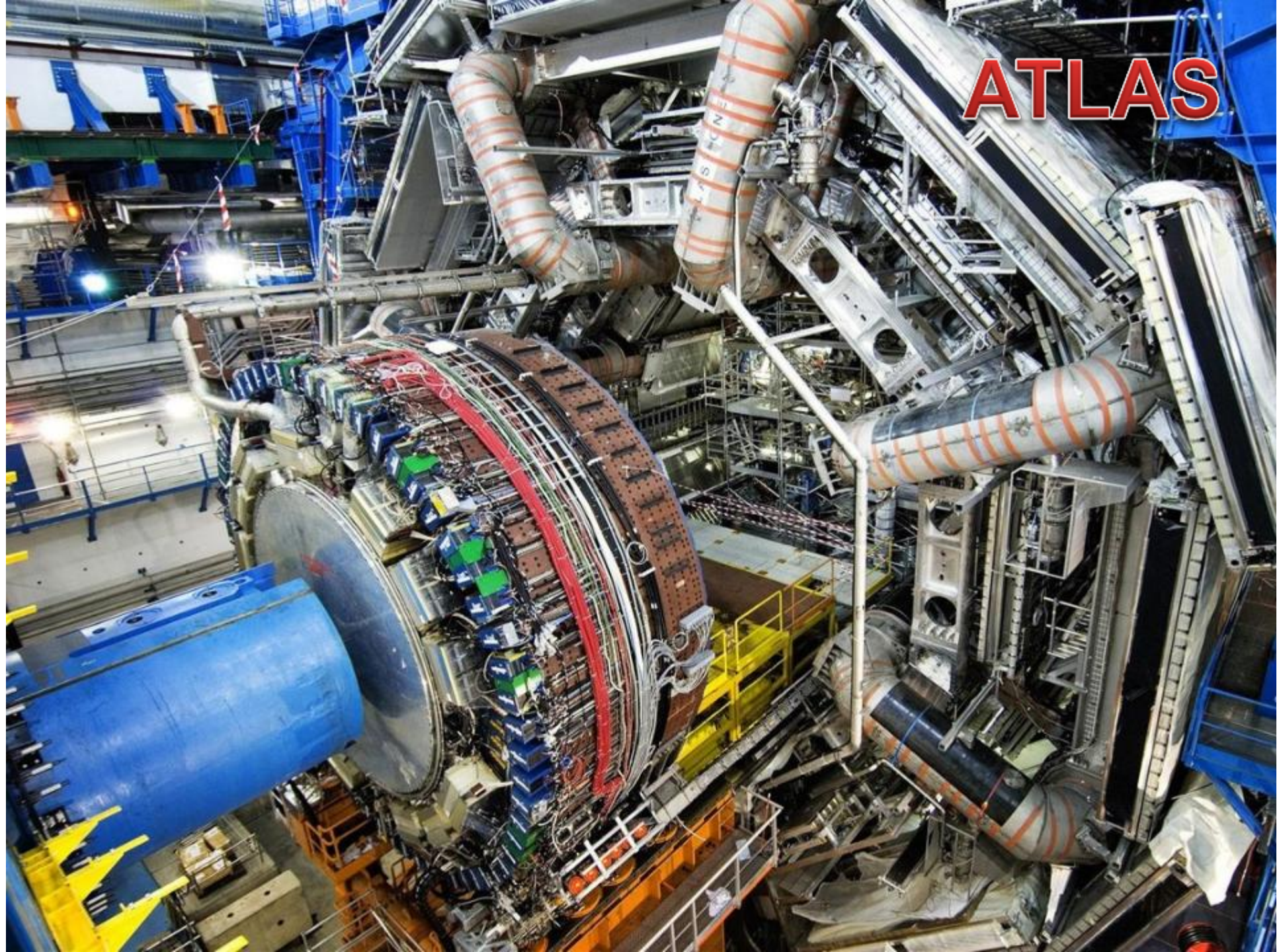


Dizajnirana luminoznost LHC-a je $L = 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$

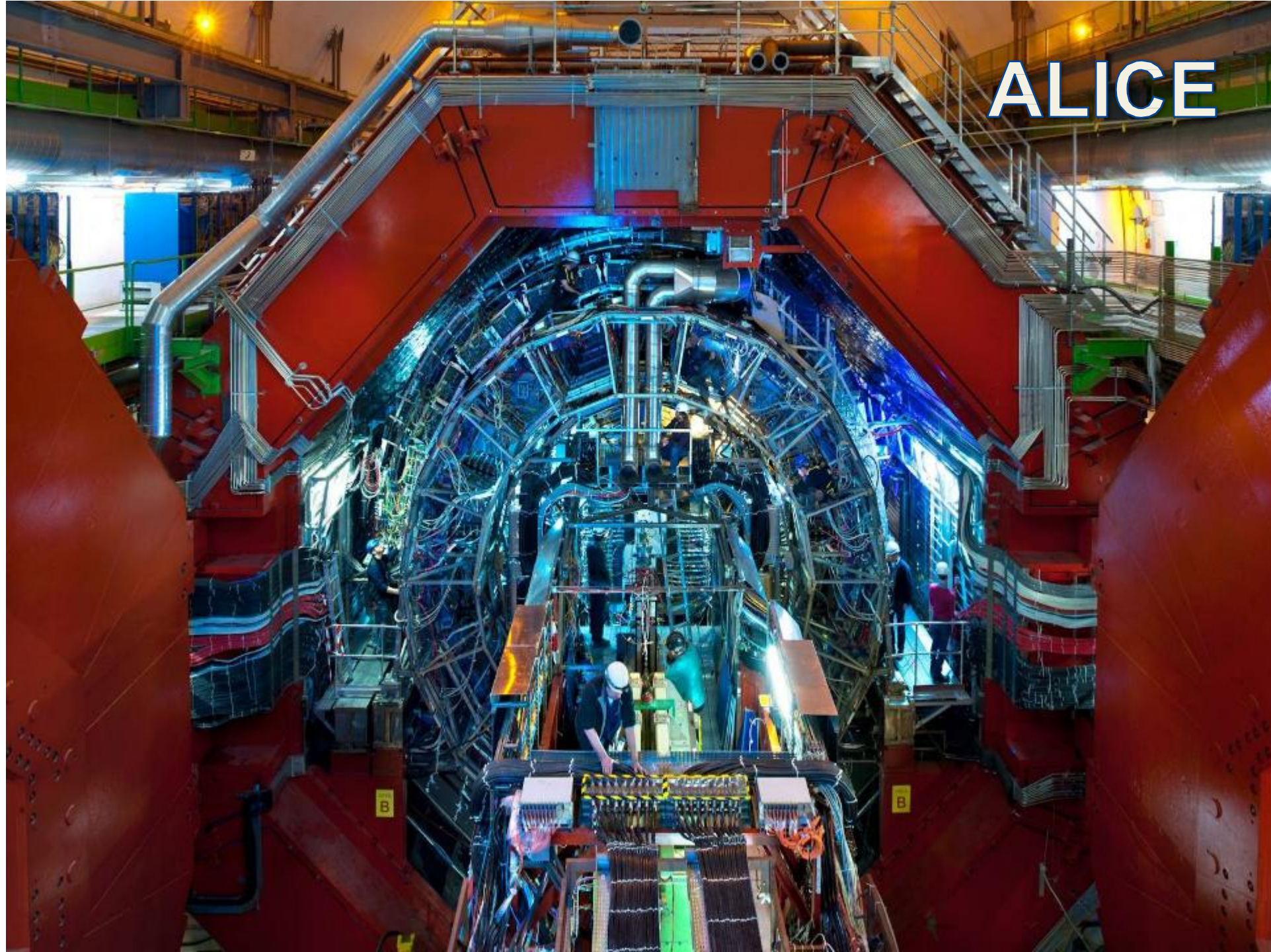
LHC (*Large Hadron Collider*)

- Trenutno najveći akceleratorski kompleks na svetu i najveći eksperiment u fizici visokih energija.
- To je kružni akcelerator obima od približno 27 km.
- U tačkama interakcije nalaze se 4 velika detektora: **ATLAS, ALICE, CMS i LHCb.**





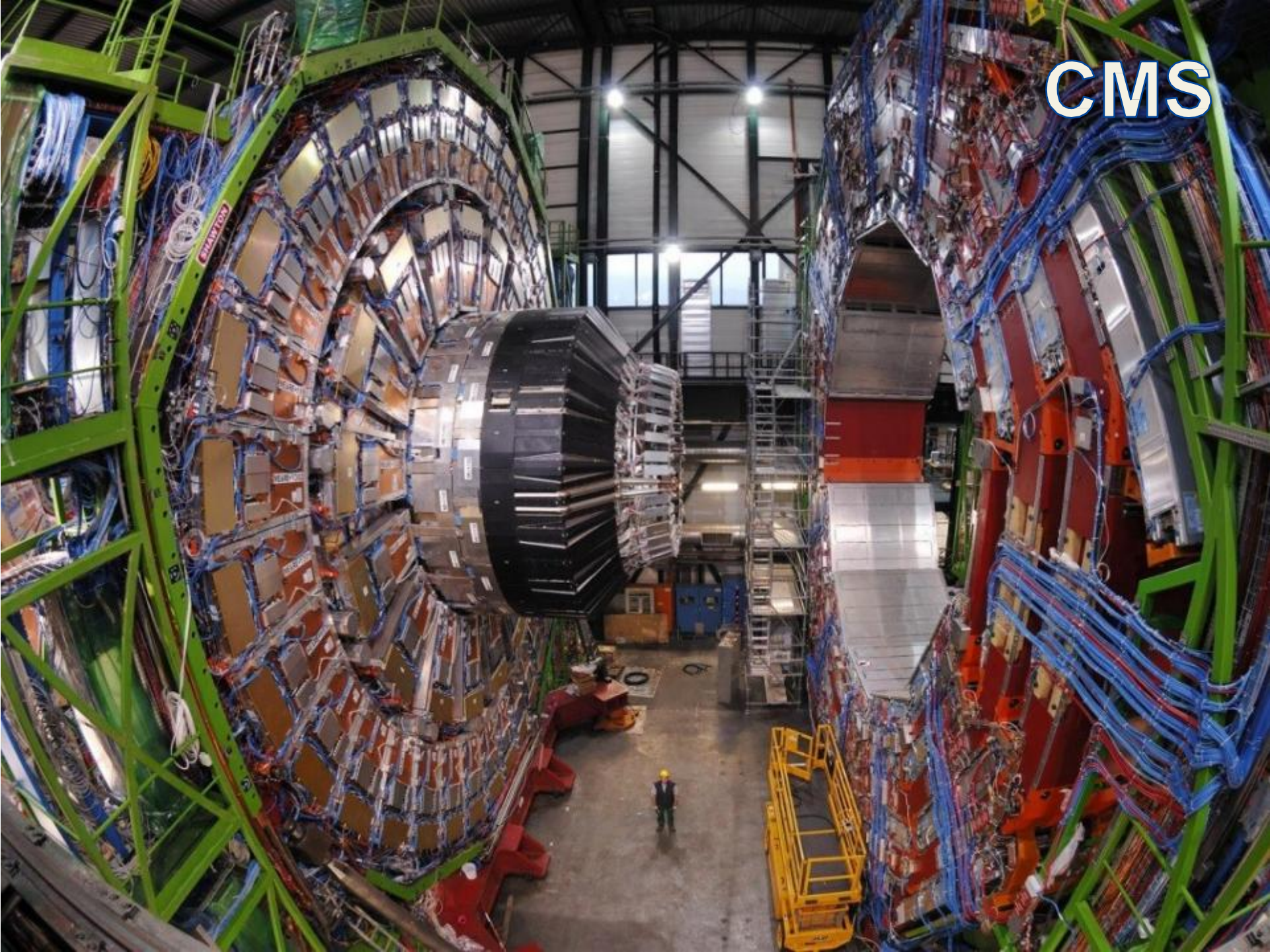
ALICE



LHCb

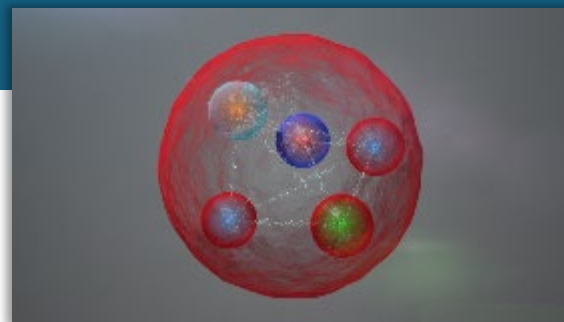


CMS



Dostignuća LHC-a

- Rekordne energije snopova protona.
- Otkriće **80 novih hadrona**.
- Otkriće nove klase čestica – **pentaquarks**.
- Najpreciznija merenja parametara Standardnog Modela.
- Detekcija prvog „*man-made*“ **neutrino** događaja (FASERv i *SND@LHC*, 2023.).
- Postavio ograničenja na novu, BSM (*Beyond Standard Model*) fiziku.
- Otkriće poslednje fundamentalne čestice predviđene Standardnim Modelom – **Higgsovog bozona** (ATLAS i CMS, 2012).

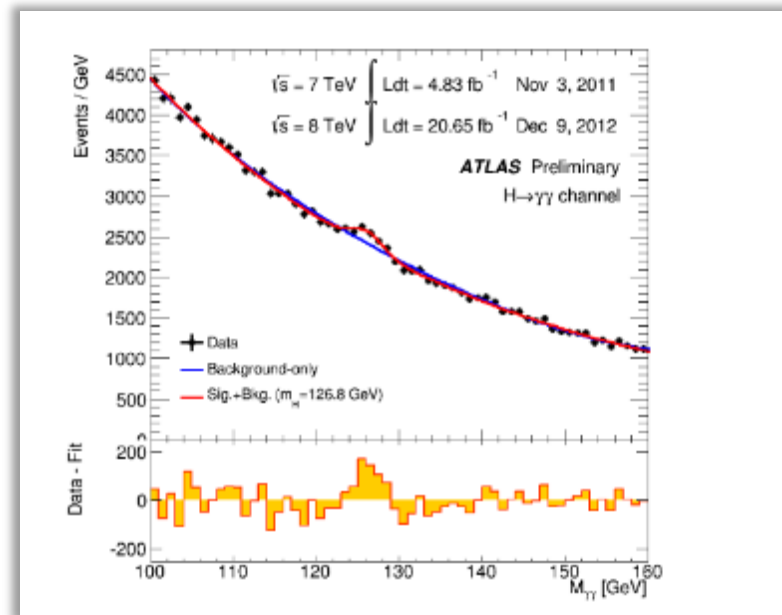
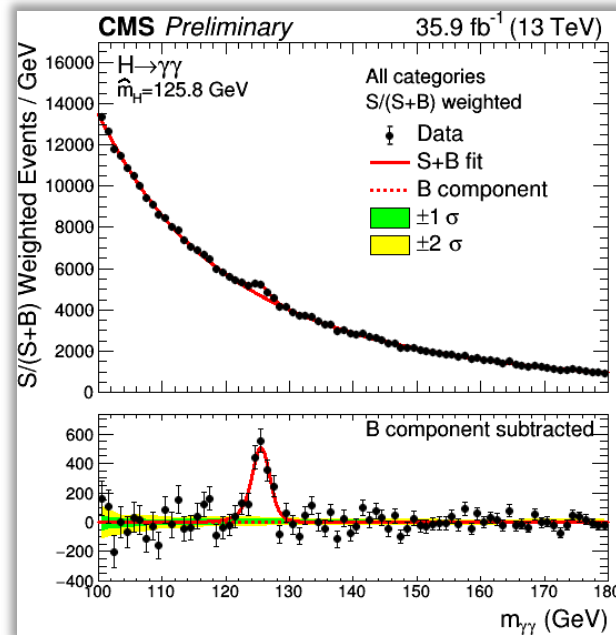


Counter	Experiment	Particle	Mass [MeV]	Quarks	Date
1.	ATLAS	$\Lambda_b(1301)^0$	1300 ± 10	$\bar{u}d\bar{s}$	21 Dec 2011
2.	CMS	$B_c(1041)^+$	$1045 \pm 1.5 \pm 0.5$	$\bar{u}cb$	20 Apr 2012
3.	LHCb	$\Lambda_b(1055)^0$	1054.4 ± 0.7	$\bar{u}db$	15 Nov 2012
4.	LHCb	$\Lambda_b(1012)^0$	1012.0 ± 0.7	$\bar{u}db$	12 Aug 2012
5.	LHCb	$D_s^*(2010)^{+*}$	2010 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
6.	LHCb	$D_s^*(2112)^0$	2112 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
7.	LHCb	$D_s^*(2112)^0$	2112 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
8.	LHCb	$D_s^*(2112)^0$	2112 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
9.	LHCb	$D_s^*(2112)^0$	2112 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
10.	LHCb	$D_s^*(2112)^0$	2112 ± 4	$c\bar{u}s$	17 Jul 2012
11.	CMS	$\chi_{c1}(3595)$	3595 ± 3.0	$c\bar{c}u$	15 Sep 2013
12.	ATLAS	$B_c(125)^+$	1252 ± 5	$\bar{u}cb$	03 Jul 2014
13.	LHCb	$\Omega_c(3055)^0$	3055 ± 17	ccc	20 Jul 2014

20.	LHCb	$P_{cs}(4450)^0$	4449.8 ± 3.0	$c\bar{c}uud$	13 Jul 2015
21.	LHCb	$P_{cs}(4380)^0$	4380 ± 30	$c\bar{c}uud$	13 Jul 2015

Pre $\approx$ 2 nedelje!

79.	CMS	$T_{cc}(7100)$	7170 ± 16	cc	02 Feb 2020
80.	LHCb	Ξ_{cc}^{++}	$3620.0 \pm 2.1 \pm 1.0$	ccu	15 Mar 2020



Mi ćemo se danas fokusirati na CMS...

- Detektor opšte svrhe sa „onion-like“ strukturom.
- Svaki sloj je specijalizovan za detekciju određenih čestica.

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 1\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

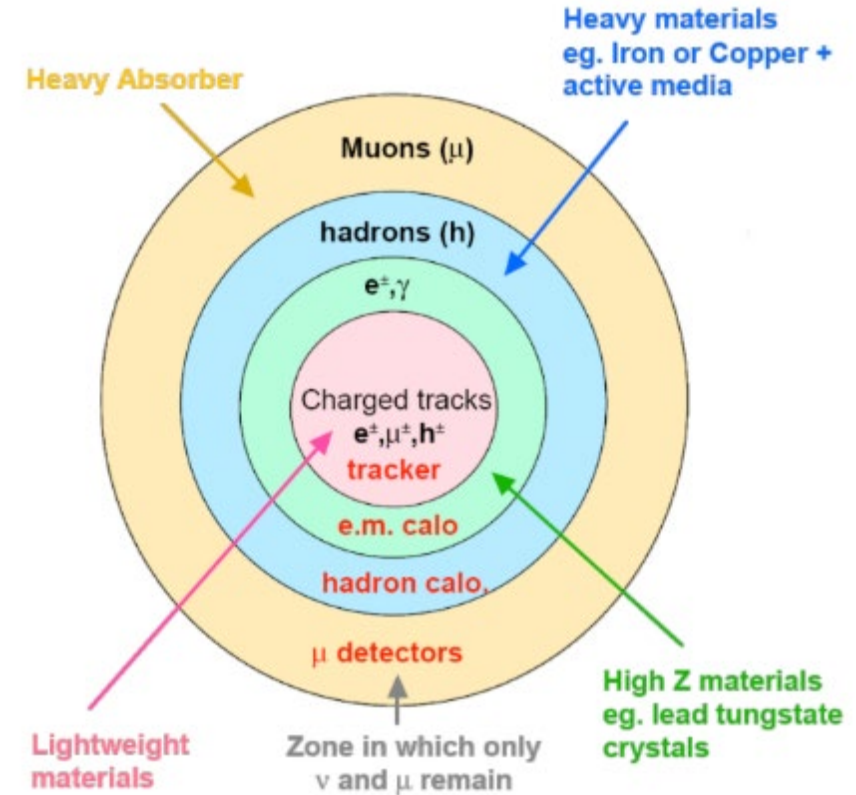
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

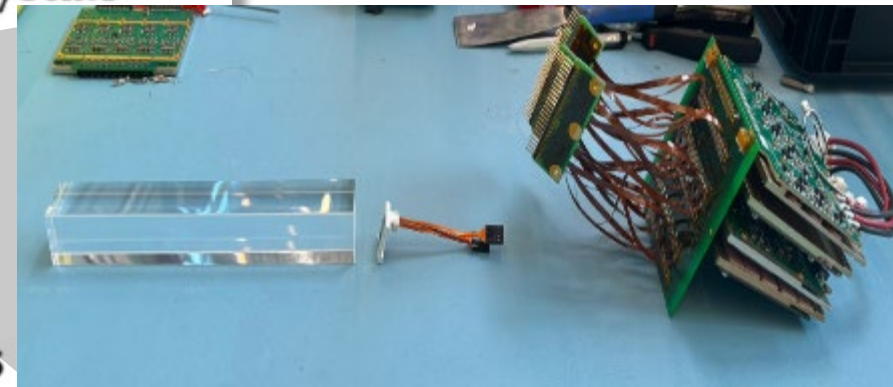
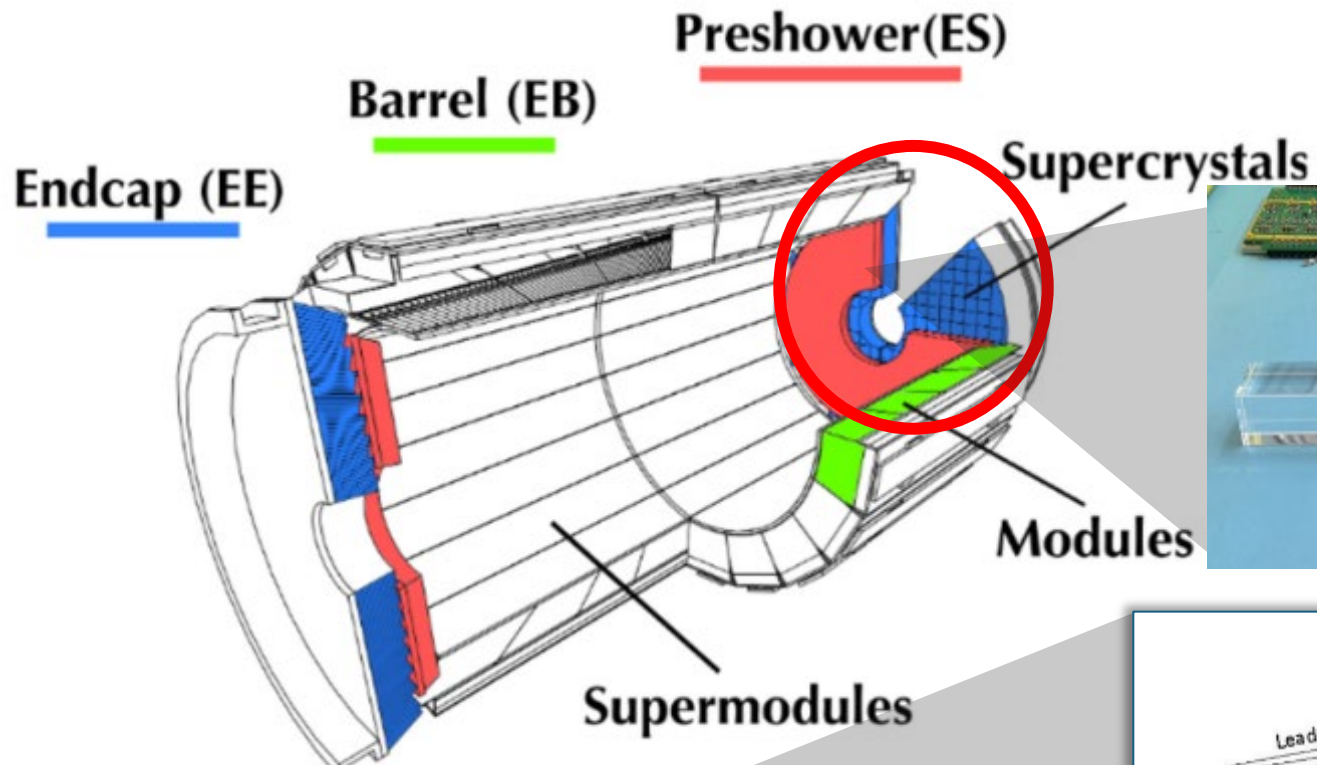
HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



- Elektroni i fotoni interaguju sa materijom $\sim Z$.
- Verovatnoća za interakcije razmenom gluona su $\sim A$.
- Mionski ***bremsthralung*** je potisnut zbog znatno veće mase u odnosu na elektrone, te su dominantni gubici jonizacioni.

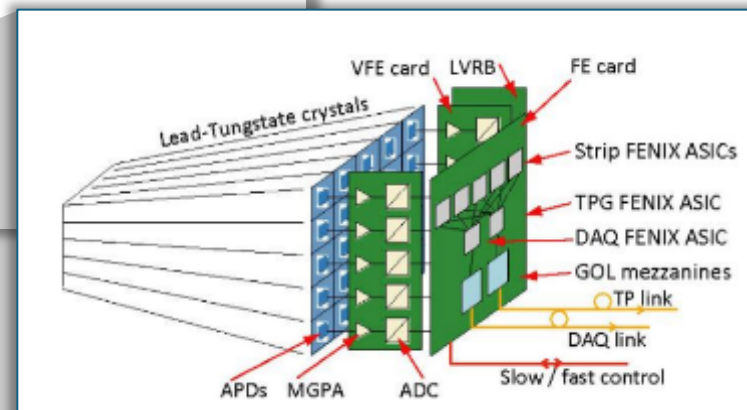
CMS ECAL

- CMS ECAL je homogeni kalorimetar koji se sastoji u potpunosti od scintilacionih kristala PbWO₄.
- Optimizovan je za detekciju elektrona i fotona sa odličnom rezolucijom ($<0.5\%$ za $E > 50$ GeV).
- ECAL je podeljen u tri pod-strukture: Barrel (cilindar), Endcaps (polu-diskovi) i Pre-shower (iza EE).



62100 PbWO₄ kristala. PbWO₄ veoma brzo emituje scintilacije. Već 25ns nakon ekscitacije on prestaje sa scintilacijama. Ova brzina se poklapa sa vremenom ukrštanja paketa protona u LHC-u.

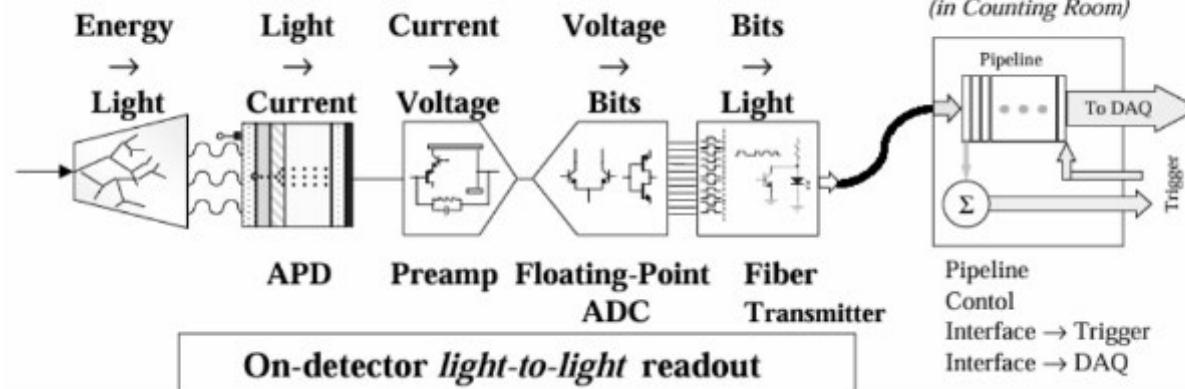
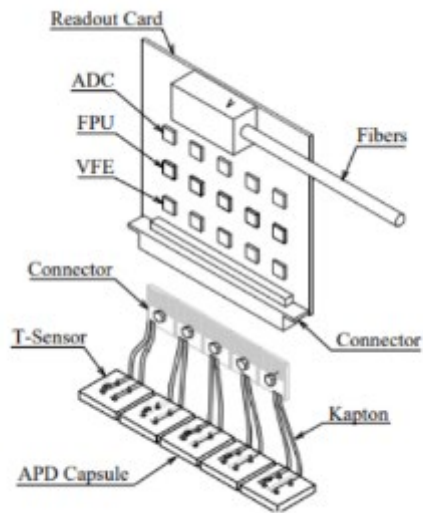
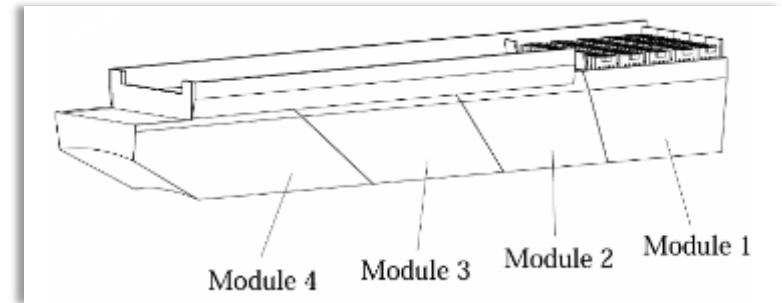
Elektronika za očitavanje je grupisana po „tornjevima za očitavanje“ od kojih se svaki sastoji od 5 Very Front End kartica, 1 kartice za digitalni interfejs- Front End kartica i 1 regulatora niskog napona – Low Voltage Regulator.



Ovi kristali su povezani na set lavinskih fotodioda koje su dalje vezane sa elektronikom.

CMS ECAL Barrel

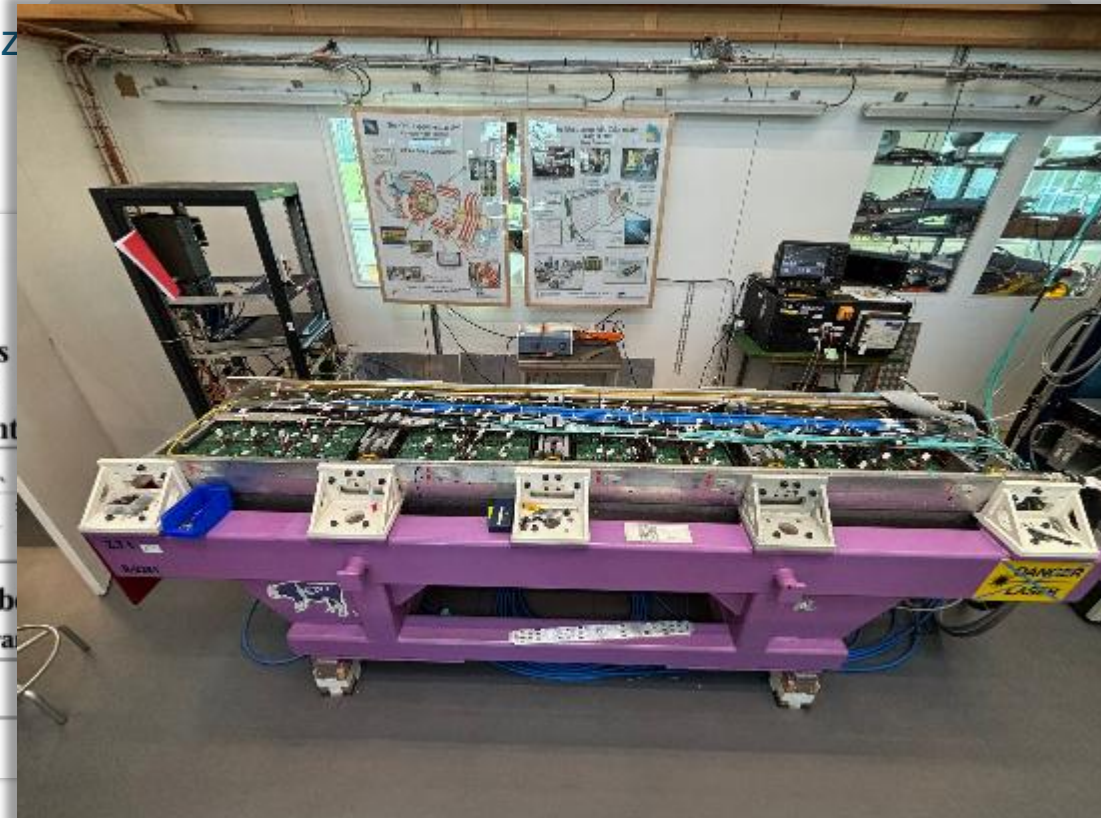
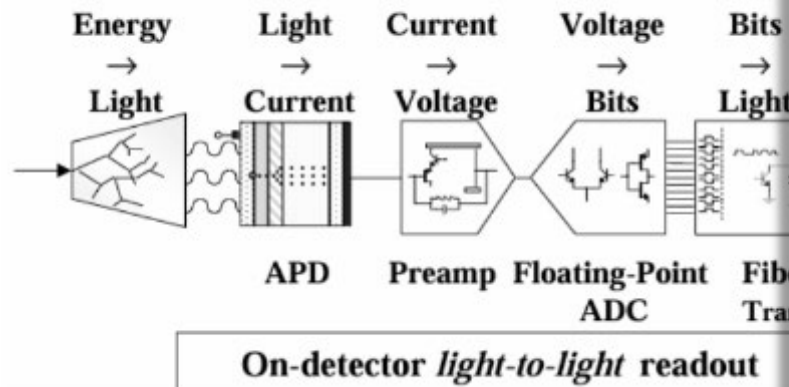
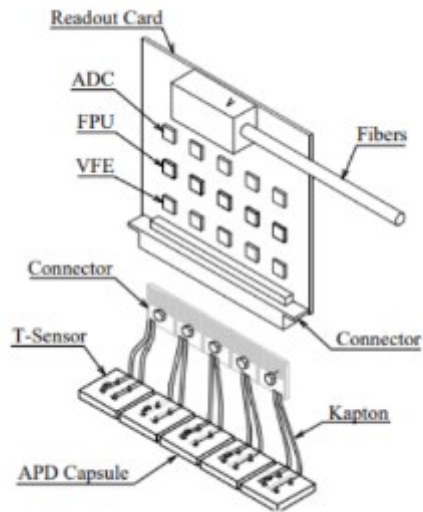
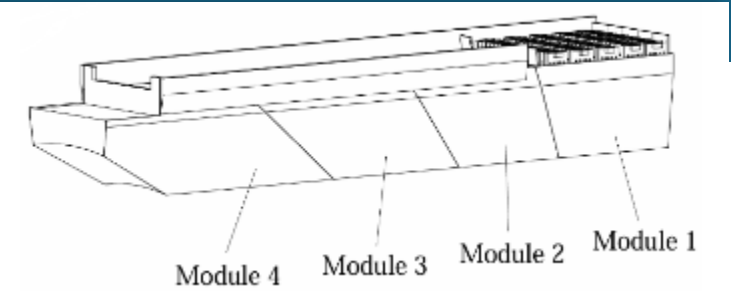
- CMS ECAL Barrel (EB) se sastoji od **36 supermodula** koji formiraju cilindričnu strukturu.
- Svaki supermodul se sastoji od 4 modula
- EB je dizajniran da pokriva opseg pseudorapidnosti od $0.087 < |\eta| < 1.479$ što odgovara uglovima od $\sim 45^\circ$ - $\sim 135^\circ$.
- EB je podeljen na EB+ i EB- delove (pozitivne i negativne vrednosti z – ose u odnosu na tačku interakcije).



- VFE predpojačavači konvertuju struju u čist naponski signal.
- ADC uzima oblikovani impuls i konvertuje ga u digitalni signal. Svaki 25ns.
- Fiber transmitter-i uzimaju digitalizovani signal svakog kanala i šalju ga u vidu svetlosti preko optičkih predajnika u odbrojnu sobu.

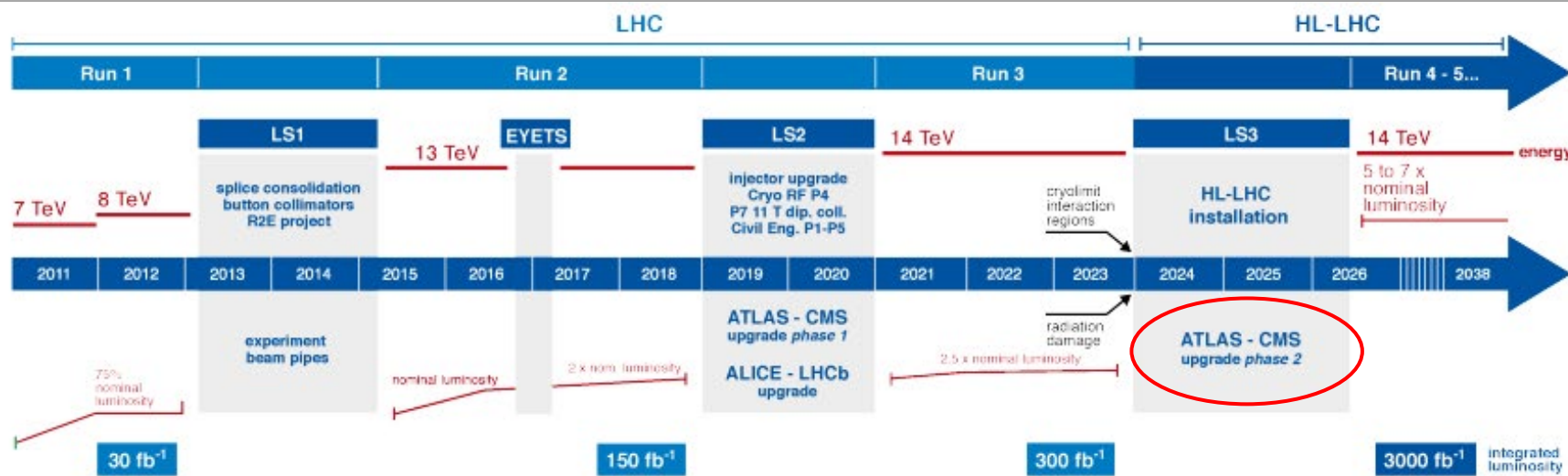
CMS ECAL Barrel

- CMS ECAL Barrel (EB) se sastoji od **36 supermodula** koji formiraju cilindričnu strukturu.
- Svaki supermodul se sastoji od 4 modula
- EB je dizajniran da pokriva opseg pseudorapidnosti od $0.087 < |\eta| < 1.479$ što odgovara uglovima od $\sim 45^\circ$ - $\sim 135^\circ$.
- EB je podeljen na EB+ i EB- delove (pozitivne i negativne vrednosti z odnosu na tačku interakcije).



Motivacija za HL-LHC

- Higsov bozon predstavlja odličan teorijski „portal“ za ispitivanje validnosti različitih modela.
- Međutim, njegove osobine još uvek nisu dovoljno precizno ispitane. Potrebna je mnogo veća statistika detektovanih Higgs događaja.
- Takođe, nagoveštaji nove fizike mogu se uočiti ukoliko su primećene razlike između izmerenih i predviđenih parametara interakcije Higgsa sa drugim česticama, i samim sobom.
- Pored Higgsa, precizno merenje karakteristika drugih čestica (poput W bozona) neophodna su za postavljanje ograničenja na odstupanja od Standardnog Modela.
- Izgradnja sledećeg velikog akceleratora nije predviđena (bar ne da bude završena) narednih 20 godina.
- HL-LHC predstavlja najbolje rešenje za potencijalno otkrivanje nove fizike.



Trenutno smo u fazi 2 upgrade-a ka HL-LHC eri.

ATLAS i CMS grupe iz Repub. Srbije aktivno učestvuju u ovoj fazi.

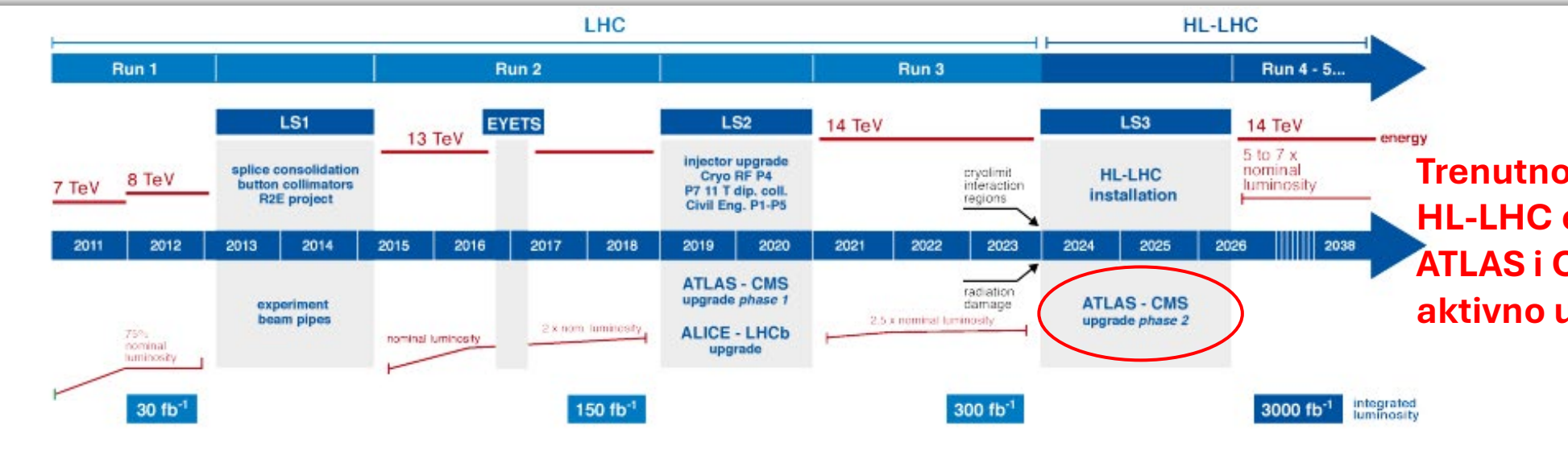
Npr. Kolege iz IPB ATLAS grupe uključene su na upgrade-u B-jet trigger-a.

CMS grupa sa FFBG uključena je na upgrade-u ECAL-a.

Ciljevi za HL-LHC CMS ECAL EB

- Tokom 12 godina operacije potrebno je dostaviti 3000-4000 fb^{-1} .
- 140-200 interakcija pri ukrštanju bančeva, dakle svakih 25ns.
- Projektovana maksimalna luminoznost $5 \cdot 10^{-34} cm^{-2} s^{-1}$.
- CMS Phase 2 ECAL će operisati na 9°C.
- Detektorski sistem će biti izložen većom količinom doze $\sim 2MGy$ nakon 3 ab^{-1} .
- Posledica toga su povećanje efekata starenja detektora – povećanje tamnih struja fotodetektora i gubitak transparentnosti kristala PbWO4.

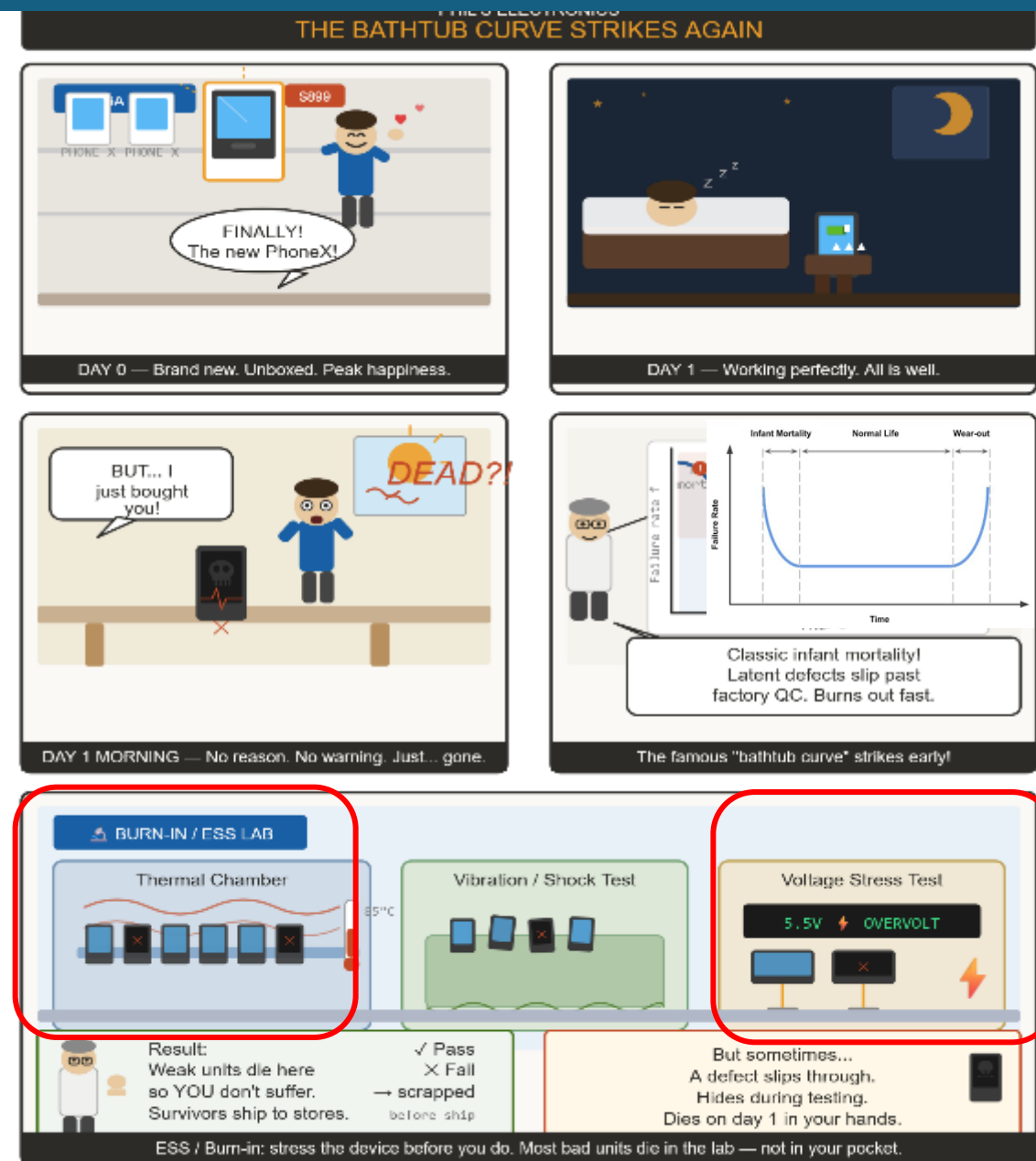
	Peak lumi. $\times 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$	Peak pileup	Lumi/year fb^{-1}
2017	1.7	50	40
HL-LHC baseline	5.0	140	250
HL-LHC ultimate	7.5	200	320



Trenutno smo u fazi 2 upgrade-a ka HL-LHC eri.
ATLAS i CMS grupe iz Repub. Srbije aktivno učestvuju u ovoj fazi.

CMS ECAL Barrel upgrade – testiranje VFE i LVR kartica

- Nove VFE i LVR kartice moraju da budu dizajnirane tako odgovaraju povećanim stopama od L1 trigger-a.
- Ukoliko se desi da neki od kanala otkazu tokom HL-LHC, ekstrakcija modula u kom se kanal nalazi bi bio zahtevan posao od **nekoliko meseci** i ona nije predviđena tokom perioda operacije ~ **20god.**
- Postavljen je cilj od $<0.5\%$ otkazujućih kanala u unapređenom ECAL-u.
- Između ostalih, jedan od neophodnih testova koji se moraju obaviti je **Environmental Stress Screening(ESS)** ili **Burn-in**.
- Prilikom proizvodnje novih VFE i LVR kartica, moguće je da se proizvedu sa određenim **defektima**, uprkos testiranjima proizvođača.
- ESS je način da osiguramo da ovih defekata nema. **Kako?**
- Snimamo zavisnost stope otkaza sa vremenom – kartice sa defektima će otkazati u prvih 3 meseca (većina njih). Naš cilj je da ih veštački ostarimo **20 Godina** kako bi snimili čitav spektar ponašanja datog tipa kartica.
- Zatim ćemo novi set kartica, istog tipa veštački ostariti na **1 godinu** tako da sve kartice prođu kroz „infant mortality rate“ fazu, a one koje prežive instaliraćemo u ECAL.

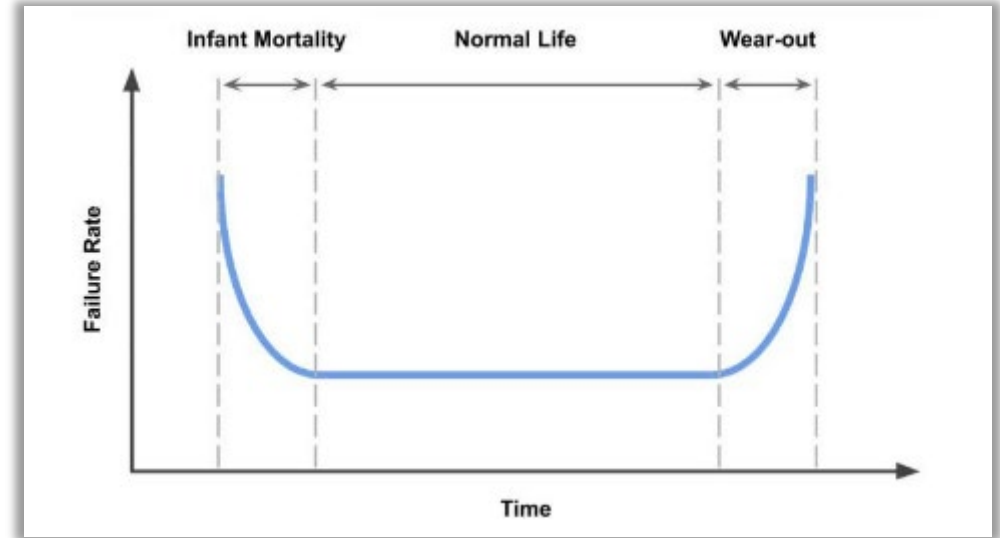


Bathtub curve: Infant mortality → Useful life → Wear-out. ESS = Environmental Stress Screening.

"It's not your fault — it's just physics." — every engineer, ever

CMS ECAL Barrel upgrade – testiranje VFE i LVR kartica

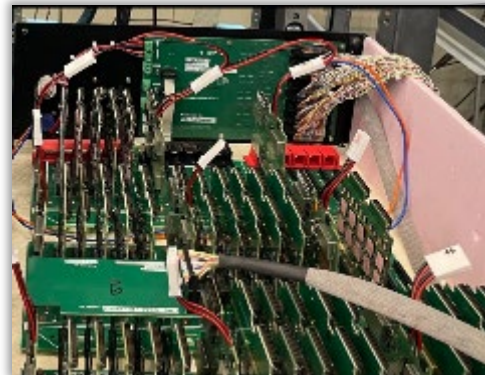
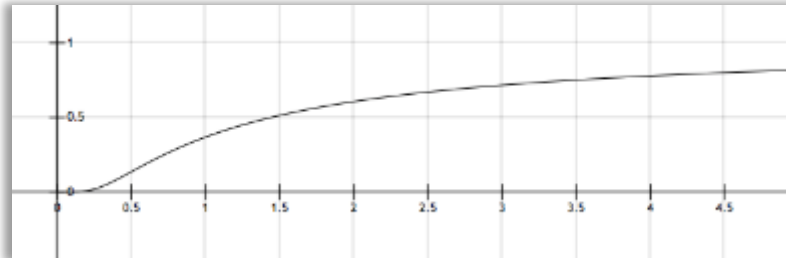
- Očekuju se tri faze:
1° tzv. „**Infant mortality rate**“ otkazivanje kartica usled defekata u ranim fazama života. Može se uočiti pad stope otkaza.
2° **faza korisnog života** sa približno konstantom, minimalnom stopom otkazivanja.
3° „**wear-out**“ faza gde stopa otkaza ponovo raste.



- Termalnim cikliranjem kartica između ambijentalne temperature i $\sim 70^{\circ}\text{C}$ moguće je postići ~ 1 god. starenja nakon 5-6 dana testiranja.
- Ovo je bazirano na principima ubrzanog starenja materijala i **Arrhenusovoj** jednačini:

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{k_B T}}$$

- Stopa starenja k procenjuje se relativno u odnosu na $T_{\text{operation}} = 9^{\circ}\text{C}$



CMS ECAL Barrel upgrade – ESS arhitekutra sistema

- Arhitekturu sistema sačinjavaju 3 police, na kojoj su postavljene 4 kutije u kojima su instalirane matične ploče preko kojih će se vršiti termalno cikliranje povezanih VFE i LVR kartica.
- Kartice su povezane u tornjeve za očitavanje (*Readout Tower – RT*). Svaki RT se sastoji od 5 VFE i 1 LVR kartice.
- Instalirano je 9 RT po kutiji, što korespondira mogućnosti za **istovremeno cikliranje ukupno 540 VFE kartica i 108 LVR kartica**.
- Na svaki RT povezana su 2 temperaturska senzora, 1 na LVR karticu i 1 na VFE karticu.
- Uređaji koji su upotrebljavani u sistemu:

TDK Lambda
Programabilni izvor
napajanja

- Može da napaja 2 kutije.



Keithley DAQ -
prikuplja očitavanja
temperatura za
čitavu policu



Sistem od 6 *slave* i 3 *master* ventilatora po kutiji.

- Master ventilatori podešavaju brzinu svih ostalih na 1 matičnoj ploči pomoću STM32 Arm Cortex®-M mikro kontrolera.
- Uspostavljaju homogenu raspodelu temperature u kutiji.



PLC bazirani sigurnosni sistem

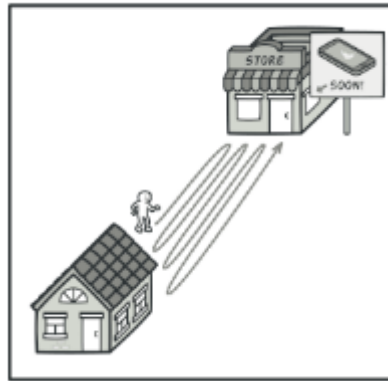


i drugi...

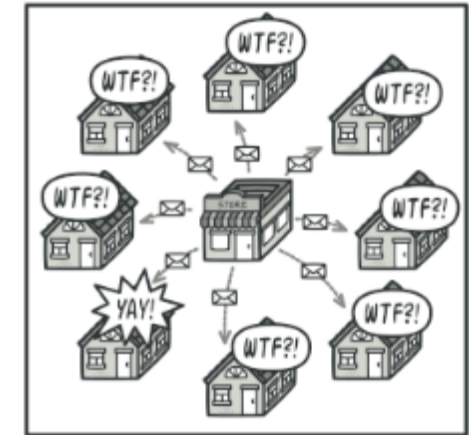
CMS ECAL Barrel upgrade – ESS softver

- ESS softver je dizajniran tako da bude visoko modularan i konfigurabilan, baziran na public Python bibliotekama.
- `pyVisa` se koristi za komunikaciju sa Keithley DAQ6510 sistemom, `pySerial` za komunikaciju sa TDK Lambda uređajima za napajanje, `python-can` za komunikaciju sa mikrokontrolerima, `python-snap7` za komunikaciju sa PLC sistemom.
- Druge biblioteke poput `pyQt`, `RPyC`, `PyMySQL` korištene su za implementaciju ostalih funkcionalnosti ESS sistema, poput GUI-a, Servisom za bazu podataka, i kontrolu uređaja na daljinu.
- Čitav framework baziran je na **posmatrač-observabla pristupu**. Šta to znači?
- Zamislite da hoćete da vidite da li je vaša lokalna prodavnica dobila novi iPhone:

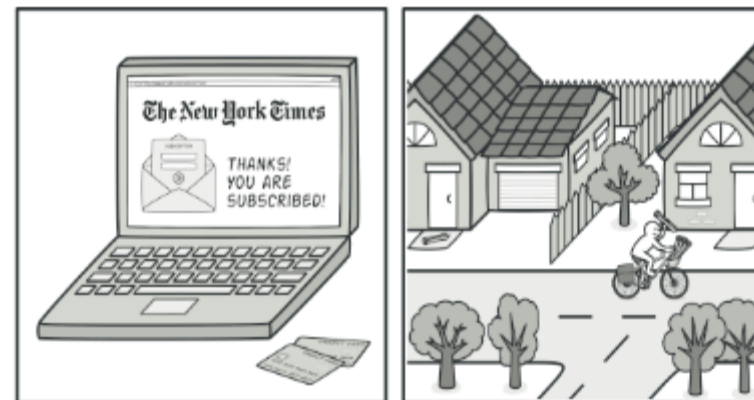
Šanse su velike da ćete napraviti nekoliko bespotrebnih obilazaka prodavnice pre nego što naletite na novi iPhone...



Sa druge strane, prodavnica bi mogla da pošalje poštu svim mušterijama i tako javi da je dobila uređaj. Međutim, to može izazvati nepotrebnu frustraciju kod ljudi koje novi iPhone ne zanima...



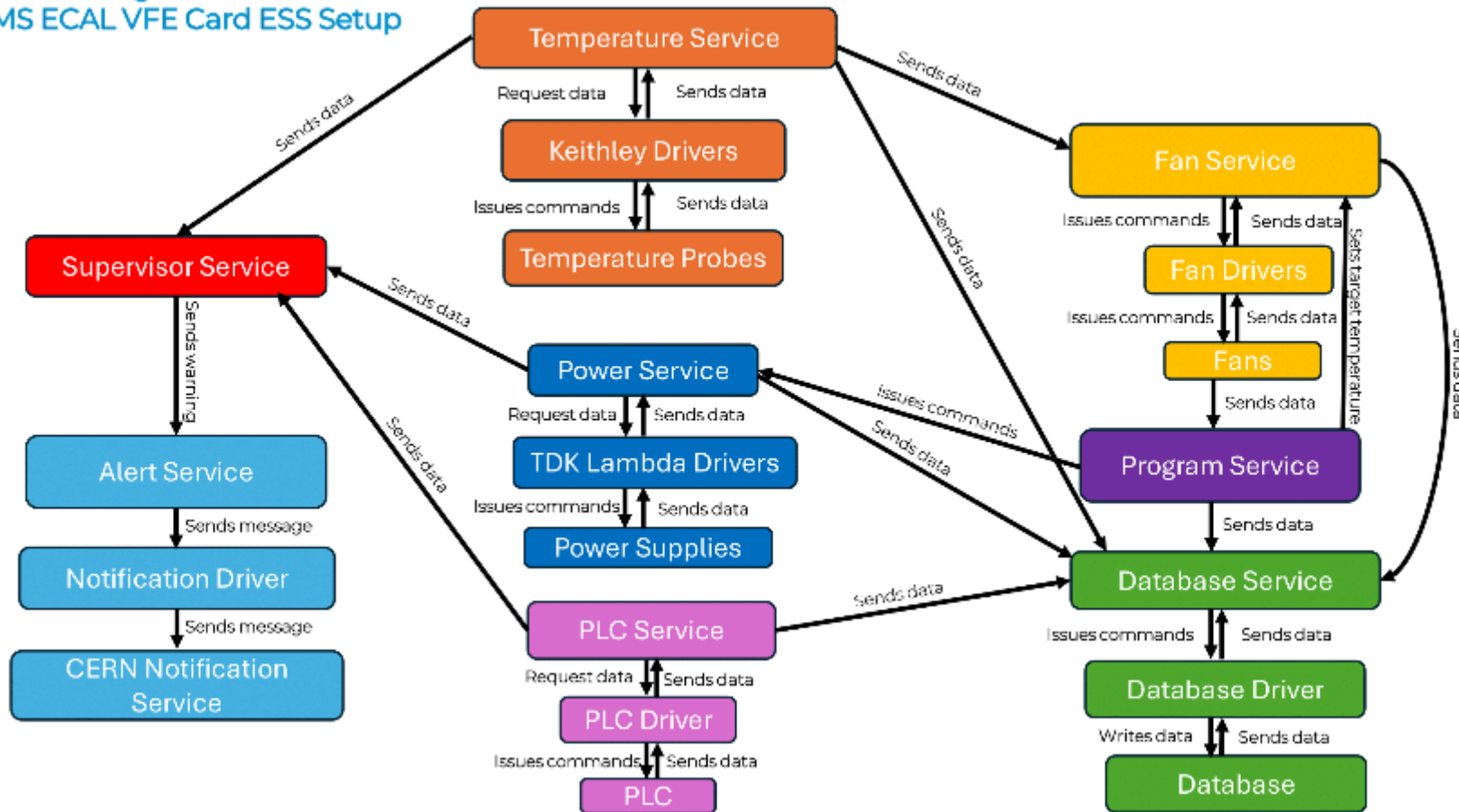
Najefektivnije rešenje jeste da postoji subskripcija na određeni servis, tako da novosti vezane za njih dobijaju ljudi koji zaista to žele i niko drugi...



Na sličan način (samo malčice kompleksniji) implementiran je i naš softver...

CMS ECAL Barrel upgrade – ESS softver

Services diagram
CMS ECAL VFE Card ESS Setup



Softver je podeljen u set nezavisnih servisa koji su nezavisno pokrenuti u *multi-threading* režimu.

Međutim neki servisi moraju biti konektovani i na druge servise (RPyC).

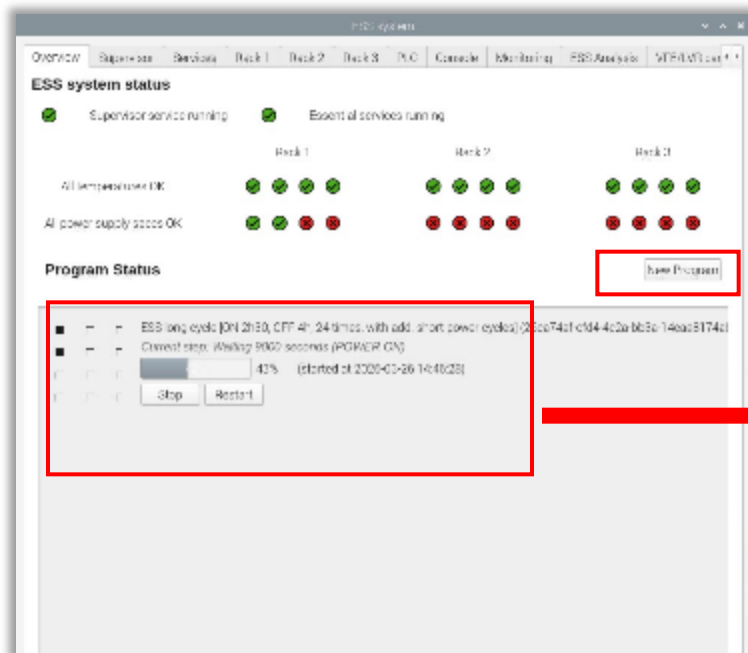
Servisi su podeljeni u **DataCollection** servise (poput Temperature ili Power servisa) i **Observer** servise (poput Supervisor servisa).

Npr. Supervisor servis je Observable servis koji zahteva konekciju ka svim servisima jer je njegov zadatak da ugasi ceo softver ukoliko određeni sigurnosni uslovi nisu ispunjeni.

Za ovaj softver dizajniran je glavni GUI i Database GUI koji omogućavaju jednostavni monitoring i upravljanje sistemom na daljinu. Njih koriste studenti osnovnih studija koji dolaze da rade prakse u CERN i uključeni su na rutinske poslove poput ovog testiranja.

CMS ECAL Barrel upgrade – ESS softver

Generalni workflow bi izgledao ovako: Student bi pokrenuo executable file (koji bi startovao Orchestrator servis – omogućava pokretanje svih servisa u pravilnom redosledu, i GUI). Otvorio bi se sledeći prozor:



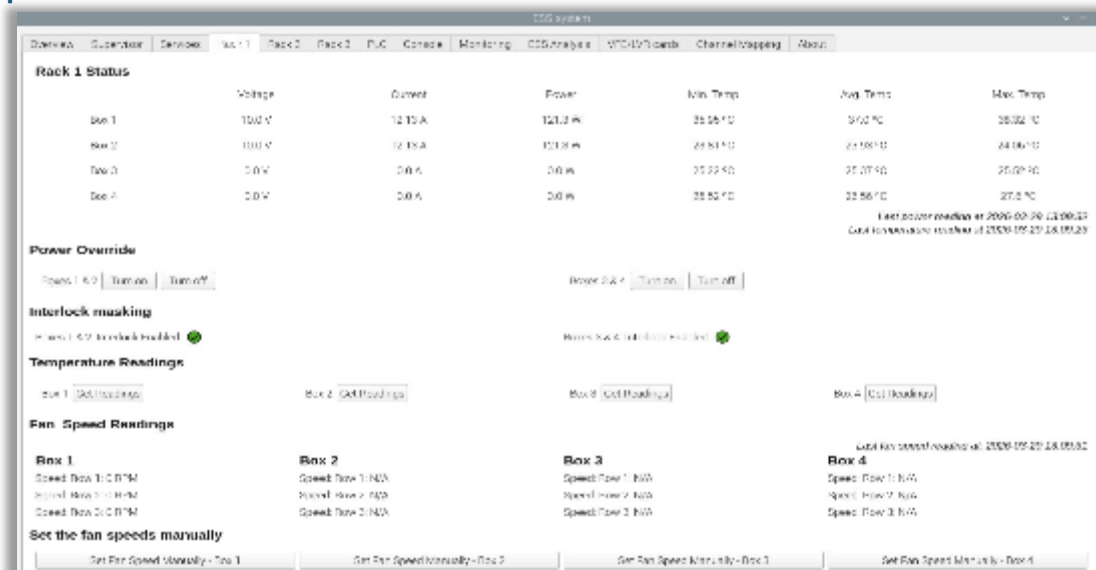
Student pokreće program koji može da izgleda ovako:



Moguće je praćenje progressa izvršavanja programa, zaustavljanje itd. Popunjeni kvadratići prikazuju na kojim kutijama, na kojim policama se trenutno vrši cikliranje.

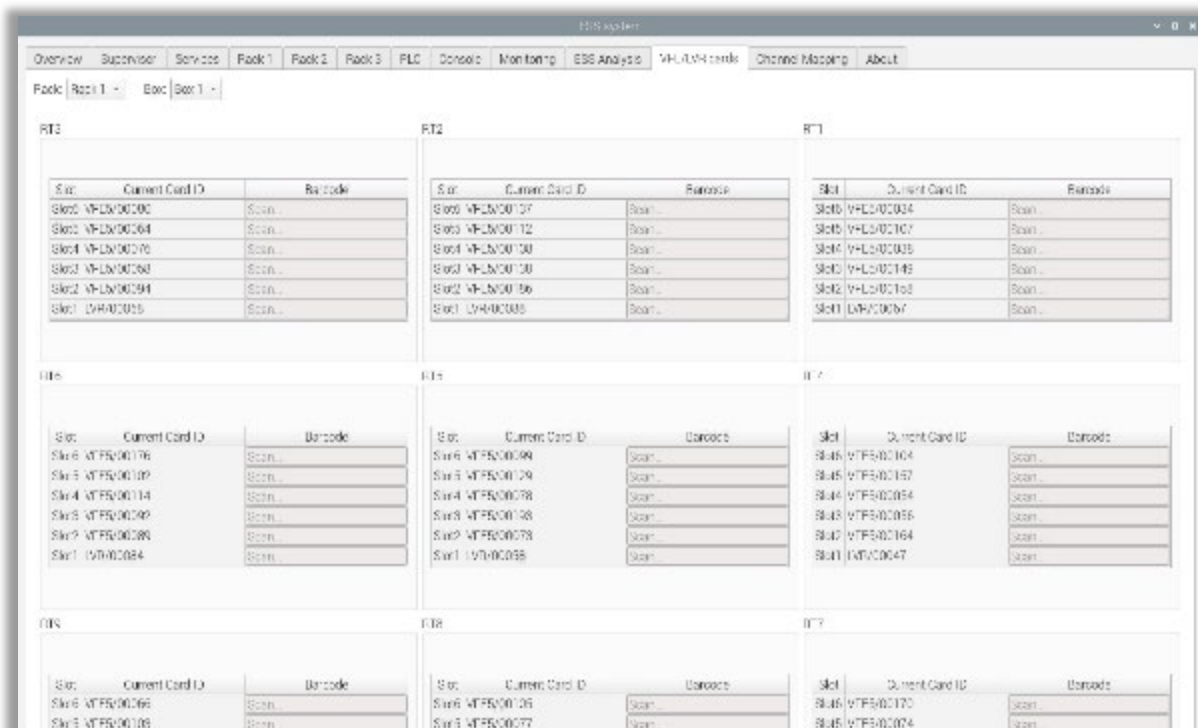
Statusi u jednoj polici mogu se pratiti u Rack tab-ovima:

- U ovom tab-u su opcije za *remote* paljenje i gašenje sistema za napajanje.
- Klikom na dugme „**Get Readings**“ otvara se prozor sa prikazom individualnih temperatura sa svih 38 senzora instaliranih po kutiji.
- Moguće je i zadavanje tačne brzine ventilatora, kao i očitavanje njihove trenutne brzine.



CMS ECAL Barrel upgrade – ESS softver

Sledeći korak bi bio vađenje starih i instaliranje novih kartica u slot-ove RT-ova. Za potrebe ovog procesa služi VFE/LVR Cards tab.



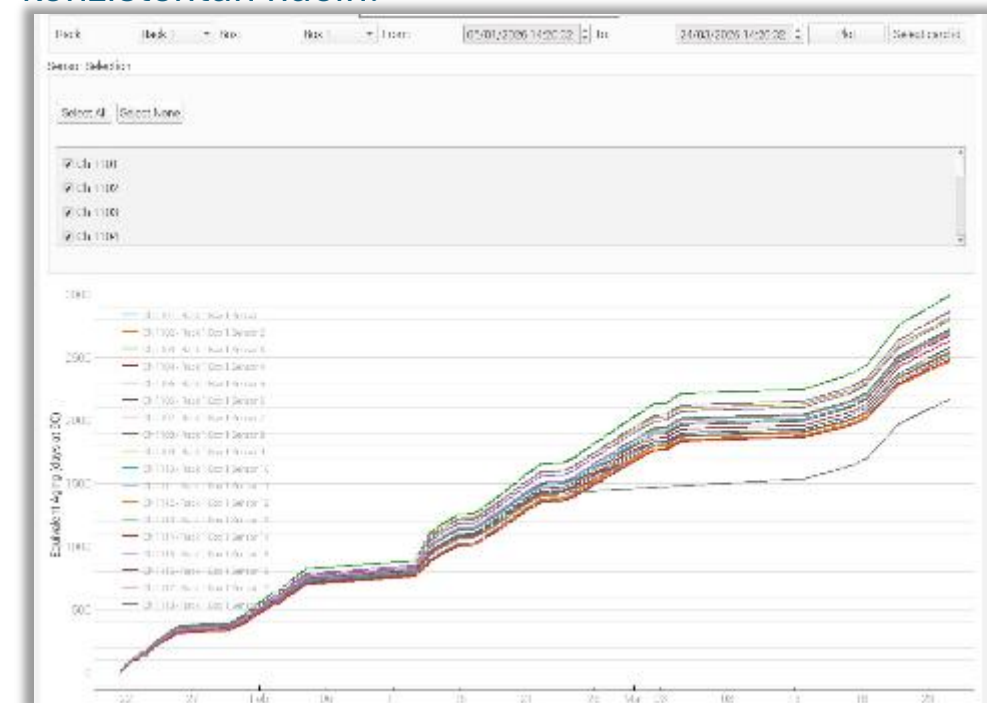
Moguće je uživo praćenje novih temperaturskih merenja vezanih za senzore u određenim RT-ovima, ali i praćenje promene temperature/starenja za specifičnu karticu:

Real time renering grafika realizovan je uz pomoć PyQTGraph biblioteke.

Barcode card ID trenutno instaliranih kartica prikazan je u tabeli za svaki slot u svakom RT.

Student bi izvadio tu karticu, skenirao barcode nove kartice i instalirao ju u korespondentni slot.

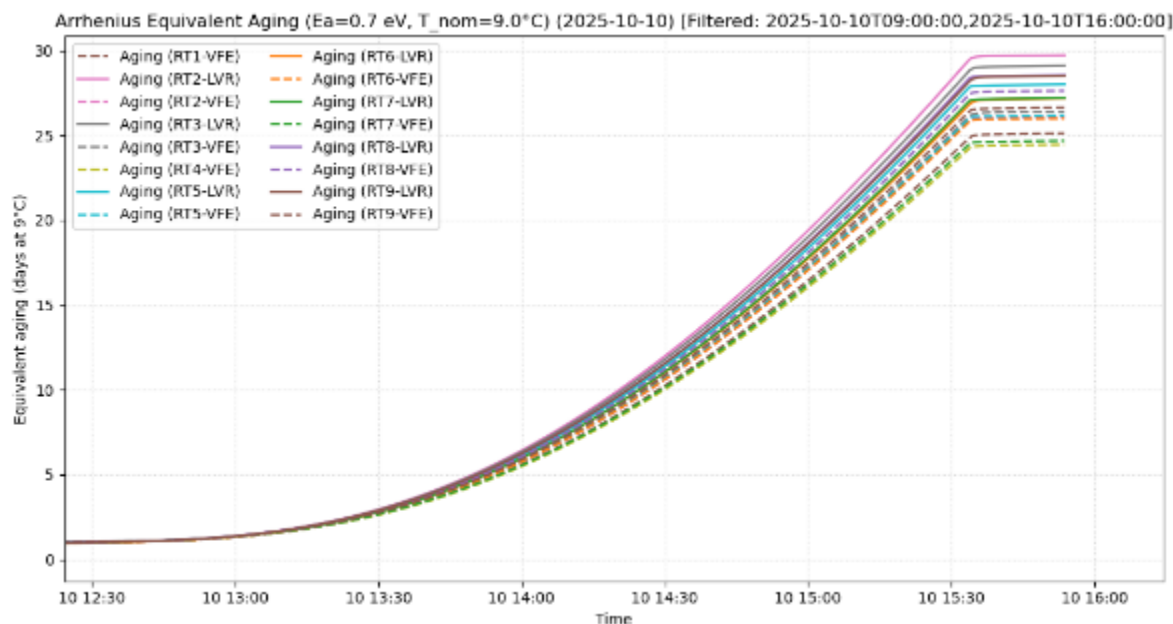
Jednom kada je instalacija novih kartica završena, na dnu ovog prozora nalazi se dugme „Registrar to Database“ koje povezuje ovaj Card ID sa slot/RT kombinacijom- sada sse sva temperaturska merenja sa slot-a, i proračuni starenja za karticu povezuju na konzistentan način.



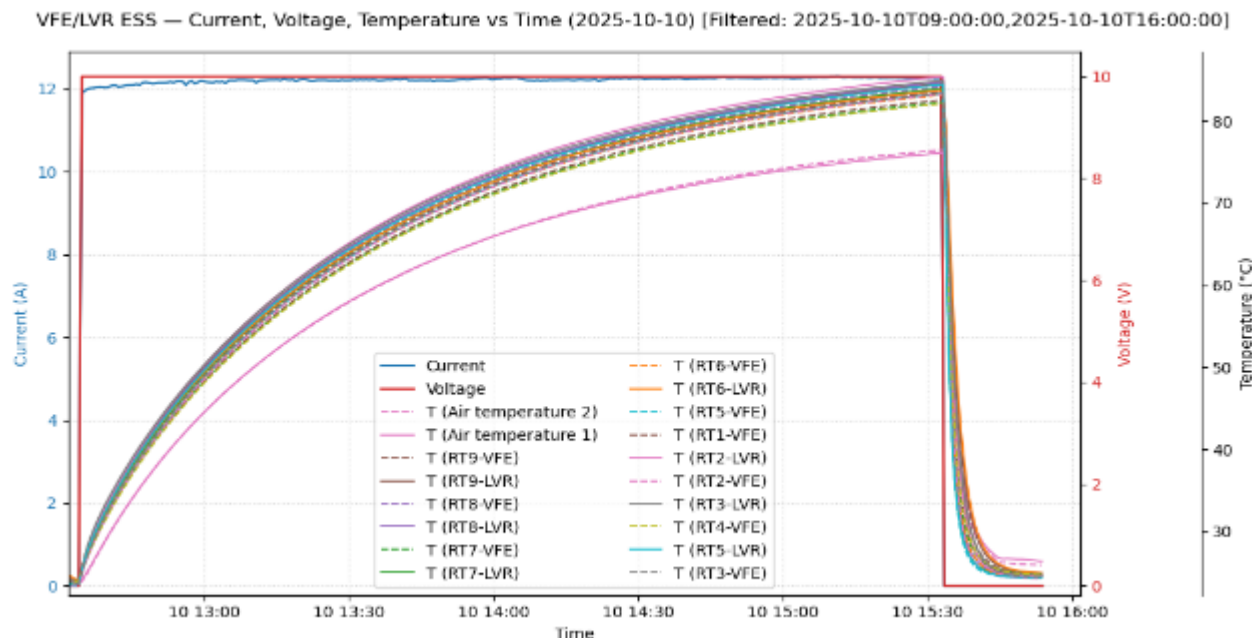
CMS ECAL Barrel upgrade – ESS trenutni rezultati

- Prve rezultate počeli smo da prikupljamo od **Septembra 2025.** godine
- Testiranje je podeljeno u dve faze:
 - Long stress screening:** Vrš se u nekoliko etapa.
 - Među-testiranje:** Nakon svake stress screening etape potrebno je testirati osnovne funkcionalnosti VFE i LVR kartica (npr. Nakon 3 meseca, 6 meseci, itd.)

Primer VFE/LVR ekvivalentnog starenja po ciklusu



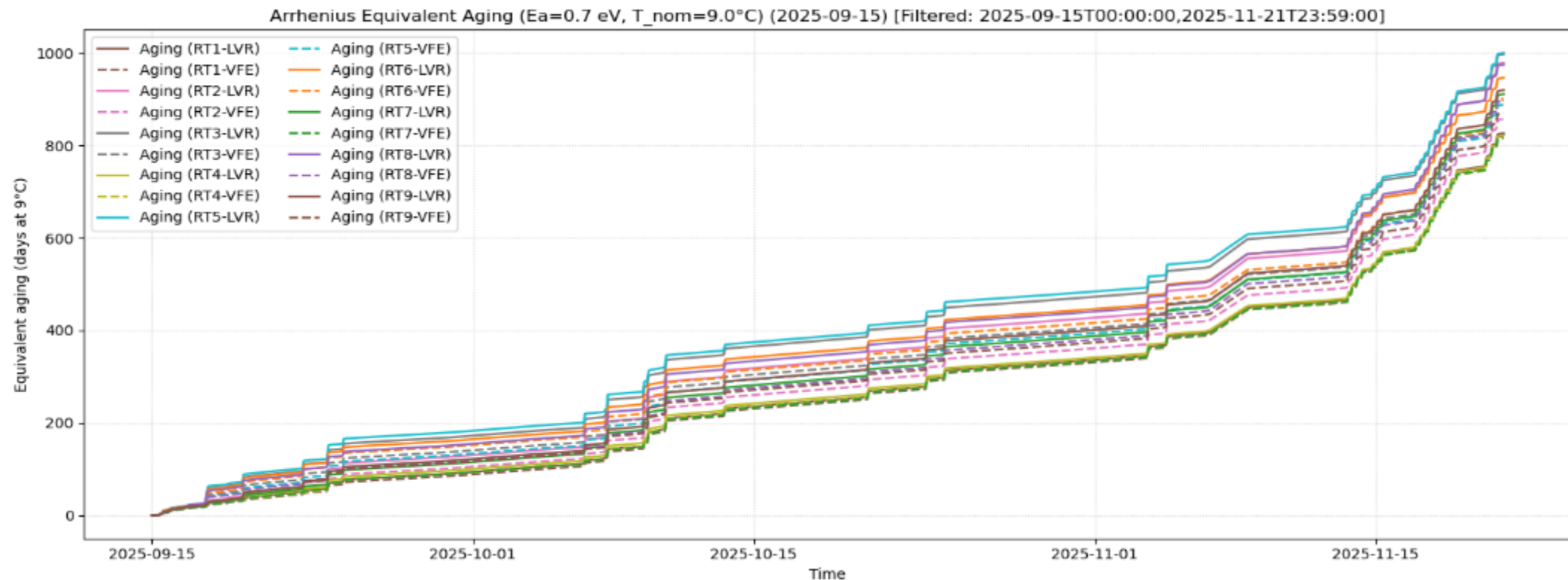
Primer VFE/LVR grejanja/hlađenja po ciklusu



CMS ECAL Barrel upgrade – ESS trenutni rezultati

- **350 VFE i 70 LVR** kartica su ostarene do 10 godina starosti. **Nijedna nije otkazala.**
- Iste ove kartice su prošle i testove na druge tipove defekata.
- Usled toga odlučeno je da se ostatak kartica koje su trenutno dostupne ostare **1 godinu** tako da prođu „infant mortality“ fazu.
- **270 VFE i 54 LVR** kartica je prošlo ESS testiranje i **spremno je za instalaciju u ECAL Barrel.**

Primer VFE/LVR ekvivalentnog starenja tokom nekog perioda (15.9.-21.11.2025.)



DRUGI DEO – FIZIČKA ANALIZA

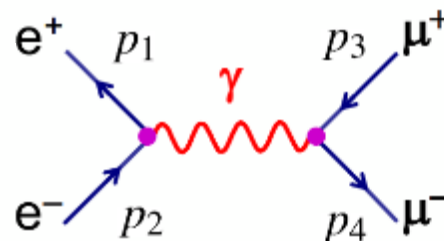
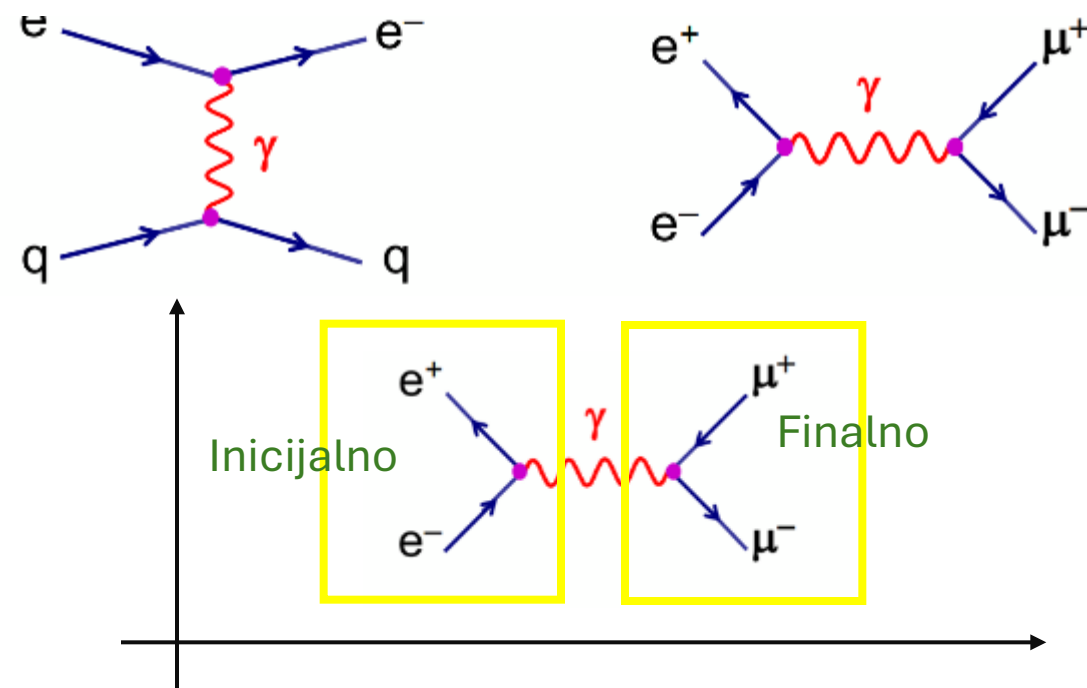
Fajnmenova pravila

- Skup dijagrama pomoću kojih se mogu opisati interakcije čestica razmenom virtuelnih čestica – Fajnemnovi dijagrami.
- Ove interakcije možemo svesti na slučajeve rasejanja ili anihilacije.

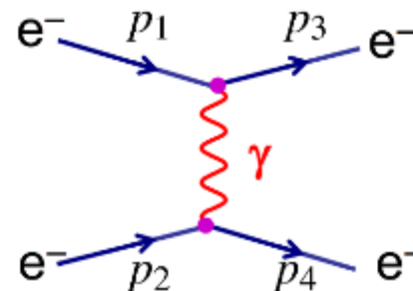
Treba upamtiti:

- Vreme „teče“ od leva ka desno.
- Leva stanja su **inicijalna stanja**.
- Desna su **finalna**.
- Sredina nam govori kako se prelaz desio.
- Anti-čestice imaju strelice u **negativnom vremenskom smeru**.
- Energija, impuls, ugaoni impuls itd. Su očuvani u **vertexima**.
- Sve čestice u među-stanjima su virtualne (**za njih ne važi Ajnštajnova disperziona relacija!**)
- Postoje 3 veoma korisne, Lorentz invarijantne veličine koje se zovu Mandelstanove varijable:

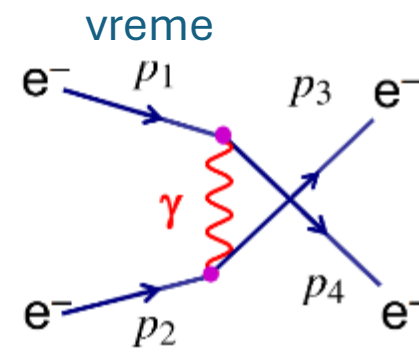
$$s = (p_1 + p_2)^2, \quad t = (p_1 - p_3)^2, \quad u = (p_1 - p_4)^2$$



s-channel



t-channel



u-channel

Fajnmenova pravila

- Fajnmenova pravila se formiraju za interakcije koje posredstvuju nekim rasejanjem, anihilacijom, raspadom...
- Npr. Za QED (Quantum ElectroDynamics) ova pravila glase:

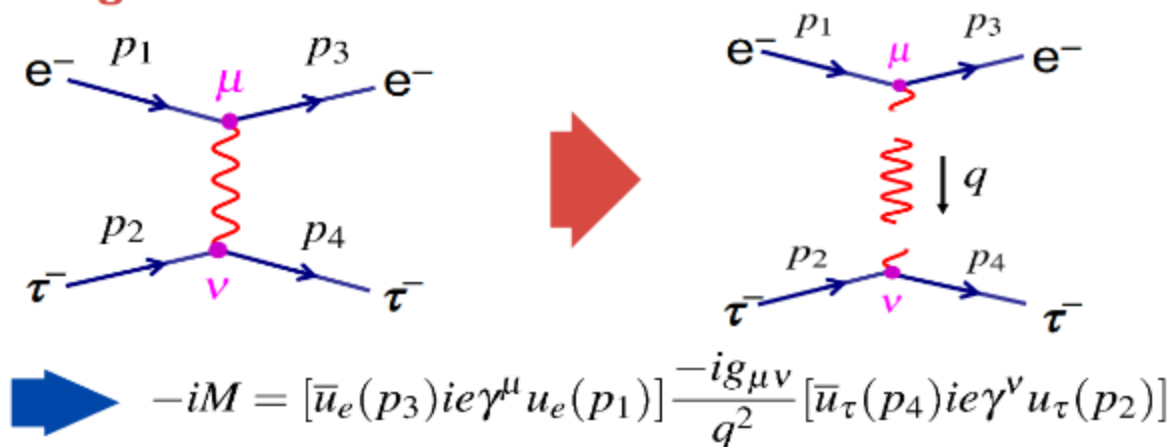
N.B.

- U svakom vertexu adjungovani spinor se prvo piše.
- Svaki vertex ima drugačiji index.
- Tenzor metrike prostora Minkowskog kontrakuje ove indekse u verteksima.
- Rezultat: Interakcija opisana razmenom virtuelnih čestica prirodno daje Lorentz invarijantni matrični element oblika:

$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{q^2 - m_x^2}$$

Primer: rasejanje tauona i elektrona razmenom fotona:

QED scattering : $\tau^- e^- \rightarrow \tau^- e^-$



External Lines

spin 1/2	incoming particle	$u(p)$	
	outgoing particle	$\bar{u}(p)$	
	incoming antiparticle	$\bar{v}(p)$	
	outgoing antiparticle	$v(p)$	
spin 1	incoming photon	$\epsilon^\mu(p)$	
	outgoing photon	$\epsilon^\mu(p)^*$	

Internal Lines (propagators)

spin 1	photon	$-\frac{ig_{\mu\nu}}{q^2}$	
spin 1/2	fermion	$\frac{i(\gamma^\mu q_\mu + m)}{q^2 - m^2}$	

Vertex Factors

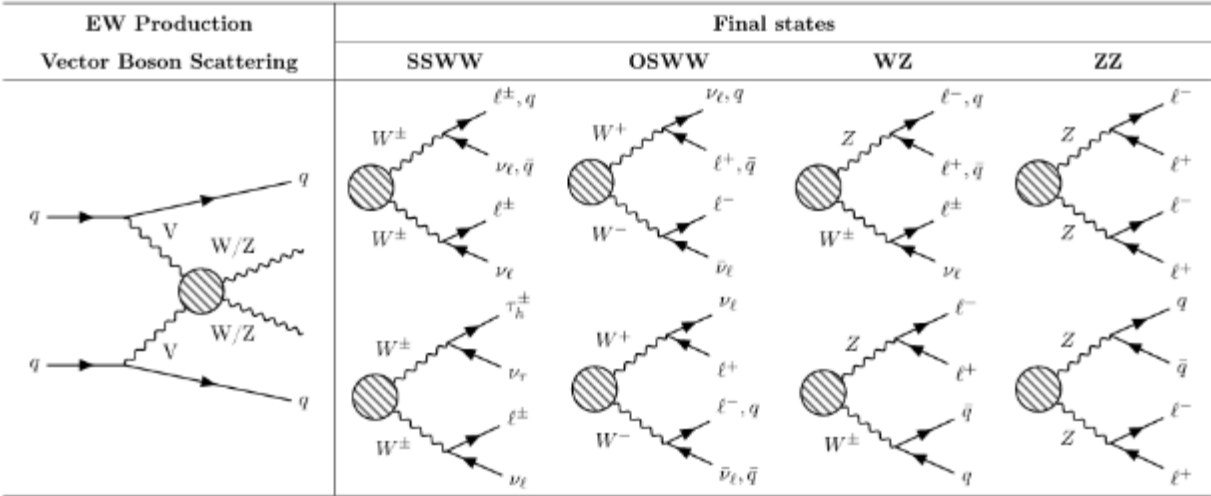
spin 1/2	fermion (charge $- e $)	$ie\gamma^\mu$	
----------	--------------------------	----------------	--

Matrix Element $-iM = \text{product of all factors}$

Analogno se mogu opisati i interakcije Slabe teorije i QCD...

Rasejanje vektorskih bozona (eng. *Vector boson scattering – VBS*)

- VBS je proces u kome su finalno i inicijalno stanje u Fajnenovim dijagramima vektorski bozoni (W, Z ili γ), a medijator procesa je Elektroslaba interakcija
- U praksi, u sudarima na LHC-u, oni izgledaju ovako:



Produkti raspada + jet-ovi (od rasejanih kvarkova koji su emitovali inicijalne vektorske bozone)

=
VBS potpis

Kanal u kom dolazi do raspada 2 Z bozona je posebno interesantan zato što ostavlja veoma čist potpis u vidu 4 leptona u detektorima.

Istorijski gledano, VBS je interesantan proces zato što, pre postuliranja Higgsovog polja/bozona, računanje amplitude rasejanja za ovaj proces je **narušavalo unitarnost**.

Ubacivanjem Higgsovog bozona u Fajnemova pravila i ponovnim proračunom amplitude rasejanja dobija se kontrolisano ponašanje amplitude na gotovo svim opsezima energije.

Ovaj proces se dalje koristio sa postavljanje **ograničenja na masu** Higgsovog bozona.

Rasejanje vektorskih bozona (eng. *Vector boson scattering – VBS*)

Posmatrajmo proces rasejanja WW bozona
Polarizacioni vektori izgledaju ovako:

$$\varepsilon_L(p_1) = \left(\frac{p}{M_W}, 0, 0, +\frac{E}{m_W} \right),$$

$$\varepsilon_L(p_2) = \left(\frac{p}{M_W}, 0, 0, -\frac{E}{m_W} \right),$$

$$\varepsilon_L(p_3) = \left(\frac{p}{M_W}, 0, +\frac{E}{m_W} \sin \theta, +\frac{E}{m_W} \cos \theta \right),$$

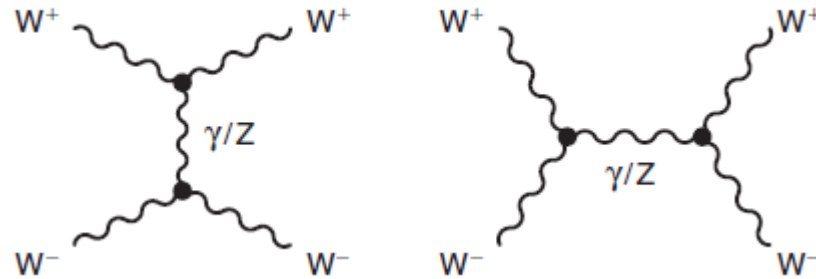
$$\varepsilon_L(p_4) = \left(\frac{p}{M_W}, 0, -\frac{E}{m_W} \sin \theta, -\frac{E}{m_W} \cos \theta \right).$$

Zatim, posmatrajmo četverostruko sprezanje:

Sabiranjem amplituda ova dva procesa dobija se da verovatnoća za dešavanje ove interakcije neograničeno raste sa porastom energije.

Dolazi do **narušenja unitarnosti** za enegije:

$$\sqrt{s} = 1.2 \text{ TeV}.$$



$$\begin{aligned} &= (E, 0, 0, +p), \\ &= (E, 0, 0, -p), \\ &= (E, 0, +p \sin \theta, +p \cos \theta), \\ &= (E, 0, -p \sin \theta, -p \cos \theta). \end{aligned}$$

Amplituda rasejanja je:



$$T^{VVV} = g_W^2 \left\{ \frac{p^4}{M_W^4} [3 - 6 \cos \theta - \cos^2 \theta] + \frac{p^2}{M_W^2} \left[\frac{9}{2} - \frac{11}{2} \cos \theta - 2 \cos^2 \theta \right] \right\}$$

$$T^{VVVV} = g_W^2 \left\{ \frac{p^4}{M_W^4} [-3 + 6 \cos \theta + \cos^2 \theta] + \frac{p^2}{M_W^2} [-4 + 6 \cos \theta + 2 \cos^2 \theta] \right\}$$

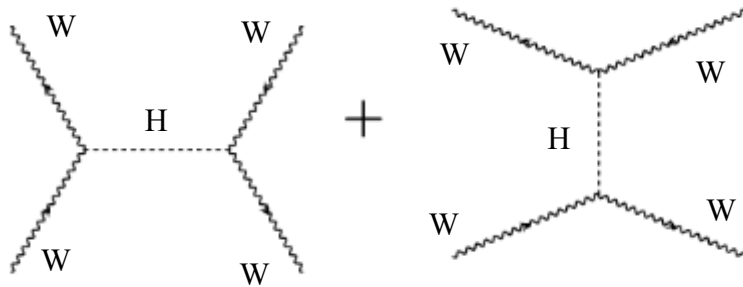
$$T^{VVV} + T^{VVVV} = g_W^2 \left\{ \frac{p^4}{M_W^4} \cdot 0 + \frac{p^2}{M_W^2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right] \right\}$$

$$T^{VVV+VVVV} \sim -\frac{g_W^2}{4M_W^2} s$$

U spas nam dolazi Higgsov bozon!

Rasejanje vektorskih bozona (eng. *Vector boson scattering* – VBS)

Ukoliko dodamo Higgsov bozon u teoriju, i razmatramo proces rasejana vektorskih bozona razmenom Higgsa, tzv. S i t kanali će doprineti amplitudi sa:



$$T^H = g_W^2 \left\{ \frac{p^2}{M_W^2} \left[-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \theta \right] - \frac{M_H^2}{4M_W^2} \left[\frac{s}{s - M_H^2} + \frac{t}{t - M_H^2} \right] \right\}$$

$$T^{VVV+VVVV+H} = -g_W^2 \frac{M_H^2}{4M_W^2} \left[\frac{s}{s - M_H^2} + \frac{t}{t - M_H^2} \right]$$

Za dovoljno male mase Higgsa, ova amplituda se „dobro ponaša“ i na velikim energijama.
VBS daje ograničenje na gornju vrednost mase Higgsa:

Motivacija za istraživanje VBS danas:

- Standardni model nije kompletna teorija. Kada pokušamo da računamo amplitude nekih dijagrama dobijamo beskonačnosti.
- Njih uklanjamo **renormalizacijom**.
- Pod pretpostavkom da postoji nova fizika na nekim višim skalama, SM posmatramo kao efektivnu teoriju, što u Lagranžijan ubacuje nove operatore, i koeficijente čije vrednosti možemo meriti.

$$\mathcal{L}_{SMEFT} = L_{SM} + \frac{1}{\Lambda} L_5 + \frac{1}{\Lambda^2} L_6 + \frac{1}{\Lambda^3} L_7 + \dots$$

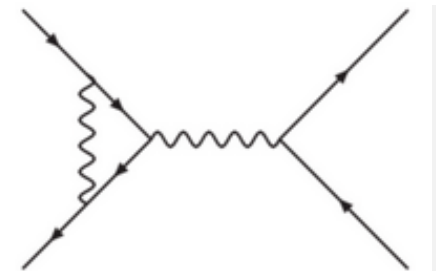
Wilsonovi koeficijenti.

$$L_i = \sum_i C_i \mathcal{O}_i^d$$

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
Invarijantni...

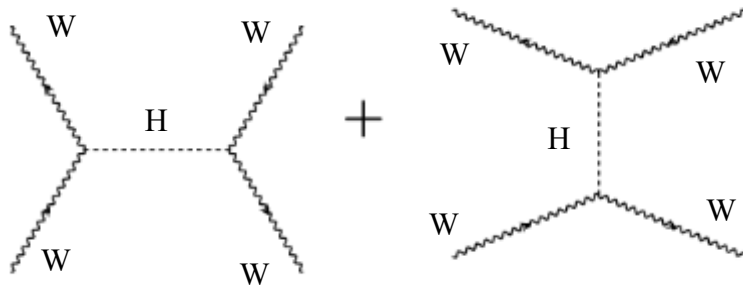
Fermijeva konstanta

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_W^2}{8m_W^2} = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$



Rasejanje vektorskih bozona (eng. *Vector boson scattering – VBS*)

Ukoliko dodamo Higgsov bozon u teoriju, i razmatramo proces rasejana vektorskih bozona razmenom Higgsa, tzv. S i t kanali će doprineti amplitudi sa:



$$T^H = g_W^2 \left\{ \frac{p^2}{M_W^2} \left[-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \theta \right] - \frac{M_H^2}{4M_W^2} \left[\frac{s}{s - M_H^2} + \frac{t}{t - M_H^2} \right] \right\}$$

$$T^{VVV+VVVV+H} = -g_W^2 \frac{M_H^2}{4M_W^2} \left[\frac{s}{s - M_H^2} + \frac{t}{t - M_H^2} \right]$$

Za dovoljno male mase Higgsa, ova amplituda se „dobro ponaša“ i na velikim energijama.

VBS daje ograničenje na gornju vrednost mase Higgsa:

$$M_H \leq \left(\frac{8\pi\sqrt{2}}{3G_F} \right)^{1/2} \lesssim 1 \text{ TeV}$$

Fermijeva konstanta

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_W^2}{8m_W^2} = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

Motivacija za istraživanje VBS danas:

- Standardni model nije kompletna teorija. Kada pokušamo da računamo amplitude dijagrama dobijamo beskonačnosti.
- Njih uklanjamo **renormalizacijom**.
- Pod pretpostavkom da postoji nova fizika na nekim višim skalama, SM posmatramo kao efektivnu teoriju, što u Lagranžijan ubacuje nove operatore, i koeficijente čije vrednosti računamo.
- $\mathcal{L}_{SMEFT} = L_{SM} + \frac{1}{\Lambda} L_5 + \frac{1}{\Lambda^2} L_6 + \frac{1}{\Lambda^3} L_7 + \dots$

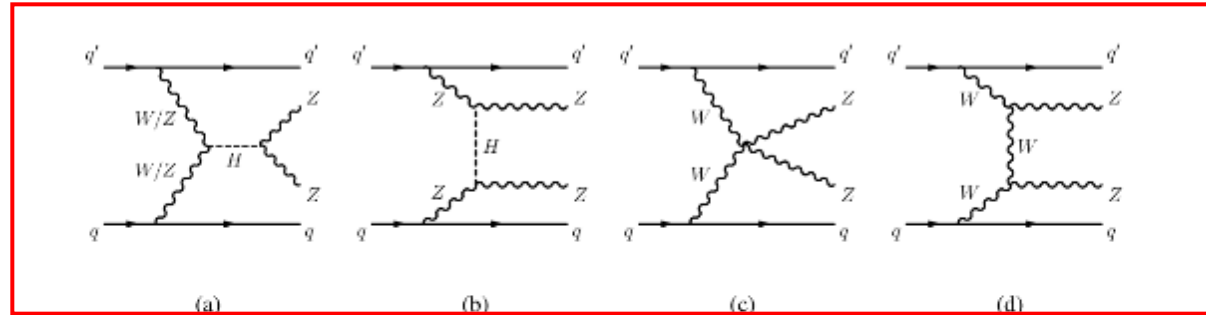
Wilsonovi koeficijenti.

$$L_i = \sum_i C_i Q_i^d$$

- Ovi operatori su svi **dimenzija > 4**.
- Detekcijom VBS događaja moguće je uspostaviti eksperimentalna ograničenja na neke od ovih operatera viših dimenzija.
- Konkretno najinteresantiji su **operatori dimenzija 8**.

Detekcija rasejanja vektorskih bozona

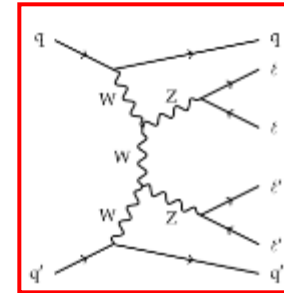
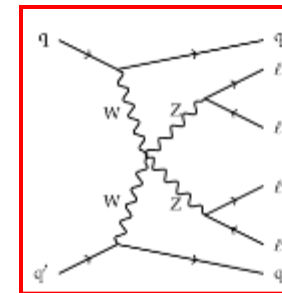
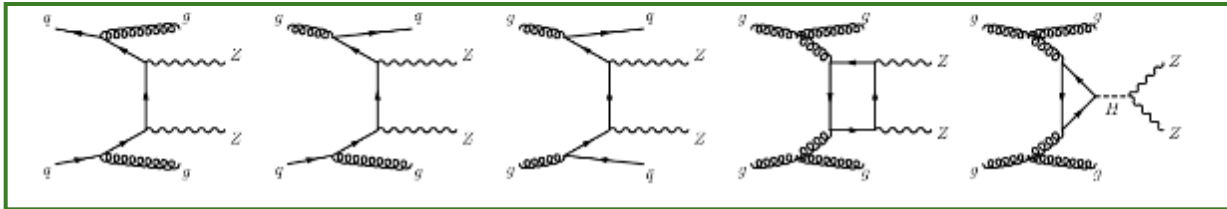
- Rasejanje vektorski bozona je **elektroslab process**, koji u LHC-u ima svoj karakterističan potpis.
- Međutim, postoje procesi koji „savršeno imitiraju“ ovaj potpis- njih zovemo **irreducibilna pozadina/fon**.
- Ukoliko su rasejani bozoni u pitanju dva Z bozona koji se raspadnu na leptone, ovaj kanal ima veoma „čist“ potpis i od velikog je interesa za analizu.



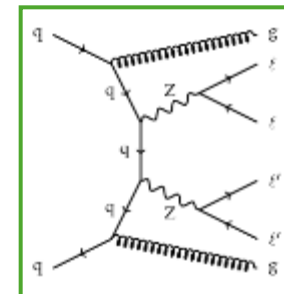
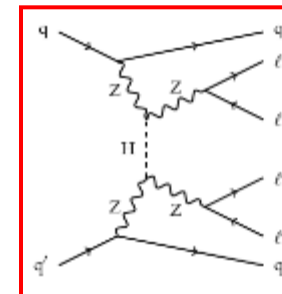
Elektroslaba produkcija VBS-a. Ove događaje zovemo **signal**.

QCD produkcija 2 Z bozona praćenih jet-ovima.

Ovaj slučaj zovemo ireducibilni fon (eng. *Irreducible Background – IRBG*).



Primeri finalnog stanja pri elektroslaboju produkciji VBS-a.

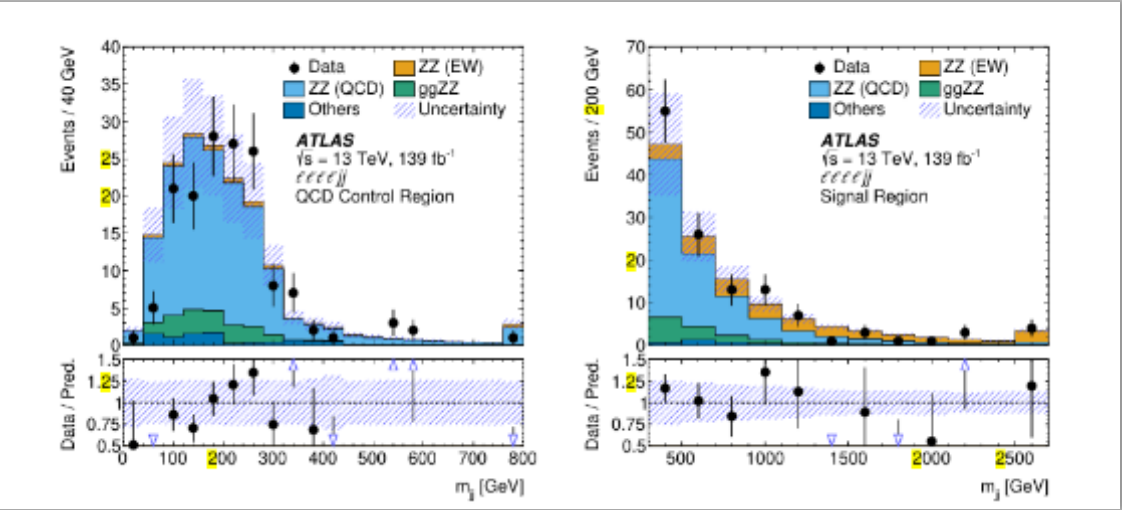


Primeri ireducibilne pozadine pri QCD produkciji 4l2j stanja.

Međutim **masa Z bozona je $\approx 91\text{GeV}$** ! On se raspada pre nego što ga možemo detektovati. Finalno stanje, stanje koje mi detektujemo mogu da budu leptoni, kvarkovi, neutrini ili kombinacija njih. Poreklo kvarkova i detekcija neutrina je u praksi poprilično teška, te nas najviše interesuje kanal: **$ZZjj \rightarrow 2l^\pm + 2l^\mp + 2j$**

Detekcija rasejanja vektorskih bozona

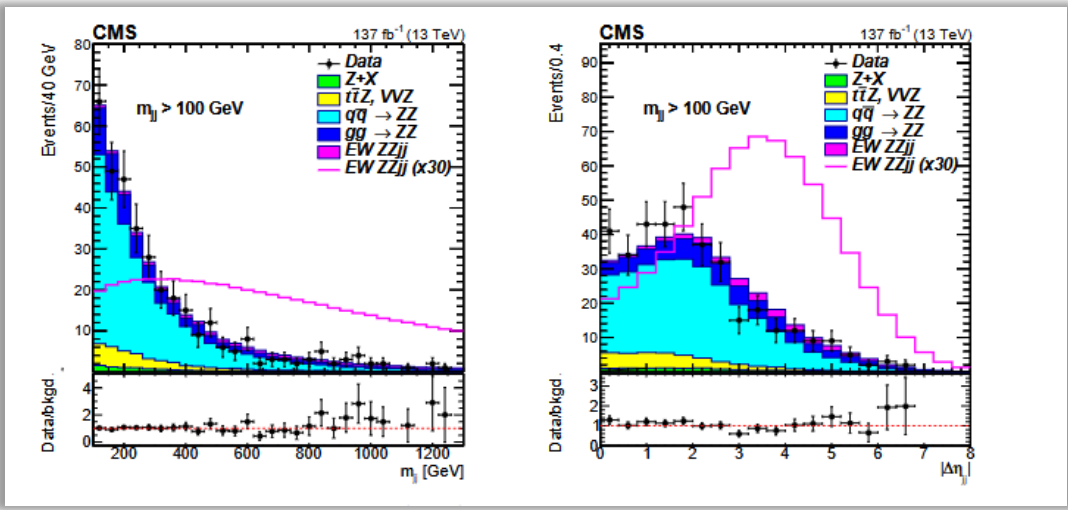
- Pored ireducibilne pozadine, postoje i poyadinski procesi koji imaju isto finalno stanje ali drugačiju kinematiku, ili „imitiraju“ naše finalno stanje – i to je nešto što možemo da pokušamo da minumiziramo – reducibilni fon.
- U analizi VBS događaja se on često naziva Z+X.
- Rezultati analize ATLAS i CMS grupe na podacima tokom Run 2 LHC-a (2015 -2018):



Process	$lllljj$	$llvvjj$
EW $ZZjj$	31.4 ± 3.5	15.0 ± 0.8
QCD $ZZjj$	77 ± 25	17.2 ± 3.5
QCD $ggZZjj$	13.1 ± 4.4	3.5 ± 1.1
Non-resonant- $\ell\ell$	–	21.4 ± 4.8
WZ	–	24.6 ± 1.1
Others	3.2 ± 2.1	1.2 ± 0.9
Total	124 ± 26	82.9 ± 6.4
Data	127	82

ATLAS je sa Run 2 podacima u analizi imao $> 5\sigma$ što se klasifikuje kao opservacija!

	μ_{EW}	μ_{QCD}^{lllljj}	Significance Obs. (Exp.)
$lllljj$	0.97 ± 0.27	0.99 ± 0.22	$5.5 (5.6) \sigma$
$llvvjj$	0.7 ± 0.5	–	$1.3 (2.1) \sigma$
Combined	0.92 ± 0.24	0.99 ± 0.22	$5.7 (5.9) \sigma$

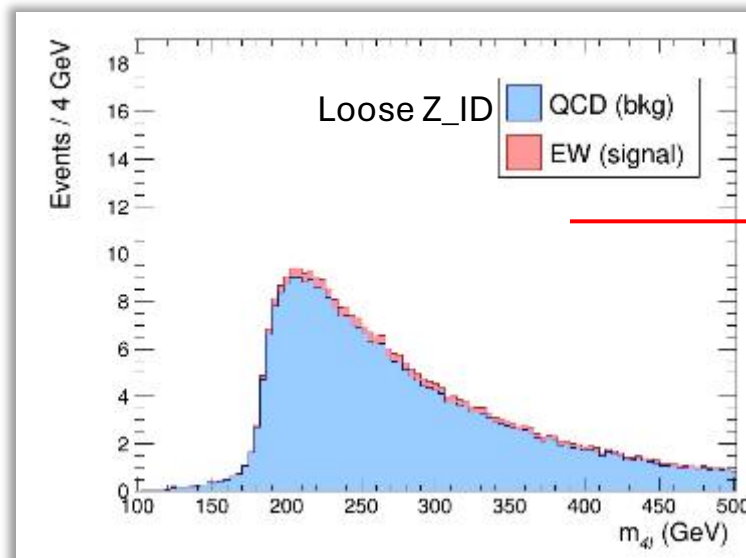
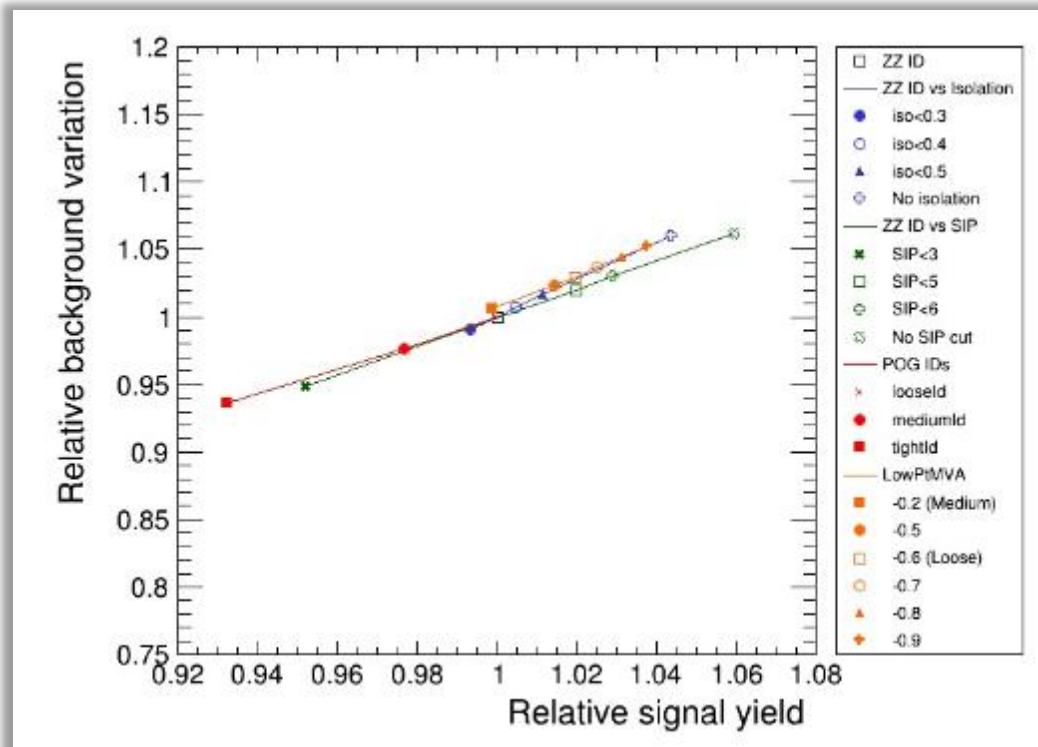


		Perturbative order	SM σ (fb)	Measured σ (fb)
ZZjj inclusive				
EW	LO		0.275 ± 0.021	$0.33^{+0.11}_{-0.10} \text{ (stat)}^{+0.04}_{-0.03} \text{ (syst)}$
	NLO QCD		0.278 ± 0.017	
	NLO EW		$0.242^{+0.015}_{-0.013}$	
EW+QCD			5.35 ± 0.51	$5.29^{+0.31}_{-0.30} \text{ (stat)} \pm 0.47 \text{ (syst)}$
VBS-enriched (loose)				
EW	LO		0.186 ± 0.015	$0.180^{+0.003}_{-0.003} \text{ (stat)}^{+0.021}_{-0.012} \text{ (syst)}$
	NLO QCD		0.197 ± 0.013	
EW+QCD			1.21 ± 0.09	$1.00^{+0.12}_{-0.11} \text{ (stat)} \pm 0.07 \text{ (syst)}$
VBS-enriched (tight)				
EW	LO		0.104 ± 0.008	$0.09^{+0.04}_{-0.03} \text{ (stat)} \pm 0.02 \text{ (syst)}$
	NLO QCD		0.108 ± 0.007	
EW+QCD			0.221 ± 0.014	$0.20^{+0.05}_{-0.04} \text{ (stat)} \pm 0.02 \text{ (syst)}$

Trenutna merenja efikasnog preseka nemaju dovoljan statistički značaj da potvrde opservaciju. To je glavni cilj ove grupe pre početka HL LHC-a.

Trenutni progres

- Trenutni fokus naše grupe je na optimizaciji selekcije mionskih događaja koji mogu da potiču od ZZjj VBS-a.
- Za potrebe optimizacije, kreirani su Monte Carlo uzorci koji verodostojno simuliraju produkciju VBS i IRBG događaja na trenutnoj luminoznosti, energiji itd.
- Uticaj različitih selekcija na odnos dobotka na signalu i dobotka na irreducibilnoj pozadini:

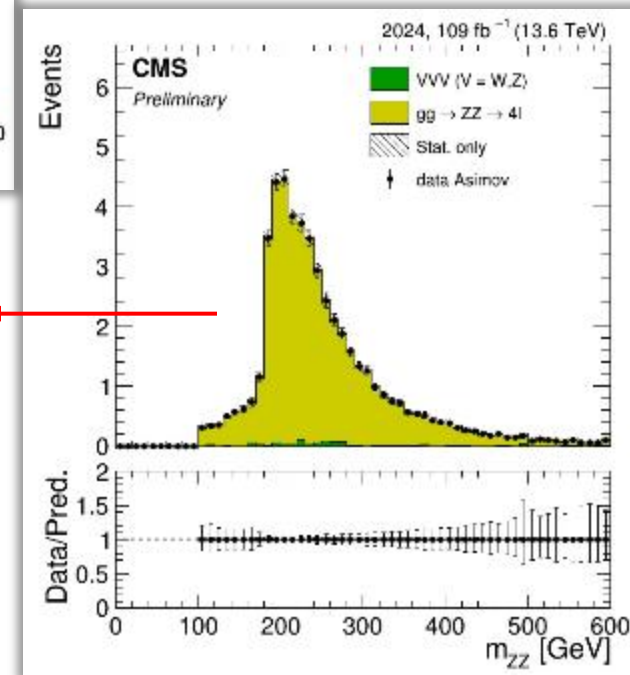


Procena odnosa
IRBG i Elektrosłabe
produkcije VBS
događaja.

Planovi za budućnost (blisku i dalju):

- Primeniti procene reducibilnog background-a na različite selekcije miona.
- Odrediti optimalnu selekciju za detekciju elektronskih događaja. itd.
- Opservacija VBS događaja i postavljanje eksp. ograničenja na operatore SMEFT.

Procena masene
distribucije nekih
primera klase
događaja koji
predstavljaju
reducibilni fon.



HVALA NA PAŽNJI!

PITANJA?