



CMS detektor i fizika Higgs bozona

12. prosinac 2001.
Prirodoslovno matematički fakultet - Zagreb

Ivica Puljak

Ivica.Puljak@fesb.hr



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje – Split

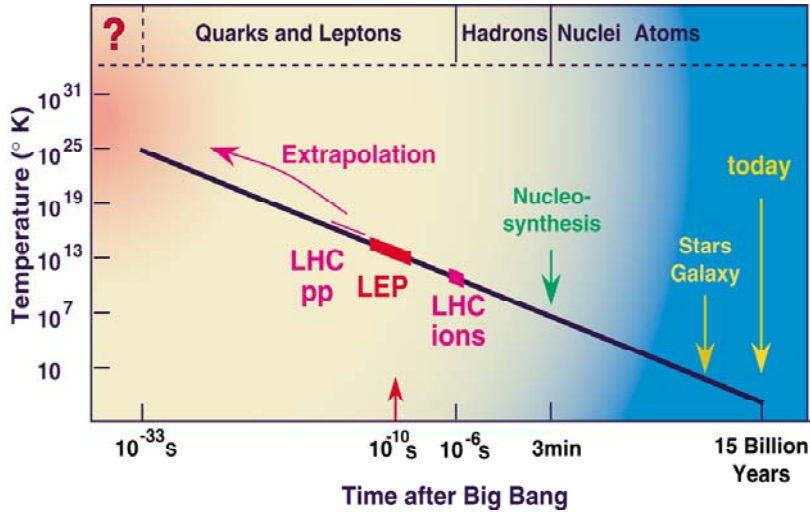


CMS kolaboracija, CERN – Ženeva

Sadržaj

- **LHC projekt**
 - Large Hadron Collider
 - Detektori na LHC-u
 - Fizika LHC-a
- **CMS detektor**
 - Subdetektori
 - Elektromagnetski kalorimetar CMS-a
 - Eksperimentalne aktivnosti u Splitu
 - Fizika CMS-a
- **Primjer potrage za Higgs bozonom:
simulacija $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ kanala raspada**
 - Simulacija signala i pozadine
 - Rekonstrukcija elektrona u CMS detektoru
 - Analiza rezultata

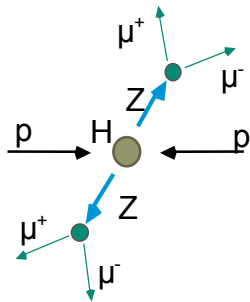
Prema početku



Kratka povijest

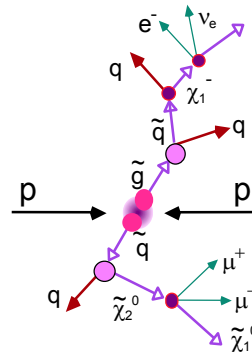
	$\lambda = h/p$	$T \approx t^{-1/2}$		
	10^{10} m	≤ 10 eV	> 300000 Y	1900.... Quantum Mechanics Atomic Physics
				1940-50 Quantum Electro Dynamics
	10^{15} m	MeV - GeV	≈ 3 min	1950-65 Nuclei, Hadrons Symmetries, Field theories
	10^{16} m	\gg GeV	$\approx 10^6$ sec	1965-75 Quarks. Gauge theories
	10^{18} m	≈ 100 GeV	$\approx 10^{10}$ sec	1970-83 SPS ElectroWeak Unification, QCD
				1990 LEP 3 families
				1994 Tevatron Top quark
Origin of masses	10^{19} m	$\approx 10^6$ GeV	$\approx 10^{12}$ sec	2005 LHC Higgs ? Supersymmetry ?
The next step...				
Proton Decay ?	10^{32} m	$\approx 10^{16}$ GeV	$\approx 10^{32}$ sec	Underground Labs GRAND Unified Theories ?
The Origin of the Universe	10^{35} m	$\approx 10^{19}$ GeV (Planck scale)	$\approx 10^{43}$ sec	?? Quantum Gravity? Superstrings ?

Slijedeći korak



- Nove sile (simetrije)
- Nove čestice
- Super simetrija
- Substruktura

• **Higgs bozon:** tj. pronaći mehanizam odgovoran za spontano narušenje elektroslabe simetrije Standardnog modela

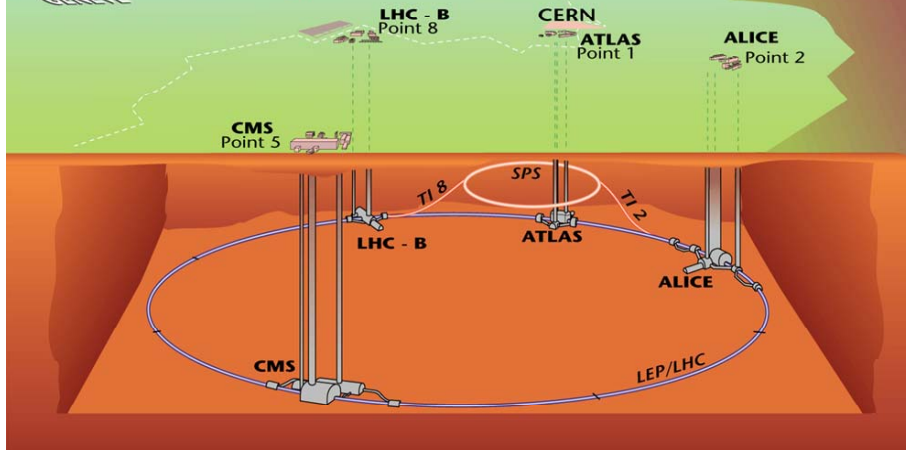


CERN site

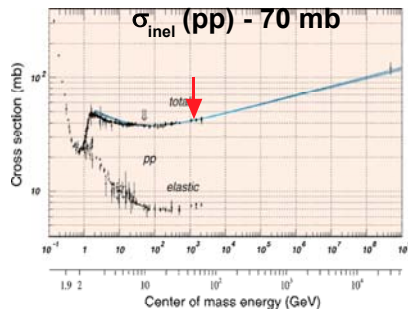


The Large Hadron Collider (LHC)

	Beams	Energy	Luminosity
LEP	$e^+ e^-$	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
LHC	$p p$	14 TeV	10^{34}
	$P_b P_b$	1312 TeV	10^{27}



pp udarni presjek & Min Bias

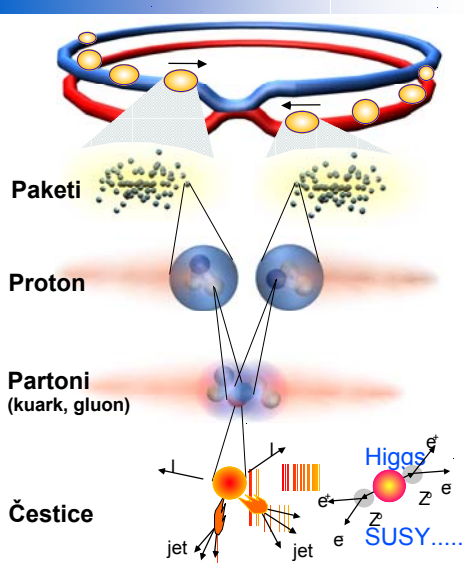


- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^7 \text{ mb}^{-1} \text{ Hz}$
- $\sigma_{\text{inel}}(\text{pp}) - 70 \text{ mb}$
→ **Frekv. događaja = $7 \times 10^8 \text{ Hz}$**
- $\Delta t = 25 \text{ ns} = 25 \times 10^{-9} \text{ Hz}^{-1}$
→ **Događ./25ns = $7 \times 2.5 = 17.5$**
- Svi paketi nisu puni (2835/3564)
→ **Događ./sudaru = 22**

Uvjeti rada (sažetak):

- 1) "Dobar" događaj koji sadrži raspad Higgasa +
- 2) ≈ 20 "loših" (minimum bias) interakcija

Sudari na LHC-u



Proton-Proton 2835 paketa/snpu
Protona/snpu 10^{11}
Energija snopa $7 \text{ TeV } (7 \times 10^{12} \text{ eV})$
Luminozitet $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

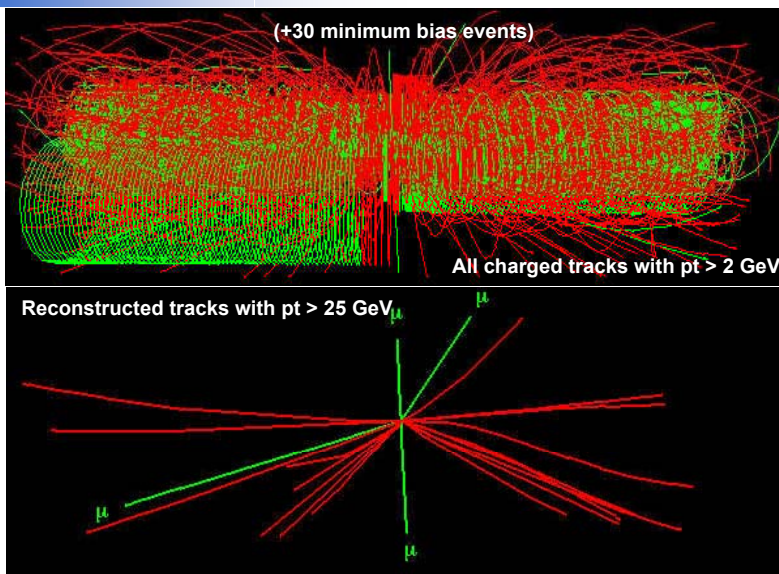
Frekvencija sudara paketa 40 MHz

Frekvencija sudara protona $10^7 - 10^9 \text{ Hz}$

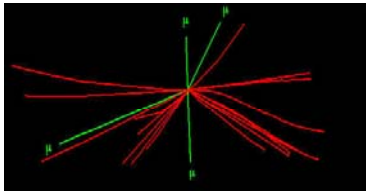
Frekvencija "nove fizike" .00001 Hz

Selekcija događaja:
1 u 10 000 000 000 000

Raspad Higgs bozona u 4 miona

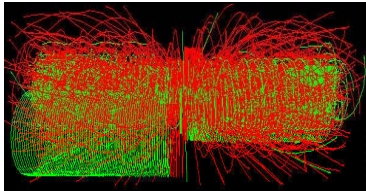


Slijedeći korak u hadronskim sudarima



U slijedećoj generaciji sudarača potrebna potraga za masivnim objektima preko širokog masenog područja.

Sudarači hadrona mogu omogućiti fiziku na visokim energijama na nivou partona i na visokom luminozitetu, ali uz “žrtvovanje” čistih eksperimentalnih uvjeta.



Izazovi na LHC-u:

- Detektori
- Eksperimenti
- Selekcija događaja

Detektori na LHC-u

Teški materijali
(čelik ili bakar + aktivni materijal)

Materijali s velikim brojem protona + aktivni materijal

Elektromagnetski i hadronski kalorimetri

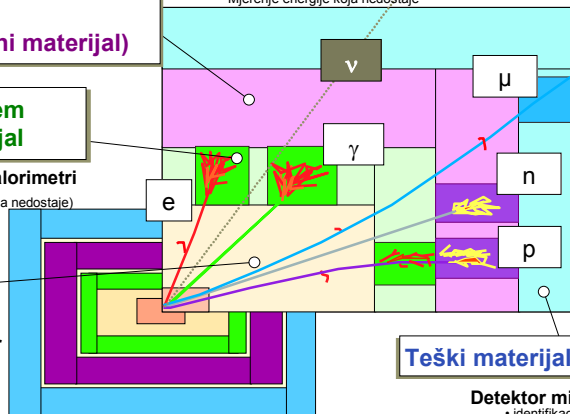
- Identifikacija čestica (e, γ , snopovi, energija koja nedostaje)
- Mjerenje energije

Lagani materijali

Centralni detektor

- p,
- Pozicija em. pljuska
- Topologija
- Verteks

Hermetička kalorimetrija
• Mjerenje energije koja nedostaje



Teški materijali

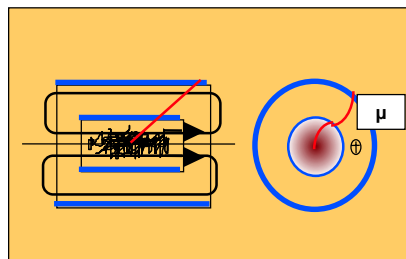
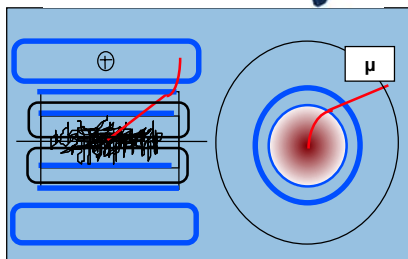
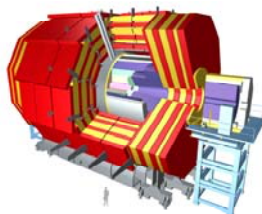
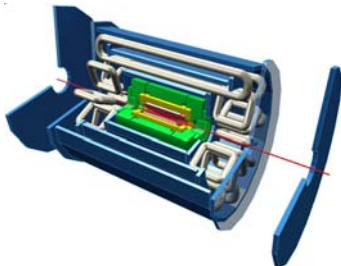
Detektor miona
• identifikacija miona

Svaki sloj identificira čestice stvorene u sudaru i omogućuje mjerenje njihove energije ili količine gibanja

pp eksperimenti na LHC-u

ATLAS A Toroidal LHC ApparatuS

CMS Compact Muon Solenoid

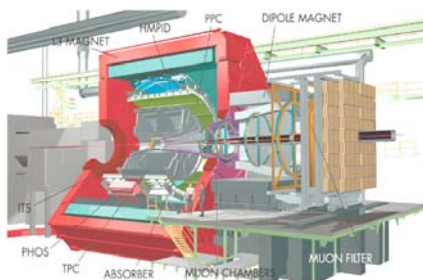


Eksperimenti za teške ione i B fiziku na LHC-u

ALICE

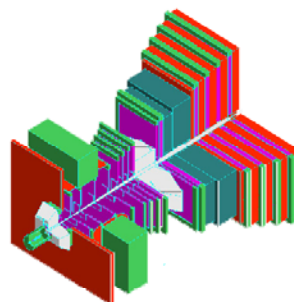
A Large Ion Collider Experiment

The ALICE Collaboration proposes to build a dedicated heavy-ion detector to study the physics of strongly interacting matter at extreme energy densities, where the formation of a new phase of matter, the quark-gluon plasma, is expected.



LHCb

(Study of CP violation in B-meson decays at the LHC collider)



Fizika na LHC-u

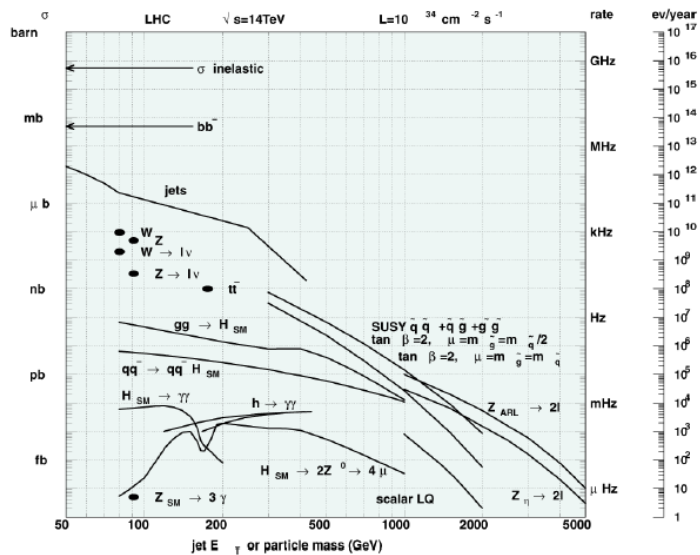
➤ proton-proton sudari:

- Potraga za Higgs bozonom u SM-u do oko 1 TeV,
- Potraga za Higgs bozonima u SUSY (h^0, H^0, A^0, H^\pm),
- Potraga za skvarkovima i gluinima do oko 2,0 TeV,
- Potraga za sleptonima, charginima, neutralinima do oko 0,3 TeV,
- Potraga za novim bozonima: W', Z' do oko 4,5 TeV,
- Alternativni mehanizmi lomljenja elektroslabe simetrije,
- Detaljna istraživanja top fizike,
- Testovi QCD-a,
- Testovi konstanti vezanja,
- CP narušenje u B sektoru,
- Mjerenje totalnog udarnog presjeka
- Potraga za dodatnim dimenzijama

➤ Fizika teških iona: od O-O do Pb-Pb

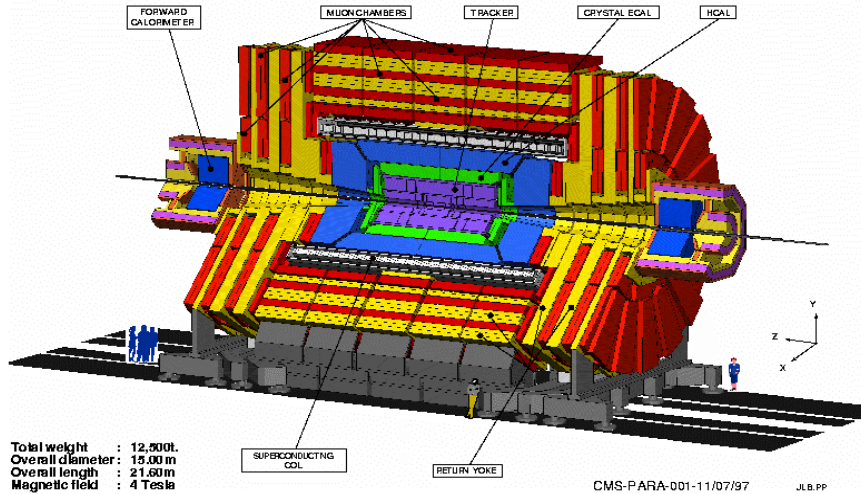
- Potraga za quark-gluon plazmom

Udarni presjeci na LHC-u



The Compact Muon Solenoid (CMS)

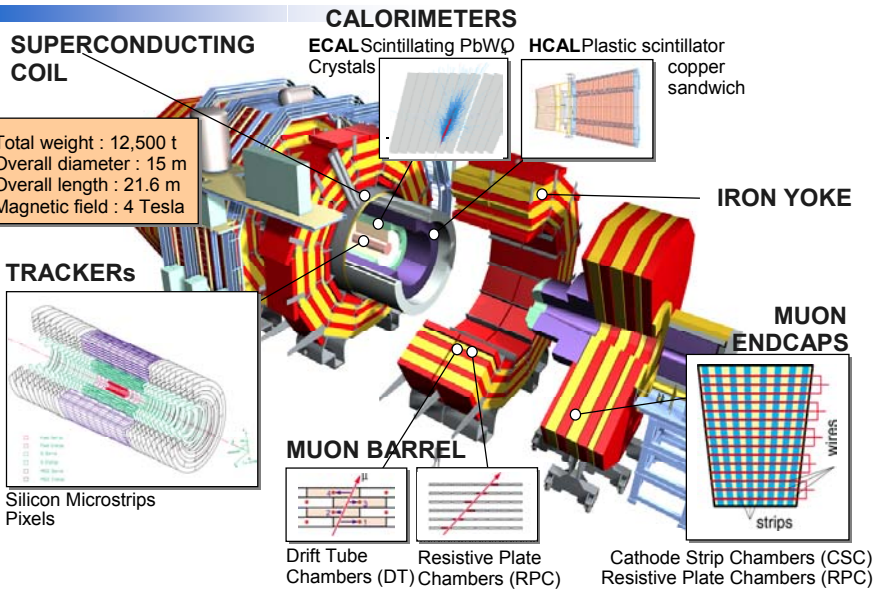
CMS
A Compact Solenoidal Detector for LHC



Total weight : 12,500 t
Overall diameter : 15.00 m
Overall length : 21.60 m
Magnetic field : 4 Tesla

CMS-PARA-001-11/07/97 JLB.PP

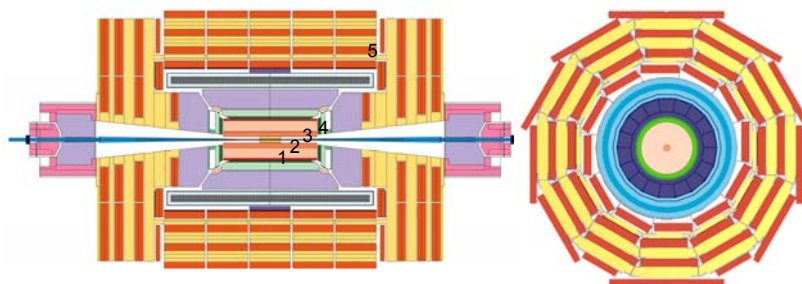
The Compact Muon Solenoid



Izazovi na LHC-u

- **Broj elektroničkih kanala u detektoru – $O(10^7)$**
 - ➔ **Potreba za velikim brojem međuspojeva**
- **20 sudara svakih 25 ns**
 - ➔ **Potreba za velikim protokom informacija**
- **Informacije iz subdetektora trebaju odgovarati jedne drugima**
 - ➔ **Potreba za sinhronizacijom elemenata detektora svakih 25 ns**
- **U nekim slučajevima vrijeme leta > 25 ns**
 - ➔ **Potreba za identifikacijom sudara paketa**
- **Maksimalna frekvencija spremanja podataka – 100 Hz**
 - ➔ **Odbacivanje većine interakcija**
- **Radi se “on-line”**
(nemoguće “se vratiti” i ponovo razmotriti događaj)
 - ➔ **Potreba za nadziranje selekcije**

CMS – različiti pogledi



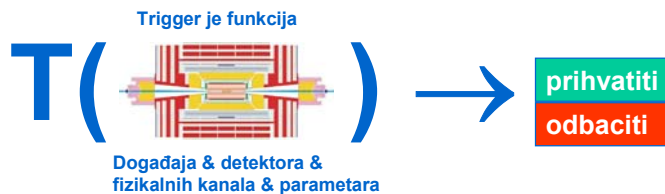
Detektor	Broj kanala	Senzori
1) Verteks	80000000	Pikseli
2) Tracker	16000000	Silicijske mikropruge
3) Preshower	512000	Silicij
4) Kalorimetri	125000	ECAL scintilacijski $PbWO_4$ kristali HCAL plastični scintilatori, bakreni “sandwich”
5) Mionski	1000000	Drift Tube Chambers (DT) Cathode Strip Chambers (CSC) Resistive Plate Chambers (RPC)

Triger/DAQ

➤ Zadatak:

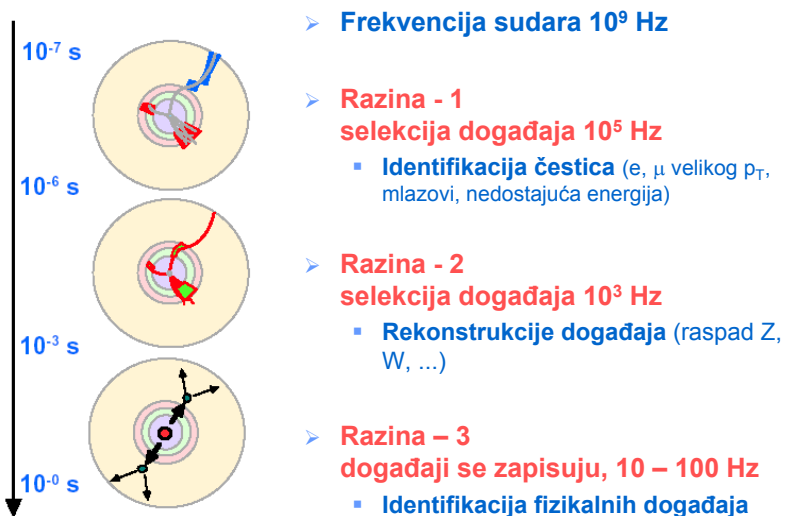
Pogledati (skoro) sve p-p sudare, te odabrati samo interesantne. Zatim sakupiti podatke iz svih detektora i spremiti ih za off-line analizu.

P.S. Za razumnu količinu CHF.



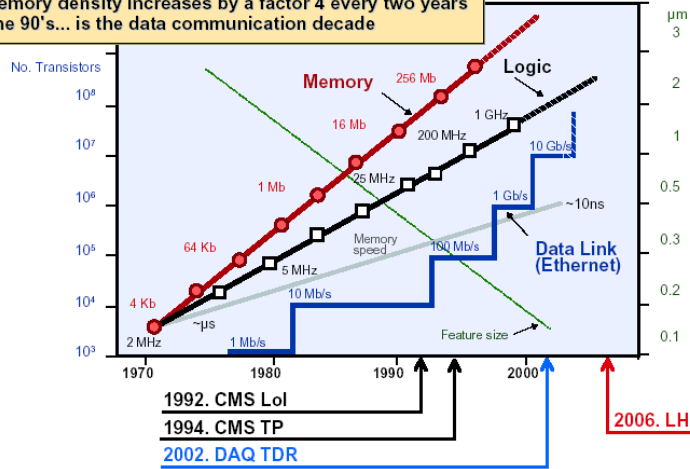
Budući da svi podaci iz svih detektora nisu odmah dostupni i funkcija je vrlo kompleksna, T(...) se izračunava u nekoliko koraka koji se zovu TRIGER RAZINE.

Triger razine u CMS-u

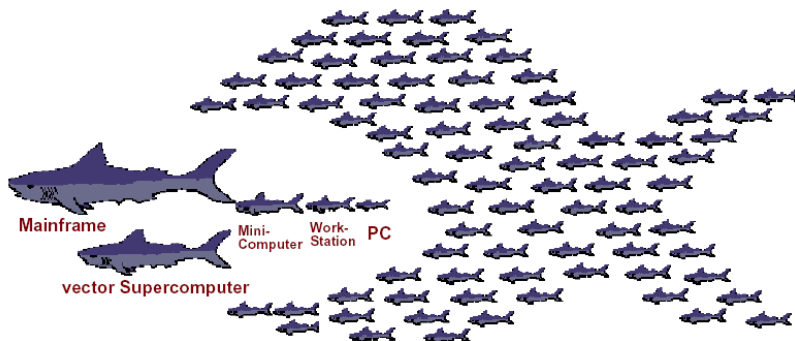


Tehnološki trendovi (Mooreov zakon)

- Processing power increases by a factor 10 every 5 years
- Memory density increases by a factor 4 every two years
- The 90's... is the data communication decade



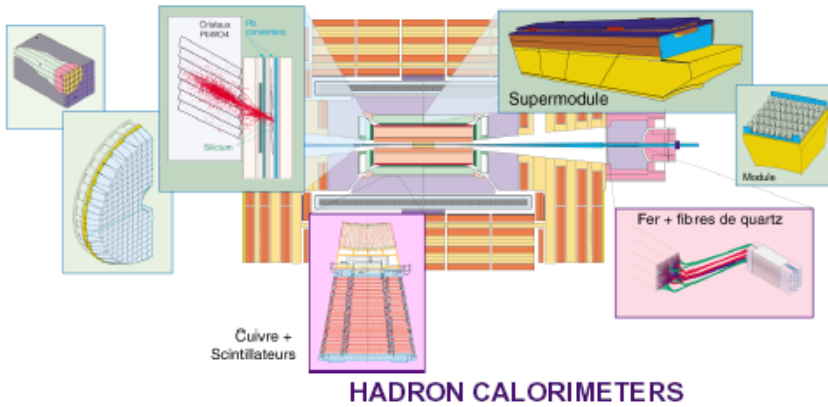
Superkompjuteri danas



Preuzeto sa: <http://now.cs.berkeley.edu>

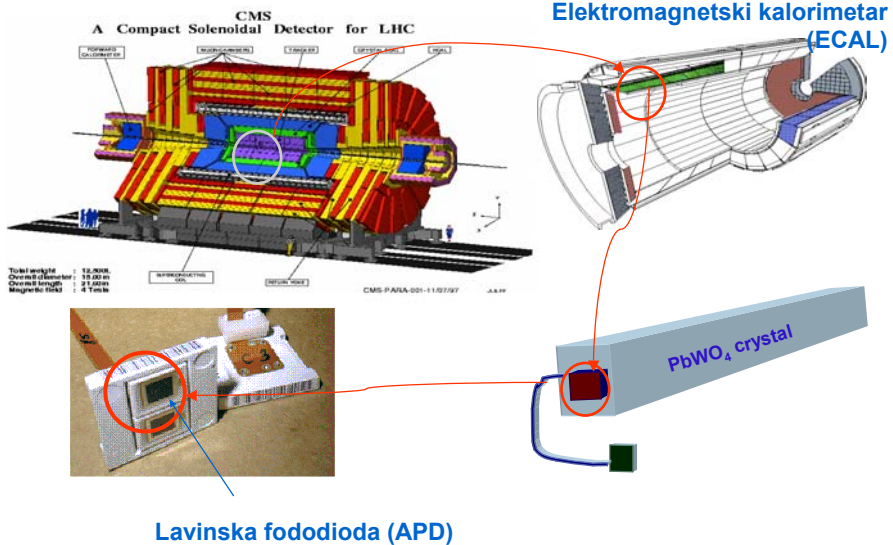
Elektromagnetski kalorimeter CMS-a

ELECTROMAGNETIC CALORIMETERS



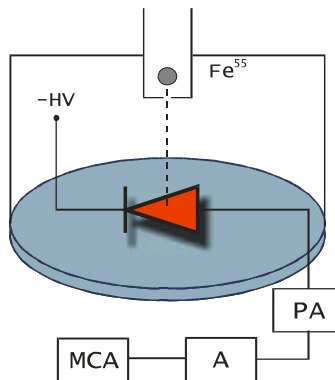
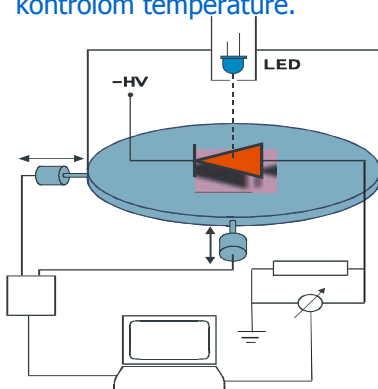
HADRON CALORIMETERS

Elektromagnetski kalorimeter CMS-a



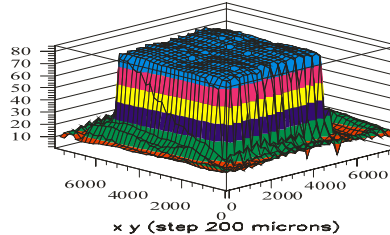
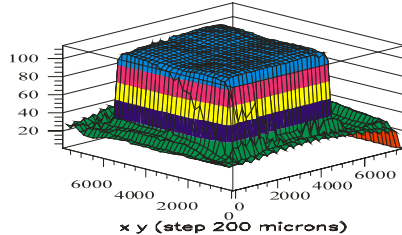
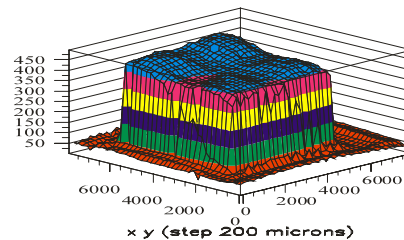
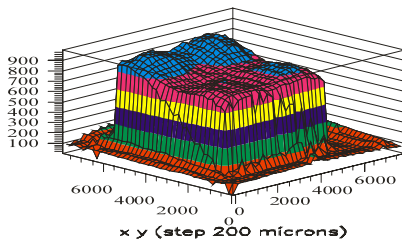
Eksperimentalna mjerenja u Splitu

- Izgrađen je sustav za mjerenje inverzne struje 10 lavinskih fotioda (APD) istovremeno uz praćenje temperature, tijekom godine dana ili duže.
- Gradi se sustav za mjerenje odziva APD-ova na pulсно svjetlo s kontrolom temperature.

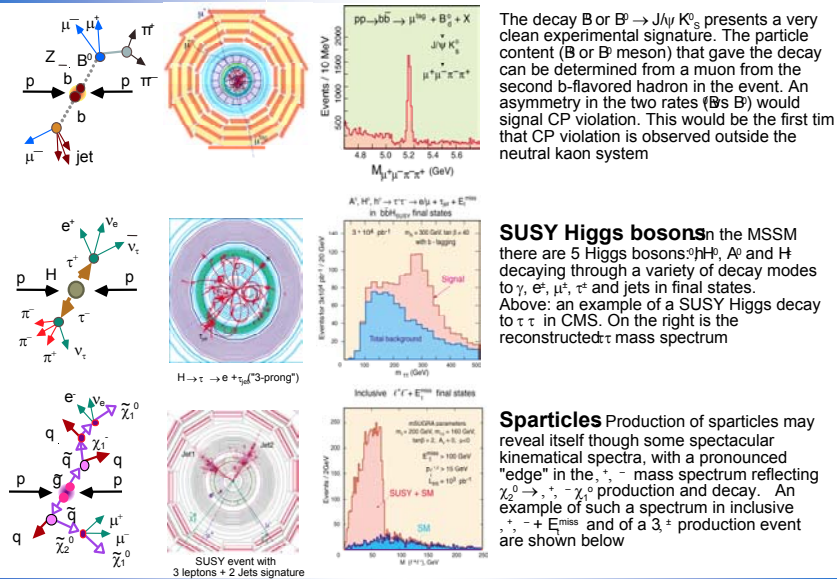


Uniformnost APD-a: rezultati

2000/09/25 07.46
APD 3298, Uniformity response for GREEN LED (520nm)

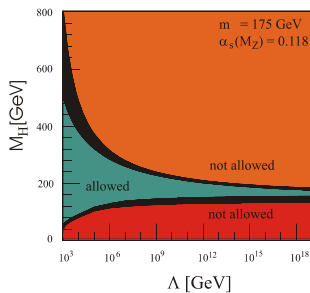


CMS fizika: B & Supersimetrija

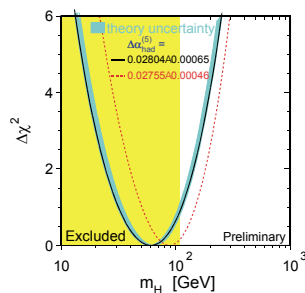


Potruga za Higgs bozonom

Teorijska ograničenja



Indirektna potraga



Direktna potraga, LEP II: nagovještaj (3 σ više događaja signala od pozadine)

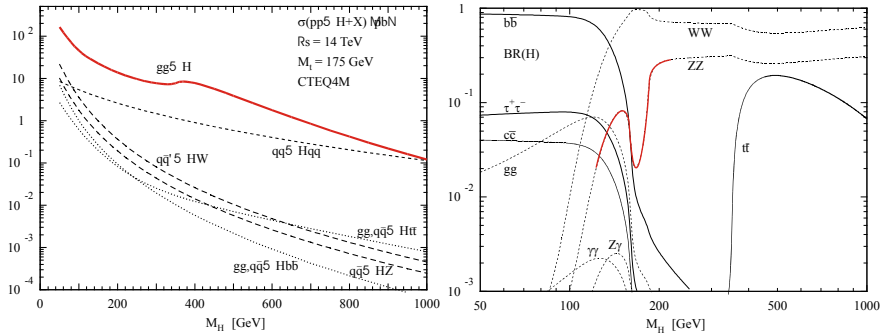
$$m_H = 115 \text{ GeV}$$

Higgs bozon na LHC-u

- Potvrditi postojanje Higgs bozona od 115 GeV ili
- Pronaći Higgs bozon do mase od 1 TeV

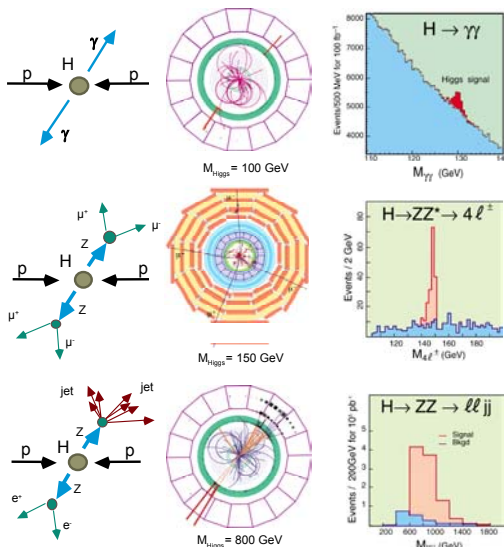
Trenutno: potraga na Tevatronu

Produkcija i raspad Higgs bozona



- **Oko 2 000 000 Higgs bozona s massom $m_H \in (130,180) \text{ GeV}$ biti će proizvedeno na LHC-u za 10^5 pb^{-1} (1 godina rada na nominalnom luminozitetu)**
- **BR($H \rightarrow ZZ^*$) u tom području $\approx 2 - 10 \%$**
- **BR($Z \rightarrow ee$)² = 3,4%² = 0,11%**
- **Očekuje se oko 40 do 200 događaja $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ za 10^5 pb^{-1}**

Fizika Higgs bozona na CMS-u



Higgs to 2 photons ($M_H < 140 \text{ GeV}$). $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ is the most promising channel if M_H is in the range 80 – 140 GeV. The high performance PbWO₄ crystal electromagnetic calorimeter in CMS has been optimized for this search. The $\gamma\gamma$ mass resolution at $M_{\gamma\gamma} \sim 100 \text{ GeV}$ is better than 1%, resulting in a S/B of $\sim 1/20$

Higgs to 4 leptons ($140 < M_H < 700 \text{ GeV}$). In the M_H range 130 - 700 GeV the most promising channel is $H^0 \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2,^+ 2,^-$ or $H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow 2,^+ 2,^-$. The detection relies on the excellent performance of the muon chambers, the tracker and the electromagnetic calorimeter. For $M_H \sim 170 \text{ GeV}$ a mass resolution of $\sim 1 \text{ GeV}$ should be achieved with the combination of the 4 Tesla magnetic field and the high resolution of the crystal calorimeter

Higgs to 2 leptons+2 jets ($M_H > 500 \text{ GeV}$). For the highest M_H , in the range 0.5 - 1 TeV, the promising channels for one year at high luminosity are $H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow \nu,^+ \nu,^- \nu\nu$, $H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow \nu,^+ \nu,^- jj$ and $H^0 \rightarrow W^+W^- \rightarrow \nu,^+ \nu,^- jj$. Detection relies on leptons, jets and missing transverse energy (E_T^{miss}), for which the hadronic calorimeter (HCAL) performance is very important

H → ZZ* → 4e: pozadina

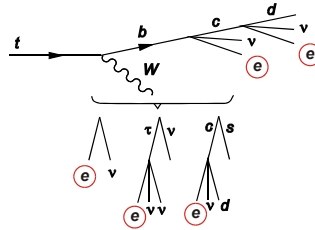
➤ Glavni pozadinski procesi

■ $ZZ^*/\gamma^* \rightarrow 4e$

- tzv. **ireducibilna pozadina**: kinematičke karakteristike slične signalu
- jedina bitna razlika: ravna razdioba invarijante mase 4 elektrona
- Nakon preselekcije: oko **270** očekivanih događaja za 10^5 pb^{-1}

■ $t\bar{t} \rightarrow 4e$

- Nakon preselekcije: oko **2700** očekivanih događaja za 10^5 pb^{-1}
- Glavne karakteristike: “mekši” elektroni, nepostojanje Z i Z* u međustanju, neizolirani elektroni



■ $Zb\bar{b} \rightarrow 4e$

- Nakon preselekcije: oko **2000** očekivanih događaja za 10^5 pb^{-1}
- Glavne karakteristike: “mekši” elektroni, nepostojanje Z* u međustanju, barem 2 neizolirana elektrona

Monte Carlo simulacije

➤ **Monte Carlo simulacije:**

• fizikalnih procesa

produkcija čestica u p-p sudaru, raspad, hadronizacija, početni i konačni pljusak čestica ...

software: PYTHIA, ISAJET, HERWIG, CompHEP, PHOTOS

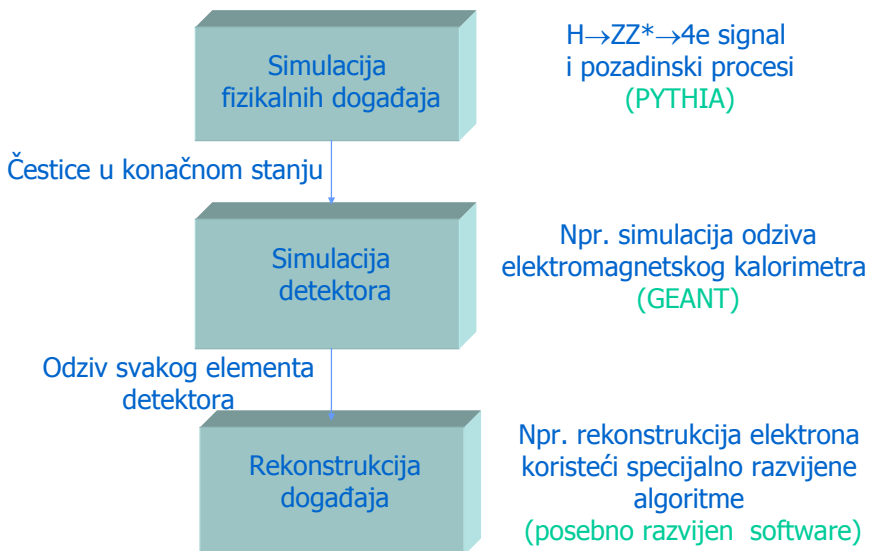
• interakcija čestica s materijalima u detektoru

software: GEANT

koriste se za:

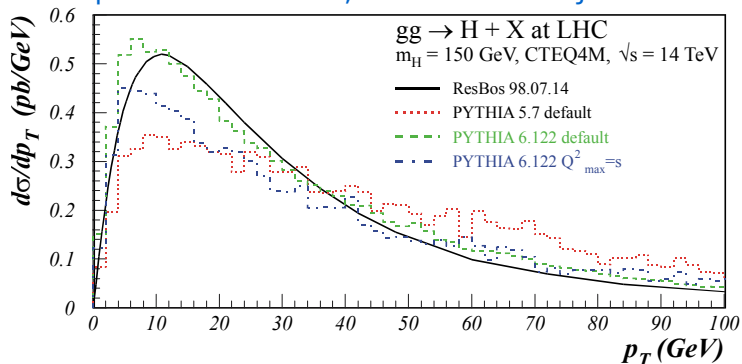
- **dizajn i optimiziranje** detektora,
- **razvoj algoritama za rekonstrukciju** fizikalnih objekata (elektron, foton, mion, snop čestica ...) u detektoru
- **provjeru experimentalnih rezultata** kada detektor započne s radom

Proces simulacije



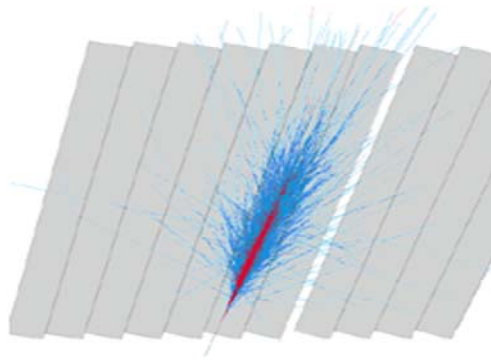
Simulacija fizikalnih događaja

- Udarni presjeci i omjeri grananja: **najnoviji teorijski proračuni** (uključuju korekcije viših redova)
- Topologija čestica u konačnom stanju: **Monte Carlo generatori**
- Usporedba rezultata s drugim teorijskim modelima:
PYTHIA: parton shower model, **ResBos**: resumacija



Simulacija odziva detektora

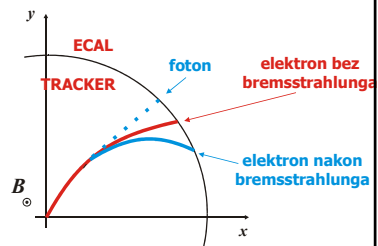
- "Softverska" konstrukcija detektora s **kompletnom geometrijom** i svim poznatim (relevantnim) **detektorskim efektima** (magnetsko polje, interakcije čestica s materijom, elektromagnetski pljusak čestica, ...)



pljusak čestica u elektromagnetskom kalorimetru

Rekonstrukcija događaja

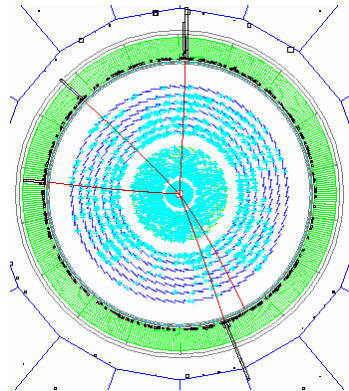
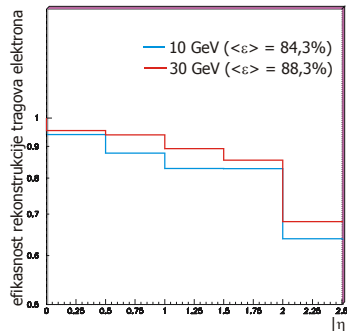
- **Primjer: rekonstrukcija elektrona**
 - Rekonstrukcija tragova u unutarnjem detektoru tragova
 - Rekonstrukcija nakupina kristala u elektromagnetskom kalorimetru
 - Spajanje tragova i nakupina, te procjena količine gibanja elektrona kombinirajući sva dostupna mjerenja
- **Problem: materijal u detektoru tragova ⇒ bremsstrahlung!**
 - Razvijeni algoritmi za rekonstrukciju elektrona uzimajući u obzir specifične detektorske efekte (bremsstrahlung u materijalu detektora tragova, geometrijski efekti, magnetsko polje ...)
 - Potpuna migracija na nove tehnologije
Objekto programiranje i C++, objektna baza podataka, novi alati za analizu podataka - ROOT ...



Rekonstrukcija tragova

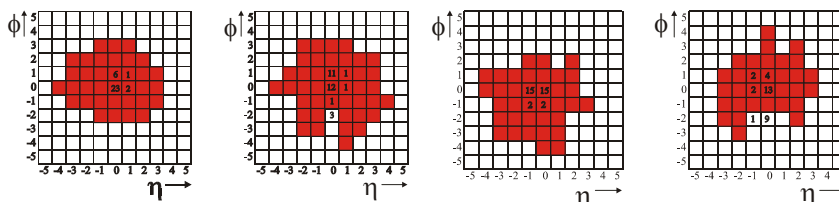
➤ Zahtjevi za rekonstrukciju tragova elektrona:

- **velika efikasnost**
- **izvršna preciznost**



Rekonstrukcija u ECAL-u

- Identificirati **nakupinu** (*cluster*) kristala u kojima je elektron/foton ostavio svoju energiju i procijeniti tu energiju
- Zahtjevi na algoritam za traženje nakupina:
 - **Nakupina što manja da se smanji utjecaj šuma**
 - **Sposobnost razlikovanja bliskih čestica**
 - **Algoritam što fleksibilniji**
- Razvijen posebni **dinamički algoritam** koji
 - Procjenjuje energiju uzimajući u obzir predviđanje deponirane energije u kristalima.
 - Omogućuje smanjivanje efekta **bremstrahlung**a



Razlikovanje signala od pozadine ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$) - 1

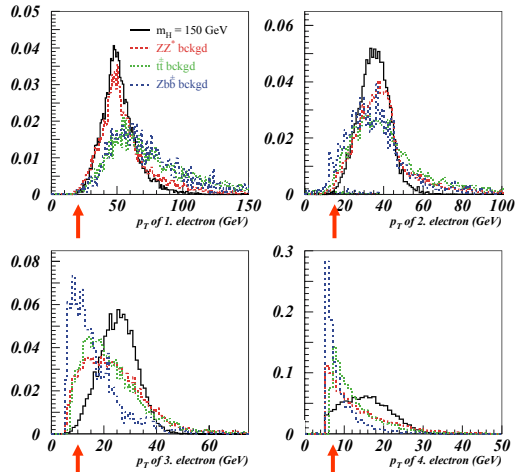
➤ Rezovi na poprečnu količinu gibanja

$$p_T^{e_1} > 20 \text{ GeV}$$

$$p_T^{e_2} > 15 \text{ GeV}$$

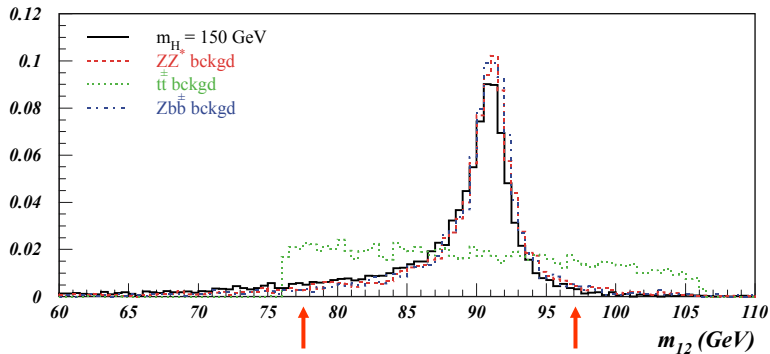
$$p_T^{e_3} > 10 \text{ GeV}$$

$$p_T^{e_4} > 7 \text{ GeV}$$



Razlikovanje signala od pozadine ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$) - 2

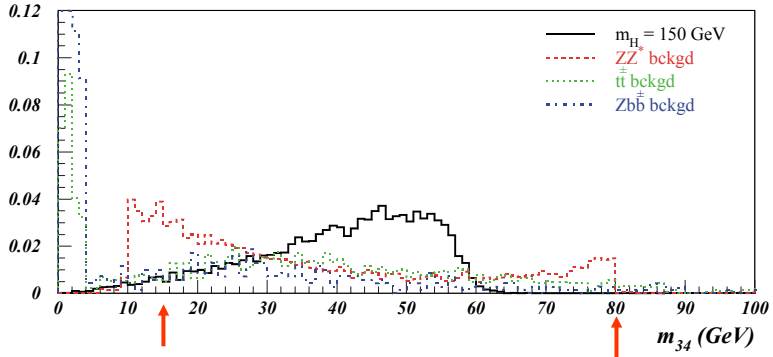
➤ Rez na masu Z bozona



$$M_Z - 13 \text{ GeV} < m_{e^+e^-} < M_Z + 6 \text{ GeV}$$

Razlikovanje signala od pozadine ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$) - 3

➤ Rez na masu Z^* bozona

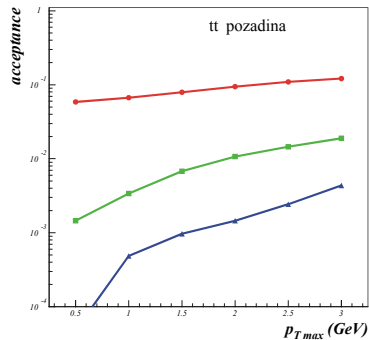
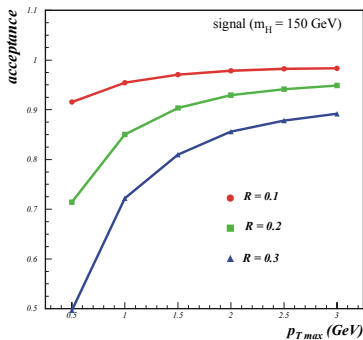


$$15 \text{ GeV} < m_{e^+e^-} < 80 \text{ GeV}$$

Razlikovanje signala od pozadine ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$) - 4

➤ Izolacija

promatramo nabijene čestice oko elektrona



Elektron je izoliran ako oko njega nema niti jednog nabijenog traga s $p_T > 2,5 \text{ GeV}$ u konusu $R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} = 0,2$

Razlikovanje signala od pozadine ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$) - 5

- **Rezultat rezova na nivou generatora događaja** (akceptance, relativno s obzirom na preselekciju)

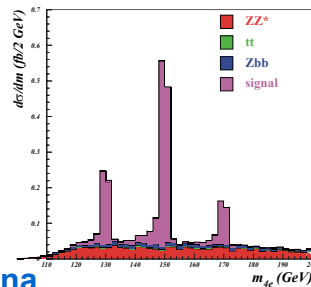
Rez	p_T elektrona	M_{Z^*}	M_Z	Izolacija	Acc. Tot.
	$p_T > 20, 15, 10, 7$ GeV	$15 < m_{ee} < 80$ GeV	$M_Z - 13 \text{ GeV} < m_{ee} < M_Z + 6 \text{ GeV}$	Bez nabijenih tragova s $p_T > 2,5$ GeV u konusu $R=0,2$	
$m_H = 130 \text{ GeV}$	0,94	0,90	0,82	0,93 (0,80)	0,64 (0,55)
$m_H = 150 \text{ GeV}$	0,98	0,95	0,91	0,94 (0,80)	0,80 (0,67)
$m_H = 170 \text{ GeV}$	0,99	0,96	0,94	0,94 (0,80)	0,84 (0,71)
ZZ^*/γ^*	0,91	0,81	0,91	0,95 (0,81)	0,63 (0,54)
tt	0,87	0,64	0,70	0,014	0,0055
Zbb	0,77	0,38	0,90	0,067	0,018

- Brojevi u zagradama odgovaraju visokom luminozitetu

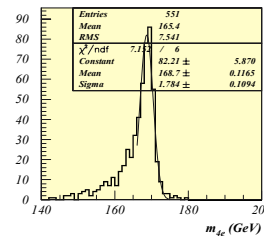
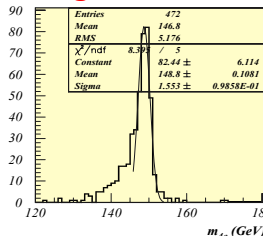
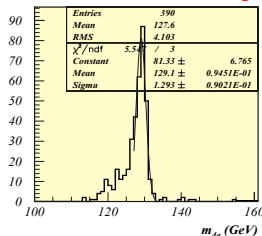
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$: rezultati (1)

- **Invarijantna masa 4 elektrona** (na nivou MC generatora)

- **Signal:** Breit-Wigner + internal bremsstrahlung
- **Pozadina:** ravna distribucija
- **Zahtjev za što boljom rezolucijom** u mjerenju količine gibanja elektrona

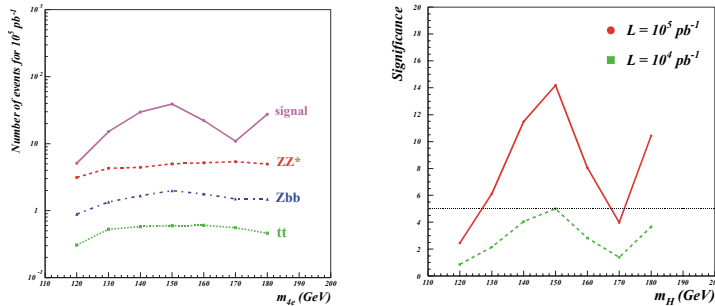


- **Rekonstrukcija mase Higgs bozona** koristeći razvijene algoritme



H \rightarrow ZZ* \rightarrow 4e: rezultati (2)

➤ Broj događaja i signifikantnost



➤ Moguća poboljšanja:

- Poboljšanje efikasnosti nalaženja tragova (ovdje 64% za 4 el.)
- Potraga za fotonima izračenim internim bremsstrahlungom

➤ Uključivanjem miona, broj događaja poraste oko 4 puta, a signifikantnost za faktor 2

Zaključak

- LHC će započeti sa radom **2006. godine** zajedno sa svojim detektorima.
- CMS detektor je trenutno **u fazi izvedbe**. Većina narudžbi prema industriji je već obavljena i dijelovi detektora već konstruirani.
- CMS će pronaći Higgs bozon do mase **od 1 TeV**, ili potvrditi indicaciju **LEP II** za Higgs bozon od **115 GeV**.
- Kroz **H \rightarrow ZZ* \rightarrow 4e** kanal Higgs bozon će se naći na CMS-u, ako mu je masa između **125 GeV** i **2 M_Z**.
- **Očekuje nas vrlo zanimljiva fizika na LHC-u.**